

Міністерство освіти і науки України;  
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»;  
Національна академія наук вищої освіти України;  
Донбаська державна машинобудівна академія;  
Вінницький національний технічний університет;  
University of Szeged, (Hungary);  
Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);  
Apeiron University in Banja Luka (Bosnia and Herzegovina);  
Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod JJ Strossmayer University of Osijek  
(Croatia);  
University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering;  
Zhejiang Normal University, College of Engineering;  
Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology &  
Equipment of Zhejiang Province , Jinhua, (China);  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя;  
Вінницький національний аграрний університет;  
Академія дослідників штучного інтелекту;  
Студентське наукове товариство з технологій машинобудування;  
Мала академія наук з науково-промислового профілю.



## МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО- ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

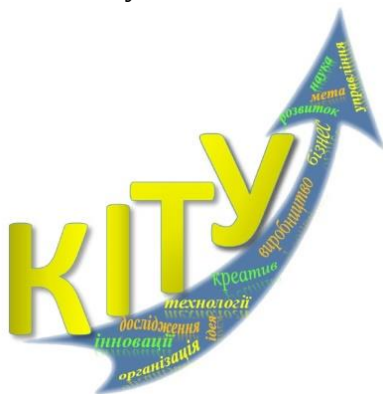
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції  
15-17 квітня 2026 р.

За загальною редакцією  
д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського

Краматорськ – Вінниця, Україна

Ministry of Education and Science of Ukraine;  
 Institute of Education Content Modernization (Ukraine);  
 National Academy of Higher Education of Ukraine;  
 Donbas State Engineering Academy (Ukraine);  
 Vinnytsia National Technical University (Ukraine);  
 University of Szeged, (Hungary);  
 Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade (Serbia);  
 Apeiron University in Banja Luka, (Bosnia and Herzegovina);  
 Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, JJ Strossmayer University of Osijek  
 (Croatia);  
 University of Montenegro Faculty of Mechanical Engineering (Montenegro);  
 Zhejiang Normal University, College of Engineering;  
 Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology &  
 Equipment of Zhejiang Province, Jinhua, (China);  
 Ternopil National Technical University named after Ivan Puluy (Ukraine);  
 Vinnytsia National Agrarian University (Ukraine);  
 Academy of Artificial Intelligence Researchers (Ukraine);  
 Student Scientific Society in Mechanical Engineering Technologies (Ukraine);  
 Junior Academy of Sciences of Scientific and Industrial Orientation (Ukraine).



## **YOUNG SCIENCE - ROBOTICS AND NANO- TECHNOLOGY OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS  
 International Youth Scientific and Technical Conference  
 April 15-17, 2026

According to the general edition  
 Doctor of Technical Sciences, Prof. Sergiy Kovalevskyy

Kramatorsk - Vinnytsia , Ukraine

УДК 62:007:[681.5:621.7](075.8)  
М 75

**Рецензенти:**

Колосов Д.Л. - докт. техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Новіков Ф.В. - докт. техн. наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;

Затверджено на засіданні вченої ради ДДМА (протокол № 9 від 23.04.2026 р.)

М 75 Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 15-17 квітня 2026 р. / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф.. – Краматорськ: ДДМА, 2026. – 414с.

Young science - robotics and nano-technologies of modern mechanical engineering: a collection of scientific papers of the International Youth Scientific and Technical Conference, April 15-17, 2026 / for general. ed. S.V. Kovalevskyy, Dr. Tech. Science, Prof.. - Kramatorsk: DSEA, 2026. – 414 p.

ISBN 978-617-7893-26-3

У збірнику опубліковано матеріали наукових праць аспірантів, магістрантів, студентів і учнів — членів Малої академії наук України за науково-промисловим напрямом, а також Академії дослідників штучного інтелекту. У працях представлено перспективні ідеї, результати аналізу актуальних проблем автоматизації машинобудування, зокрема створення функціональних робочих поверхонь деталей машин. Наведено розробки, готові до практичного впровадження. Збірник призначено для використання у практичній діяльності здобувачів вищої освіти, а також фахівців машинобудівних підприємств.

The proceedings volume presents research papers by postgraduate students, master's students, undergraduate students, and school students — members of the Junior Academy of Sciences of Ukraine (scientific and industrial domain), as well as the Academy of Artificial Intelligence Researchers. The papers highlight promising ideas and provide analyses of current challenges in the automation of mechanical engineering, particularly in the development of functional working surfaces of machine components. Developments ready for practical implementation are also included. The volume is intended for practical use by higher education students and professionals in machine-building industries.

ISBN 978-617-7893-26-3

УДК 62:007:[681.5:621.7](075.8)  
© ДДМА,  
2026

### Програмний комітет конференції:

- Dašić Predrag** - Hon.D.Sc., Prof., Academy of Professional Studies Šumadija - – Department in Trstenik (Serbia);
- Jenek Mariusz** - Dr. inz (Polska, Uniwersitet Zielonogorski);
- Marušić Vlatko** - Dr.Sc., Prof., J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia);
- Sandra Poirier** - Doctor of Education, CFCS, LD/N Professor (Middle Tennessee State University, USA);
- Guida Domenico** - Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano (Italy);
- Gyula Mester**, - Dr.Sc., Professor, Academic, (University of Szeged, Hungary);
- Karabegović Isak** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina);
- Mirjanić Dragoljub** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ANURS), Banja Luka (Republic of Srpska - Bosnia and Herzegovina);
- Nedeff Valentin** - Dr.Sc., Prof., University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău (Romania);
- Pele Alexandru-Viorel**, dean - Dr.Sc., Prof., University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea (Romania);
- Zhelezarov S. Iliya**, rector - Dr.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Gabrovo (Bulgaria);
- Воробйов Б.В.** – PhD, доц., ДДМА, (Україна);
- Гринь О.Г.** – к.т.н., доц., ДДМА, (Україна);
- Кіяновський М.В.** - д.т.н., проф. (КНТУ, Кривий Ріг, Україна);
- Клименко С.А.** – д.т.н., проф. (ІНМ АНУ, Київ, Україна);
- Ковалевський С.В.** - д.т.н., проф., (ДДМА, Україна);
- Ковальов В.Д.** - д.т.н., проф., (ДДМА, Україна);
- Козлов Л.Г.** - д.т.н., проф., (ВНТУ, м.Вінниця, Україна);
- Колосов Д.Л.** – д.т.н., проф. («Дніпровська політехніка», м.Дніпро, Україна);
- Кузнецов Ю.М.** - д.т.н., проф., ( НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м.Київ, Україна);
- Мазур М.П.** - д.т.н., проф., (ХНУ, м.Хмельницький, Україна);
- Макаренко Н.О.** - д.т.н., проф., (ДДМА, Україна);
- Марков О.Є.** - д.т.н., проф., (ДДМА, Україна);
- Марчук В.І.** - д.т.н., проф., (ЛНТУ, м.Луцьк, Україна);
- Новіков Ф.В.** - д.т.н., проф., (ХНЕУ, м.Харків, Україна);
- Оргіян О.А.** - д.т.н., проф., (ОНПУ, м.Одеса, Україна);
- Петраков Ю.В.** - д.т.н., проф., ( НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м.Київ, Україна);
- Петров О.В.**- к.т.н., проф., (ВНТУ, м.Вінниця, Україна);
- Сапон С.П.,** - к.т.н., доц., ( НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, м.Київ, Україна);
- Сухоруков С.І.** – к.т.н., доц. (ВНТУ, м. Вінниця, Україна);
- Томашевський Р.С.** - д.т.н., проф., (ДДМА, Україна);
- Чмихова О.В.** – к.т.н., доц., ДДМА, (Україна).



### ***Program Committee:***

- Dašić Predrag** - Hon.D.Sc., Prof., Academy of Professional Studies Šumadija - – Department in Trstenik (Serbia);
- Jenek Mariusz** - Dr. inz (Polska, Uniwersitet Zielonogorski);
- Marušić Vlatko** - Dr.Sc., Prof., J.J. Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod (Croatia);
- Sandra Poirier** - Doctor of Education, CFCS, LD/N Professor (Middle Tennessee State University, USA);
- Guida Domenico** - Dr.Sc., Prof., University of Salerno, Department of Industrial Engineering (DIIn), Fisciano (Italy);
- Gyula Mester**, - Dr.Sc., Professor, Academic, (University of Szeged, Hungary);
- Karabegović Isak** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina);
- Mirjanić Dragoljub** - Dr.Sc., Prof., Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ANURS), Banja Luka (Republic of Srpska - Bosnia and Herzegovina);
- Nedeff Valentin** - Dr.Sc., Prof., University of Bacău, Faculty of Engineering, Bacău (Romania);
- Pele Alexandru-Viorel**, dean - Dr.Sc., Prof., University of Oradea, Faculty of Management and Technological Engineering, Oradea (Romania);
- Zhelezarov S. Iliya**, rector - Dr.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Gabrovo (Bulgaria);
- Vorobyov B.V.**, Ph.D., Associate Professor (DSEA, Ukraine);
- Hryn O.H.** - Ph.D., Associate Professor (DSEA, Ukraine);
- Kiyanovsky M.V.** - D.Sc., Professor (KNTU, Kryvyi Rih, Ukraine);
- Klymenko S.A.** - D.Sc., Professor (ISM NASU, Kyiv, Ukraine);
- Kovalevskyy S.V.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kovalov V.D.** - D.Sc., Professor (DSEA, Kramatorsk, Ukraine);
- Kozlov L.G.** - D.Sc., Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Kolosov D.L.** - D.Sc., Professor («Dnipro Polytechnic», Dnipro, Ukraine);
- Kuznetsov Yu.M.** - D.Sc., Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Mazur M.P.** - D.Sc., Professor (KhNU, Khmelnytskyi, Ukraine);
- Makarenko N.O.** - D.Sc., Professor (DSEA, Ukraine);
- Markov O.Ye.** - D.Sc., Professor (DSEA, Ukraine);
- Marchuk V.I.** - D.Sc., Professor (LNTU, Lutsk, Ukraine);
- Novikov F.V.** - D.Sc., Professor (KhNEU, Kharkiv, Ukraine);
- Orhian O.A.** - D.Sc., Professor (ONPU, Odesa, Ukraine);
- Petrakov Yu.V.** - D.Sc., Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Petrov O.V.** - Ph.D., Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Sapon S.P.** - Ph.D., Associate Professor (NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine);
- Sukhorukov S.I.** - Ph.D., Associate Professor (VNTU, Vinnytsia, Ukraine);
- Tomashevskiy R.S.** – D.Sc. Professor (DSEA, Ukraine);
- Chmykhova O.V.** – Ph.D., Associate Professor (DSEA, Ukraine).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Opening speech from the organizing committee.</b><br><b>Вступне слово від організаційного комітету.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>12</b> |
| <b>Abhari P.B., Solianov D.O., Oliinyk D.S.</b> ( <i>Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk – Ternopil – Khust, Ukraine</i> ): <b>FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RADIAL-FORWARD EXTRUSION PROCESS FOR SEAMLESS TUBE PRODUCTION.</b>                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>14</b> |
| <b>Božičković<sup>1</sup> S., Garić<sup>2</sup> R.</b> ( <i><sup>1</sup>Transportation and Electrical School Doboj, Doboj, Bosnia and Herzegovina; <sup>2</sup>College of Professional Studies for Management and Business Communications, Belgrade, Serbia</i> ): <b>DECENTRALIZED COORDINATION ALGORITHMS FOR DRONE SWARMS IN GUARDING CRITICAL INDUSTRIAL INFRASTRUCTURE.</b>                                                                                                       | <b>20</b> |
| <b>Bryhyda M., Khomyuk V., Piontkevych O.</b> ( <i>Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine</i> ): <b>APPLICATION OF A DIGITAL TWIN OF A ROBOTIC WELDING COMPLEX FOR TORCH TRAJECTORY OPTIMIZATION.</b>                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>28</b> |
| <b>Gyula Mester<sup>1</sup>, Janos Santa<sup>2</sup></b> ( <i><sup>1</sup>University of Szeged, Szeged, Hungary; <sup>2</sup>Metropolitan University, Belgrade, Serbia</i> ): <b>THE RANKING LIST OF HUNGARIAN ROBOTICS RESEARCHERS 2026</b>                                                                                                                                                                                                                                           | <b>32</b> |
| <b>Karabegović<sup>1</sup> I., Husak<sup>2</sup> E., Dašić<sup>3</sup> P.</b> ( <i><sup>1</sup>Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; <sup>2</sup>University of Bihać, Technical Faculty Bihać, Bihać, Bosnia and Herzegovina; <sup>3</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia</i> ): <b>INTEGRATION OF AI AND COLLABORATIVE ROBOTS FOR CYCLE TIME OPTIMIZATION IN CNC PRODUCTION.</b>                            | <b>40</b> |
| <b>Ketin<sup>1</sup> S., Vasiljević<sup>1</sup> R., Đurić<sup>2</sup> T., Biočanin<sup>2</sup> R.</b> ( <i><sup>1</sup>Academy of Technical and Art Applied Studies Belgrade, Belgrade, Serbia; <sup>2</sup>International Faculty Travnik, Travnik, Bosnia and Herzegovina</i> ): <b>SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND WATER TRANSPORT.</b>                                                                                                                                                  | <b>49</b> |
| <b>Pravdić<sup>1</sup> P., Milosavljević<sup>1</sup> Z., Manjenčić<sup>1</sup> D., Dorđević<sup>2</sup> V.</b> ( <i><sup>1</sup>Academy of Professional Studies Kruševac, Kruševac, Serbia; <sup>2</sup>Technical College of Vocational Studies Novi Sad, Novi Sad, Serbia</i> ): <b>APPLICATION OF ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGY OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING IN MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT AS AN INSTRUMENT OF SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL PROTECTION.</b>                           | <b>56</b> |
| <b>Pravdić<sup>1</sup> P., Milosavljević<sup>1</sup> Z., Manjenčić<sup>1</sup> D., Dorđević<sup>2</sup> V.</b> ( <i><sup>1</sup>Academy of Professional Studies Kruševac, Kruševac, Serbia; <sup>2</sup>Technical College of Vocational Studies Novi Sad, Novi Sad, Serbia</i> ): <b>INTEGRATION OF ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGIES OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING INTO MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT SYSTEMS TO IMPROVE ECOLOGICAL SAFETY AND SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL PROTECTION.</b>  | <b>64</b> |
| <b>Pravdić<sup>1</sup> P., Milosavljević<sup>1</sup> Z., Manjenčić<sup>1</sup> D., Dorđević<sup>2</sup> V.</b> ( <i><sup>1</sup>Academy of Professional Studies Kruševac, Kruševac, Serbia; <sup>2</sup>Technical College of Vocational Studies Novi Sad, Novi Sad, Serbia</i> ): <b>ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGIES IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING: INNOVATIVE APPROACHES TO MUNICIPAL WASTE TREATMENT, ENVIRONMENTAL PROTECTION AND THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES.</b> | <b>75</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Sapon S. P., Drachuk O. O., Frolov V. K., Vakulenko M. V.</b> ( <i>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine</i> ): <b>METHODS FOR CREATING DIGITAL TWINS OF MANUFACTURING EQUIPMENT.</b>                                                                                                                 | <b>85</b>  |
| <b>Zuo Pengcheng, E Shiju, Shkvar Ye.O.</b> ( <i>Zhejiang Normal University, College of Engineering, Jinhua, China</i> ): <b>IMPROVING THE DESIGN OF INTERNAL DIMENSIONAL DEVICES INSTALLED INSIDE A CLOSED-LOOP WIND TUNNEL IN ORDER TO REDUCE ADDITIONAL DRAG LOSSES.</b>                                                                                           | <b>93</b>  |
| <b>Бей В.В., Кириченко І.Г., Черніков О.В.</b> ( <i>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна</i> ): <b>МОДЕЛЮВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ЕКСКАВАТОРІВ VOLVO.</b>                                                                                                                                                              | <b>105</b> |
| <b>Безгін О.А.</b> ( <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна</i> ): <b>РОБОТИЗОВАНЕ ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КЕРОВАНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЯК РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.</b>                                                                                          | <b>108</b> |
| <b>Бобров<sup>1</sup> Д.С., Єфременко<sup>2</sup> В.Г., Бриков<sup>1</sup> М.М.</b> ( <i><sup>1</sup>Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна; <sup>2</sup>Приазовський державний технічний університет, Дніпро, Україна</i> ): <b>ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НАНОБЕЙНІТУ В СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ.</b>                | <b>112</b> |
| <b>Бондарєв Я.Г., Шашко В.О.</b> ( <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна</i> ): <b>РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ.</b>                                                                                                                                                                | <b>117</b> |
| <b>Борисенко Ю.Ю.</b> ( <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна</i> ): <b>ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ.</b>                                                                                                   | <b>124</b> |
| <b>Ворона<sup>1</sup> С.О., Онищук<sup>1</sup> С.Г., Тулупов<sup>2</sup> В.І.</b> ( <i><sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль, Україна; <sup>2</sup>Краматорський фаховий коледж технологій та дизайну, м. Краматорськ–Черкаси, Україна</i> ). <b>ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОБУДУВАННІ.</b> | <b>127</b> |
| <b>Врублевський І.Б.</b> ( <i>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна</i> ): <b>ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА АДИТИВНИХ, СУБТРАКТИВНИХ ТА ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МАШИНОБУДУВАННІ.</b>                                                                                                                                                         | <b>131</b> |
| <b>Герула Б.О., Кіяновський М.В., Цивінда Н.І.</b> ( <i>Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна</i> ): <b>ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПРИСКОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПІДГОТОВЛЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БРОНЕЙ ДРОБАРІВ НА ОСНОВІ ГРУПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.</b>                                                                                                        | <b>135</b> |
| <b>Григоренко Я.С., Дмитрієв Д.О.</b> ( <i>Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна</i> ): <b>ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ТА IN-SITU МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФЕКТІВ У ПРОЦЕСАХ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛЕВИХ</b>                                                                                                             | <b>142</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ВИРОБІВ.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
| Гуцалюк <sup>1</sup> А.М., Ковалевський <sup>2</sup> С.В. ( <sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна; <sup>2</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ДЕТАЛЕЙ У ПІЩАНО-ГЛИНИСТИХ ФОРМАХ.</b>                                                      | 145 |
| Дмитрієв Д.О., Катріч С.Г., Кузмічов М.Ф. (Херсонський національний технічний університет, Хмельницький, Україна): <b>ЗАЛЕЖНІСТЬ МІКРОТВЕРДОСТІ ДЕТАЛЕЙ ВІД СТРАТЕГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО 3D ДРУКУ ТИТАНОВИМ ДРОТОМ.</b>                                                                                                                                                   | 151 |
| Жаріков Д., Борисов Д., Романенко А., Гринь О.Г., Жаріков С.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ПОШУК РАЦІОНАЛЬНОГО БАЛАНСУ ПОЄДНАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛАКОВОЇ СИСТЕМИ.</b>                                                                                                                            | 155 |
| Зеленський І.Р., Третьак В.В., Волков А.О. (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна): <b>АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ КІЛЬКОСТІ І ПОСЛІДОВНОСТІ ОПЕРАЦІЙ ПРИ ФОРМУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ДЕТАЛІ «ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ».</b>                                                                                            | 160 |
| Зюган У.І., Цивінда Н.І. (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна): <b>АНАЛІЗ ОБРОБКИ ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ ІНСТРУМЕНТАМИ З КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ.</b>                                                                                                                                                                                           | 167 |
| Іванченко В.І., Светлічний І.В., Хоменко Є.В. (Науково-дослідний центр Державної спеціальної служби транспорту, м. Дніпро, Україна): <b>РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ВІЙСЬКОВОМУ МАШИНОБУДУВАННІ: ДОСВІД КОРПУСУ ІНЖЕНЕРІВ АРМІЇ США ТА КОРПУСУ КОРОЛІВСЬКИХ ІНЖЕНЕРІВ БРИТАНСЬКОЇ АРМІЇ.</b>                                                                      | 171 |
| Картамишев Д.О., Семеній В.А. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНОМ З РОБОЧИМ МІСЦЕМ МЕНЕДЖЕРА ТА ІНТЕГРОВАНИМИ СТАТИСТИЧНИМИ МОДУЛЯМИ.</b>                                                                                                                  | 176 |
| Кінденко М.І. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСТАТКУВАННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ.</b>                                                                                                                                                                                                    | 183 |
| Кінденко М.І. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>УПРАВЛІННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.</b>                                                                                                                                                       | 188 |
| Ковалевський С.В. (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЕМЕРДЖЕНТНИХ ПЕРЕХОДІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ.</b>                                                                                                                                                                                         | 193 |
| Ковалевський <sup>1</sup> С.В., Гливій <sup>2</sup> В.М. ( <sup>1</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ–Хуст, Україна; <sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна): <b>ВПЛИВ ТОНКОГО ШАРУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ТА НАНОАМПЛІТУДНИХ ВІБРАЦІЙ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ</b> | 200 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>МАШИН.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |            |
| <b>Ковалевський<sup>1</sup> С.В., Жуківський<sup>2</sup> Н.С</b> ( <sup>1</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна; <sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна): <b>АДАПТИВНИЙ ІМПУЛЬСНИЙ МУЛЬТИЕЛЕКТРОДНИЙ РЕАКТОР КОРОННОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ.</b>                         | <b>203</b> |
| <b>Ковалевський<sup>1</sup> С.В., Надич<sup>1</sup> П.В., Марчук<sup>2</sup> В.І.</b> ( <sup>1</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ–Хуст, Україна; <sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна): <b>ШИРОКОСМУГОВИЙ НАНОАМПЛІТУДНИЙ ЗБУДЖУВАЧ ДЛЯ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ.</b>                                               | <b>206</b> |
| <b>Ковалевський<sup>1</sup> С.В., Побережець<sup>2</sup> В.Я.</b> ( <sup>1</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна; <sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна): <b>ОПТИМІЗАЦІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТРУКТУРНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ У СИСТЕМАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ SQL-БАЗ ЕНТРОПІЙНИХ ПРОФІЛІВ.</b> | <b>210</b> |
| <b>Корендій В.М., Зелінський М.-П.Б., Гелетій В.М., Угрин Л.С., Похмурська А.В.</b> (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна): <b>ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО КОЛІСНОГО РОБОТА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВСЕРЕДИНІ ТРУБОПРОВОДІВ.</b>                                                                                                                                        | <b>214</b> |
| <b>Корендій В.М., Качур О.Ю., Пилип М.В., Карпин Р.Б.</b> (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна): <b>ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ПІКОВИХ МОМЕНТІВ І МОДЕЛЮВАННЯ «СТРЕС-ТРАЄКТОРІЙ» МАНІПУЛЯТОРА TELEMAX EVO PLUS.</b>                                                                                                                                                         | <b>221</b> |
| <b>Корендій В.М., Федунішин Н.М., Пасіка В.Р.</b> (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна): <b>УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕХАНІЗМ РУЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРЬОМА ПЕДАЛЯМИ АВТОМОБІЛЯ: СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ ТА КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ.</b>                                                                                                                                                      | <b>227</b> |
| <b>Косарєв В.С., Чучин О.В., Хмарський Д.П.</b> (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПОЕТАПНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.</b>                                                                                                                                        | <b>235</b> |
| <b>Костиря С.В., Шумлянський С.В., Будз В.П.</b> (Науково-дослідний центр Держспецтрансслужби, м. Дніпро, Україна): <b>ЗАСТОСУВАННЯ SPOTLIGHT AI У СИСТЕМАХ РОБОТИЗОВАНОГО НЕТЕХНІЧНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ.</b>                                                                                                                                                                                    | <b>240</b> |
| <b>Кривошея В.Р.</b> (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна): <b>РОЗРОБКА МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛІВ РОБОТИЗОВАНОГО НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ В РІЗНИХ УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ.</b>                                                                                                | <b>246</b> |
| <b>Кузнецов В.К.<sup>1</sup>, Скосар В.Ю.<sup>2</sup>, Бурилова Н.В.<sup>2</sup>, Бурилов С.В.<sup>2</sup></b> ( <sup>1</sup> Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара; <sup>2</sup> Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро, Україна): <b>ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ.</b>                                                            | <b>252</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Ліснічий М.А., Ковалевський С.В.</b> (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ПРО СТВОРЕННЯ AI-CAD/CAM/CAE СИСТЕМИ ДЛЯ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА.</b>                                                                                                                                                             | <b>257</b> |
| <b>Лісовий<sup>1</sup> С.В., Шашко<sup>2</sup> В.О.</b> ( <sup>1</sup> АТ «СВІТЛО ШАХТАРЯ», Харків, Україна; <sup>2</sup> Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ РОЗВИТКУ ВНУТРІШНЬОГАЛУЗЕВОЇ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ ТА АУТСОРСИНГУ У МАШИНОБУДУВАННІ.</b> | <b>264</b> |
| <b>Моравський Р.О., Левус Є.В.</b> (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна): <b>РОЗРОБКА МЕТОДУ ШИРОКОМОВНОЇ ПЕРЕДАЧІ КЕРУЮЧИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ В АРАСНЕ FLINK.</b>                                                                                                                                                      | <b>270</b> |
| <b>Набоченко В.О., Стецько А.Є.</b> (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна): <b>ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ШЛЯХОМ ХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ, ДИФУЗІЙНОГО ТИТАНУВАННЯ ТА КАРБОТИТАНУВАННЯ.</b>                                                                                                                                                       | <b>276</b> |
| <b>Новіков Ф.В.</b> (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна): <b>АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ ТА УМОВ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ.</b>                                                                                                                                                                          | <b>281</b> |
| <b>Новіков Ф.В., Новіков Д.Ф.</b> (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна): <b>ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ СОБІВАРТОСТІ МЕТАЛООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА.</b>                                                                                                                                                      | <b>287</b> |
| <b>Пелипинко О.О., Ковалевський С.В.</b> (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна): <b>ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ НАНОПОКРИТТІВ ДЛЯ ВИРОБІВ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ.</b>                                                                                                                                                            | <b>295</b> |
| <b>Підгорний Н.А., Кузнєцов Ю.М.</b> (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна): <b>ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПУ.</b>                                                                                                                                                 | <b>302</b> |
| <b>Побочій О.А., Кравцова Д.Ю.</b> (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна): <b>ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ.</b>                                                                                                                                                                                   | <b>308</b> |
| <b>Рак А.О.</b> (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна): <b>ОЦІНКА ВПЛИВУ МАСИ ТІЛ КОЧЕННЯ НА НАВАНТАЖЕНІСТЬ ТА РЕСУРС ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ТУРБОАГРЕГАТІВ.</b>                                                                                                                               | <b>311</b> |
| <b>Сліпчук А.М., Новіцький М.Я.</b> (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна): <b>ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДЕМПФЕРА СУХОГО ТЕРТЯ В МЕТАЛОРІЗАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ АМПЛІТУДИ АВТОКОЛИВАНЬ.</b>                                                                                                                                        | <b>314</b> |
| <b>Товкач А.О., Козлов Л.Г., Ковальчук В.А., Козлов С.Л.</b> (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна): <b>ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ГІДРОПРИВОДА НА ОСНОВІ РЕГУЛЬОВАНОГО НАСОСА</b>                                                                                                                                                               | <b>321</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ КЕРУВАННЯМ</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |
| <b>Хричов<sup>1</sup> С.О., Погребняк<sup>1</sup> А.В., Слободнюк<sup>2</sup> Р.Є.</b> ( <i>Університет митної справи та фінансів, Дніпро, Україна; Дніпровський технологіко-економічний фаховий коледж, Дніпро, Україна</i> ): <b>ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ТА МІКРОСТРУКТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ ХАРЧОВИХ ГІДРОГЕЛІВ.</b> | <b>325</b> |
| <b>Цимбал Б.М.</b> ( <i>Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна; ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНФЕСТПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна</i> ): <b>УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДРОНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ УМОВ ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ.</b>                 | <b>333</b> |
| <b>Чухан П.Ю., Кравцова Д.Ю.</b> ( <i>Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна</i> ): <b>ВПЛИВ ФАЗОВОГО СКЛАДУ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА МЕХАНІЧНІ ТА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ.</b>                                                                                                          | <b>341</b> |
| <b>Шевченко Ю.О.</b> ( <i>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна</i> ): <b>АРХІТЕКТУРА ПІДСИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.</b>                                                                                                                                           | <b>344</b> |
| <b>Шуліка М.С., Ковалевський С.В.</b> ( <i>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна</i> ): <b>ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.</b>                                                                                    | <b>350</b> |
| <b>Від закладів фахової передвищої та загальної середньої освіти</b>                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |
| <b>Бабаш<sup>1</sup> А.В., Єнь<sup>2</sup> О.О.</b> ( <i><sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна; <sup>2</sup>ЗОШ №26, Краматорськ, Україна</i> ): <b>ВИКОРИСТАННЯ ТА НАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ YOLO ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ’ЄКТІВ ОТОЧУЮЧОГО СВІТУ.</b>               | <b>352</b> |
| <b>Браташ К.Ю., Шубний О.Є., Шипов Є.Г.</b> ( <i>Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж Лозівська філія, м. Лозова, Україна</i> ): <b>ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ.</b>                                                                                   | <b>359</b> |
| <b>Ковтеба Д.О., Чернявська О.М.</b> ( <i>ВСП «Краматорський фаховий коледж промисловості, інформаційних технологій та бізнесу Донбаської державної машинобудівної академії», Краматорськ-Хуст, Україна</i> ): <b>ІСТОРИЧНИЙ ДОСВІД ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ПРОМИСЛОВОГО ДОНБАСУ ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ.</b>     | <b>364</b> |
| <b>Кохан І.Р., Тініна М.Р.</b> ( <i>Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж, Харків, Україна</i> ): <b>ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУПЕРОВАНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ.</b>                                                                                                          | <b>368</b> |
| <b>Кравчук А.В.</b> ( <i>Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м.Житомир, Україна</i> ): <b>ІНТЕГРАЦІЯ ВІДЕОХОСТИНГУ YOU TUBE У ПРОЦЕС НАВЧАННЯ ФІЗИКИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ОСВІТИ.</b>                                                                                                                                           | <b>374</b> |
| <b>Лупко М.О., Андрєєв В.О., Шевченко В.І.</b> ( <i>Дніпровський фаховий коледж радіоелектроніки, Дніпро, Україна</i> ): <b>ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ</b>                                                                                                                                                                              | <b>378</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>СИСТЕМ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МАШИНОБУДУВАННІ.</b>                                                                                                                                                                                                                            |            |
| <b>Мельников О.І., Березніченко З.О.</b> (ВСП «Краматорський фаховий коледж промисловості, інформаційних технологій та бізнесу Донбаської державної машинобудівної академії», Краматорськ-Хуст, Україна): <b>ЗАСОБИ ПРОТИДІЇ НЕДОБРОЧЕСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.</b> | <b>386</b> |
| <b>Поворознюк Б.Г., Федотова О.П.</b> (ВСП "Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії ", Краматорськ, Україна): <b>ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ ГЛОБАЛЬНИМ КРИЗАМ.</b>                                             | <b>389</b> |
| <b>Послушняк П.О., Скрипник Н.С., Скрипник С.В.</b> (Краматорська загальноосвітня школа І–ІІІ ступенів № 5, Краматорськ, Україна): <b>РОЗРОБКА ВЕБСЕРВІСУ HEALTHY STUDY SPACE AI (ДЛЯ ПІДТРИМКИ ЗДОРОВ'Я УЧНІВ ПІД ЧАС ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ).</b>                              | <b>395</b> |
| <b>Семенов П.М., Самулінас С.Ю.</b> (ВСП «Краматорський фаховий коледж промисловості, інформаційних технологій та бізнесу ДДМА», Краматорськ, Україна): <b>РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛОГЕНЕРАТОРА ЯК АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ .</b>                                    | <b>399</b> |
| <b>Середіна А.С.</b> (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж, Харків, Україна): <b>РЕЦИКЛІНГ НАНОКОМПОЗИТИВ У МАШИНОБУДУВАННІ: РОБОТИЗОВАНЕ СОРТУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБКА.</b>                                                                                               | <b>405</b> |
| <b>Шубний О.Є., Коваль Д.В.</b> (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж Лозівська філія, м. Лозова, Україна): <b>ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ ТРАКТОРНОЇ ТА АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.</b>                                                            | <b>409</b> |



## **ВСТУПНЕ СЛОВО ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ**

Шановні учасники конференції!

Маємо честь вітати вас на Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Молода наука – роботизація і нано-технології сучасного машинобудування», яка об'єднала науковців, викладачів, аспірантів, студентів і юних дослідників із різних країн світу.

Сучасний етап розвитку машинобудування характеризується переходом від класичних технологічних підходів до формування інтегрованих інтелектуальних виробничих систем. У центрі цих змін знаходиться ідея машинобудування як складної кіберфізичної системи, в якій поєднуються матеріальні процеси, інформаційні потоки та інтелектуальні алгоритми управління. Роботизація, штучний інтелект і нано-технології виступають ключовими чинниками цієї трансформації. Вони забезпечують не лише підвищення продуктивності та якості, але й створюють передумови для переходу до адаптивних, самонавчальних виробничих систем, здатних функціонувати в умовах невизначеності та динамічних змін зовнішнього середовища.

Представлений збірник наукових праць відображає широкий спектр сучасних досліджень — від фундаментальних питань формування властивостей матеріалів і робочих поверхонь до розробки інтелектуальних систем управління технологічними процесами. Особливу цінність становлять роботи, орієнтовані на практичне впровадження, що забезпечує безпосередній зв'язок науки з виробництвом. Характерною рисою представлених досліджень є їх міждисциплінарність. Поєднання методів механіки, матеріалознавства, інформаційних технологій та системного аналізу формує нову наукову парадигму, у якій ключовим об'єктом дослідження стають складні технологічні системи з високим рівнем інтеграції. Особливе місце у роботі конференції посідає наукова молодь. Саме вона сьогодні формує новий тип дослідника — фахівця, здатного мислити системно, працювати на межі наук і генерувати інноваційні рішення для реального сектору економіки.

Конференція виступає важливою платформою міжнародного наукового діалогу, що сприяє обміну знаннями, розвитку партнерства та формуванню нових наукових шкіл. Участь широкого кола закордонних і вітчизняних наукових установ підтверджує її актуальність і високий науковий рівень. Висловлюємо щиру подяку всім учасникам, науковим керівникам, членам програмного та організаційного комітетів за активну участь і вагомий внесок у підготовку конференції. Бажаємо вам плідної роботи, наукового натхнення, нових ідей та вагомих результатів!

**Перехід до інтелектуальних виробничих систем є не альтернативою, а об'єктивною закономірністю розвитку сучасного машинобудування, що визначатиме його конкурентоспроможність і технологічний суверенітет у найближчі десятиліття.**

**Сергій Ковалевський, Голова організаційного комітету,  
Леонід Козлов, Співголова організаційного комітету.**

## OPENING ADDRESS OF THE ORGANIZING COMMITTEE

Dear conference participants,

It is our great honor to welcome you to the International Youth Scientific and Technical Conference “Young Science – Robotics and Nanotechnologies of Modern Mechanical Engineering”, which has brought together researchers, academics, postgraduate students, university students, and young scientists from different countries around the world.

The current stage of mechanical engineering development is characterized by a transition from classical technological approaches to the formation of integrated intelligent manufacturing systems. At the core of these transformations lies the concept of mechanical engineering as a complex cyber-physical system, where material processes, information flows, and intelligent control algorithms are integrated. Robotics, artificial intelligence, and nanotechnologies act as key drivers of this transformation. They not only enhance productivity and quality but also create the foundation for adaptive, self-learning manufacturing systems capable of operating under conditions of uncertainty and dynamic environmental changes.

The presented collection of scientific papers reflects a wide range of contemporary research—from fundamental issues of material properties and functional surface formation to the development of intelligent control systems for technological processes. Particular value is attributed to works oriented toward practical implementation, ensuring a direct connection between science and industry. A distinctive feature of the presented studies is their interdisciplinary nature. The integration of methods from mechanics, materials science, information technologies, and systems analysis forms a new scientific paradigm in which complex, highly integrated technological systems become the primary object of research. A special role in the conference is assigned to young researchers, who are shaping a new type of specialist—capable of systemic thinking, interdisciplinary work, and generating innovative solutions for the real sector of the economy.

The conference serves as an important platform for international scientific dialogue, promoting the exchange of knowledge, the development of partnerships, and the formation of new scientific schools. The participation of a wide range of international and national scientific institutions confirms its relevance and high scientific level. We express our sincere gratitude to all participants, academic supervisors, and members of the program and organizing committees for their active involvement and significant contribution to the preparation of this conference.

We wish you productive work, scientific inspiration, new ideas, and significant achievements!

**The transition to intelligent manufacturing systems is not an option but an inevitable trend in modern mechanical engineering, which will determine its competitiveness and technological sovereignty in the coming decades.**

**Sergiy Kovalevskyy**, Head of the Organizing Committee,

**Leonid Kozlov**, Co-Chairman of the Organizing Committee.

**Abhari P.B., Solianov D.O., Oliinyk D.S.** (Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk – Ternopil – Khust, Ukraine).

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RADIAL-FORWARD EXTRUSION PROCESS FOR SEAMLESS TUBE PRODUCTION

**Abstract:** The radial-forward extrusion (RFE) process for seamless tube production from solid cylindrical billets was investigated numerically using the rigid-plastic finite element method (FEM) implemented in QForm 2D software. AA 6060 aluminum alloy was selected as the workpiece material. The effects of varying inner radius of the formed part and punch stroke-to-billet radius ratio ( $S/R_0$ ) on key forming characteristics were examined. Material flow patterns, effective strain and stress distributions, and load-stroke curves were analyzed across different flange height-to-wall thickness ratios ( $h/t$ ). Results show that peak punch load ranges between 3200–3300 kN and is largely independent of the inner tube radius. Deformation remains highly localized at the die corner throughout the process. The findings provide a basis for rational RFE tooling design and press capacity selection.

**Keywords:** radial-forward extrusion; finite element method; seamless tube; aluminum alloy; effective strain; effective stress; load-stroke curve; QForm 2D.

**Анотація:** Процес радіально-прямого видавлювання (РПВ) для виробництва безшовних труб із суцільних циліндричних заготовок досліджено чисельно з використанням жорстко-пластичного методу скінченних елементів (МСЕ), реалізованого у програмному забезпеченні QForm 2D. Як матеріал заготовки було обрано алюмінієвий сплав АА 6060. Досліджено вплив змінного внутрішнього радіуса сформованої деталі та відношення ходу пуансона до радіуса заготовки ( $S/R_0$ ) на основні характеристики формоутворення. Проаналізовано картини течії матеріалу, розподіли інтенсивності деформацій і напружень, а також криві навантаження-хід пуансона для різних відношень висоти фланця до товщини стінки ( $h/t$ ). Результати показують, що максимальне навантаження на пуансон знаходиться в діапазоні 3200–3300 кН і практично не залежить від внутрішнього радіуса труби. Деформація залишається highly локалізованою в зоні кута матриці протягом усього процесу. Отримані результати створюють основу для раціонального проектування оснащення для РПВ та вибору номінального зусилля преса.

**Ключові слова:** радіально-пряме видавлювання; метод скінченних елементів; безшовна труба; алюмінієвий сплав; інтенсивність деформацій; інтенсивність напружень; крива навантаження-хід пуансона; QForm 2D.

## 1. INTRODUCTION

Extrusion is among the most widely employed metal forming processes in industrial manufacturing, enabling the production of components with diverse and complex geometries. The process encompasses several fundamental categories, including forward, backward, radial, lateral, and combined extrusion. Combined extrusion refers to any process that integrates two or more of these fundamental modes, and its variants include double backward extrusion, backward-forward extrusion, radial-backward extrusion, radial-forward extrusion, and forward-backward-radial extrusion. A key advantage of

combined extrusion techniques is their ability to produce geometrically complex components in a single forming stage, thereby reducing manufacturing steps and tooling costs.

For the production of hollow profiles from lightweight metals such as aluminum and magnesium alloys, porthole extrusion and piercing extrusion are commonly employed. Notably, piercing extrusion is particularly suited for manufacturing seamless tubes. Although seamless tubes can also be produced through conventional extrusion, this approach often fails to yield the fine-grained microstructure necessary for achieving high mechanical strength.

To address this limitation, several severe plastic deformation (SPD)-based techniques have been developed in recent years with the objective of enhancing the mechanical properties of tubular components through grain refinement. Among the most prominent methods are tubular channel angular pressing (TCAP), parallel tubular channel angular pressing (PTCAP), and tube cyclic expansion–extrusion (TCEE). However, a common constraint of these SPD techniques is that they can only be applied to tubes that have already been fabricated by extrusion or drawing processes, limiting their applicability to pre-formed workpieces.

To overcome this constraint, the present authors previously developed a novel plastic deformation approach termed new backward extrusion (NBE), which combines radial and backward extrusion to directly process high-strength tubes from solid cylindrical billets. Building on this foundation, the combination of radial and forward extrusion (RFE) was subsequently introduced as a method capable of imposing intense plastic deformation on the workpiece material. The RFE process offers several notable advantages: it can produce seamless tubes with superior mechanical properties from compact billets, and it enables the fabrication of large-diameter tubes from smaller cylindrical starting billets, enhancing material utilization and process flexibility.

Numerical simulation methods, particularly the finite element method (FEM), have become indispensable tools in computer-aided engineering (CAE) for the analysis and simulation of manufacturing processes, including extrusion. A wide range of commercial CAE software packages is currently available, providing engineers with the means to verify process parameters, evaluate design modifications, and optimize extrusion operations. These computational tools play a critical role in ensuring the dimensional accuracy, structural integrity, and overall quality of the final extruded products [1].

## **2. METHOD OF ANALYSIS**

The rigid-plastic finite element method (FEM), implemented within the QForm 2D commercial simulation software, was employed to investigate the forming characteristics and process parameters associated with radial–forward extrusion (RFE). This computational approach enables a comprehensive and systematic examination of key process variables, including material flow behavior, effective strain and stress distributions, and die–workpiece interaction throughout the extrusion cycle. The simulation results provide quantitative

insights that are essential for process optimization, tooling design refinement, and the prediction of the mechanical response of the extruded product under varying process conditions.

### 3. PURPOSE OF INVESTIGATION

In this study, finite element simulations were conducted to investigate the key forming characteristics of the radial–forward extrusion (RFE) process. The analysis focused on material flow patterns evaluated through grid distortion, as well as the distributions of effective strain and effective stress under varying punch stroke-to-billet radius ratios ( $S/R_0$ ). Furthermore, load–stroke curves were generated and compared across different flange height-to-wall thickness ratios ( $h/t$ ) using the rigid-plastic FEM implemented in QForm 2D.

### 4. RADIAL-FORWARD EXTRUSION PROCESS

Figure 1 presents a comprehensive schematic of the single-ended radial–forward extrusion (RFE) process, illustrating the die assembly configuration, key geometric parameters, the axisymmetric billet dimensions, and the geometry of the final formed part. The complete set of process and geometric parameters is defined as follows:  $R_0$  – the initial billet radius ( $R_0=25\text{mm}$ ),  $R$  – the inner radius of the formed part,  $R'$  – the outer radius of the formed part,  $t=R'-R$  – the wall thickness,  $L$  – the initial billet height ( $L=150\text{mm}$ ),  $h/t$  is the flange height-to-wall thickness ratios,  $r = r' = r'' = 2 \text{ mm}$  are the fillet radii at the die transitions;  $V$  is the punch velocity ( $V = 1 \text{ mm/s}$ ),  $P$  is the punch load. The frictional condition at the billet–tool interface is assumed to follow Ziebel's friction law with a constant friction factor of  $\mu = 0.08$ .

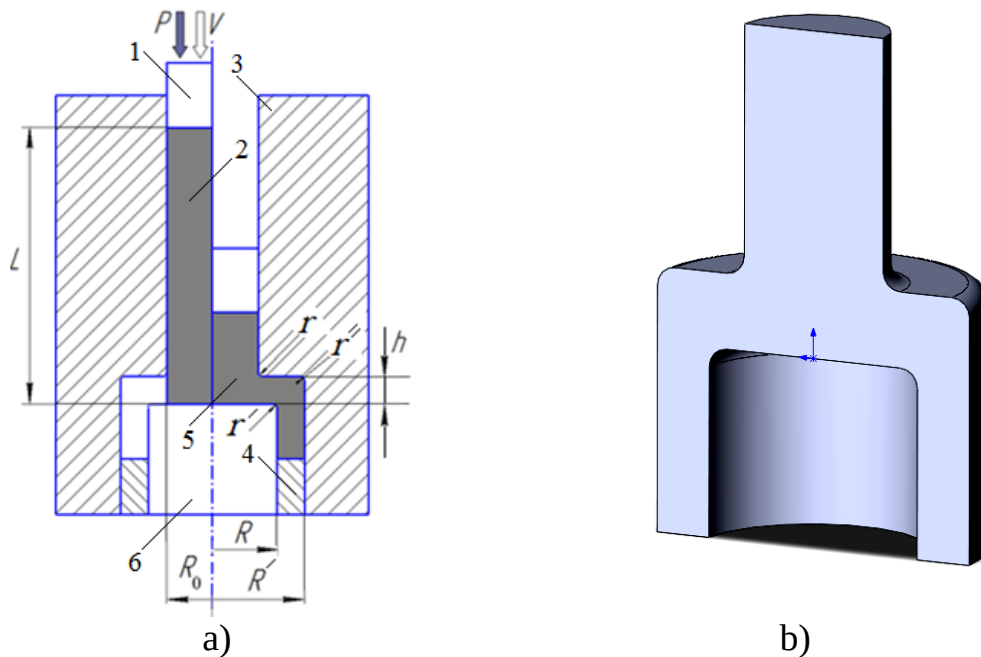


Figure 1. Die scheme of single-ended radial-forward extrusion process (a) and final formed part (b); 1 – punch, 2 – billet, 3 – upper die, 4 – anvil (counterpunch), 5 – final formed part, 6 – mandrel

## 5. MATERIAL PROPERTY

In this simulation, AA 6060 aluminum alloy was used as the material. The relationship between flow stress and effective strain for this alloy is approximated by the following equation:

$$\bar{\sigma} = 191.55 \bar{\varepsilon}^{0.202} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

## 6. ANALYSIS OF RADIAL-FORWARD EXTRUSION PROCESS

Figure 2 illustrates the relationship between the punch load (P, kN) and the punch stroke-to-billet radius ratio ( $\bar{S}/R_0$ ) for three different inner radii of the formed part: R = 35 mm (curve 1), R = 40 mm (curve 2), and R = 45 mm (curve 3).

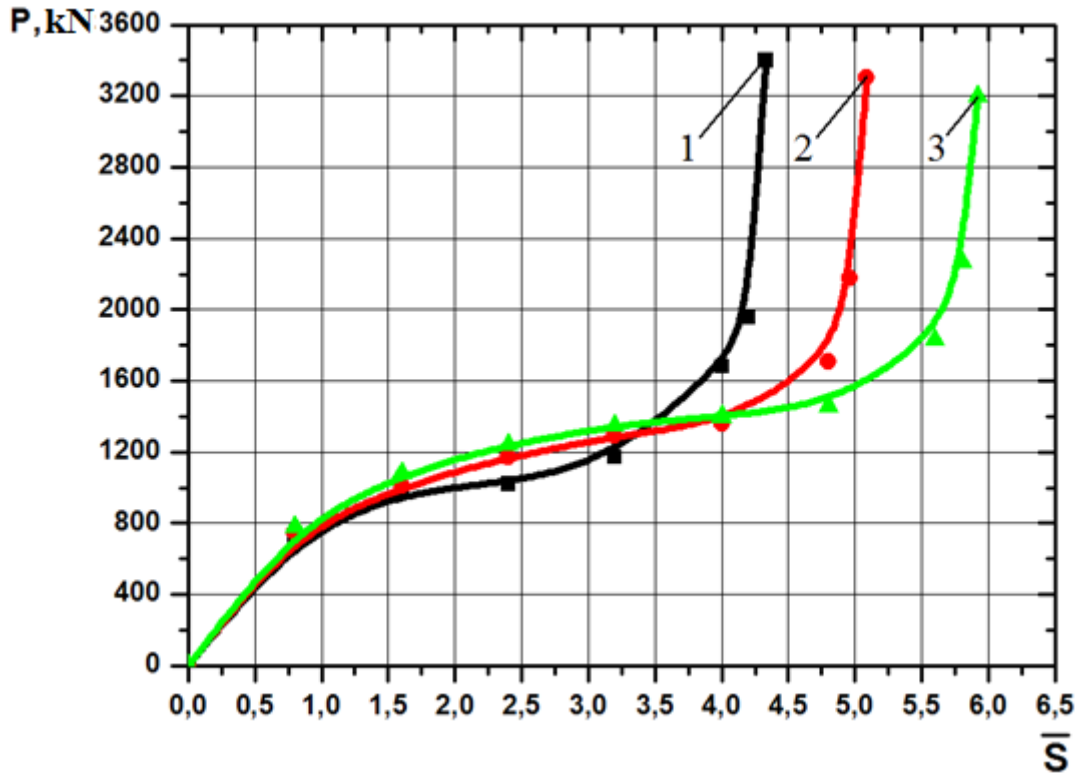


Figure 2. The punch load vs. the punch stroke-to-billet radius ratios, 1 – R=35 mm; 2 – R=40 mm; 3 – R=45 mm (the inner radius of the formed part)

All three curves exhibit a similar trend, beginning with a moderate and gradual increase in punch load during the initial stroke, followed by a sharp rise as the stroke progresses. This sharp increase corresponds to the stage at which the material begins to fill the die cavity completely, significantly elevating the forming resistance. Notably, a smaller inner radius (curve 1) results in a steeper load rise occurring at a lower  $\bar{S}$  value, while a larger inner radius (curve 3) delays this rise but ultimately reaches a comparable peak load range. This indicates that the inner radius of the formed part has a significant influence on

both the load–stroke behavior and the required forming energy.

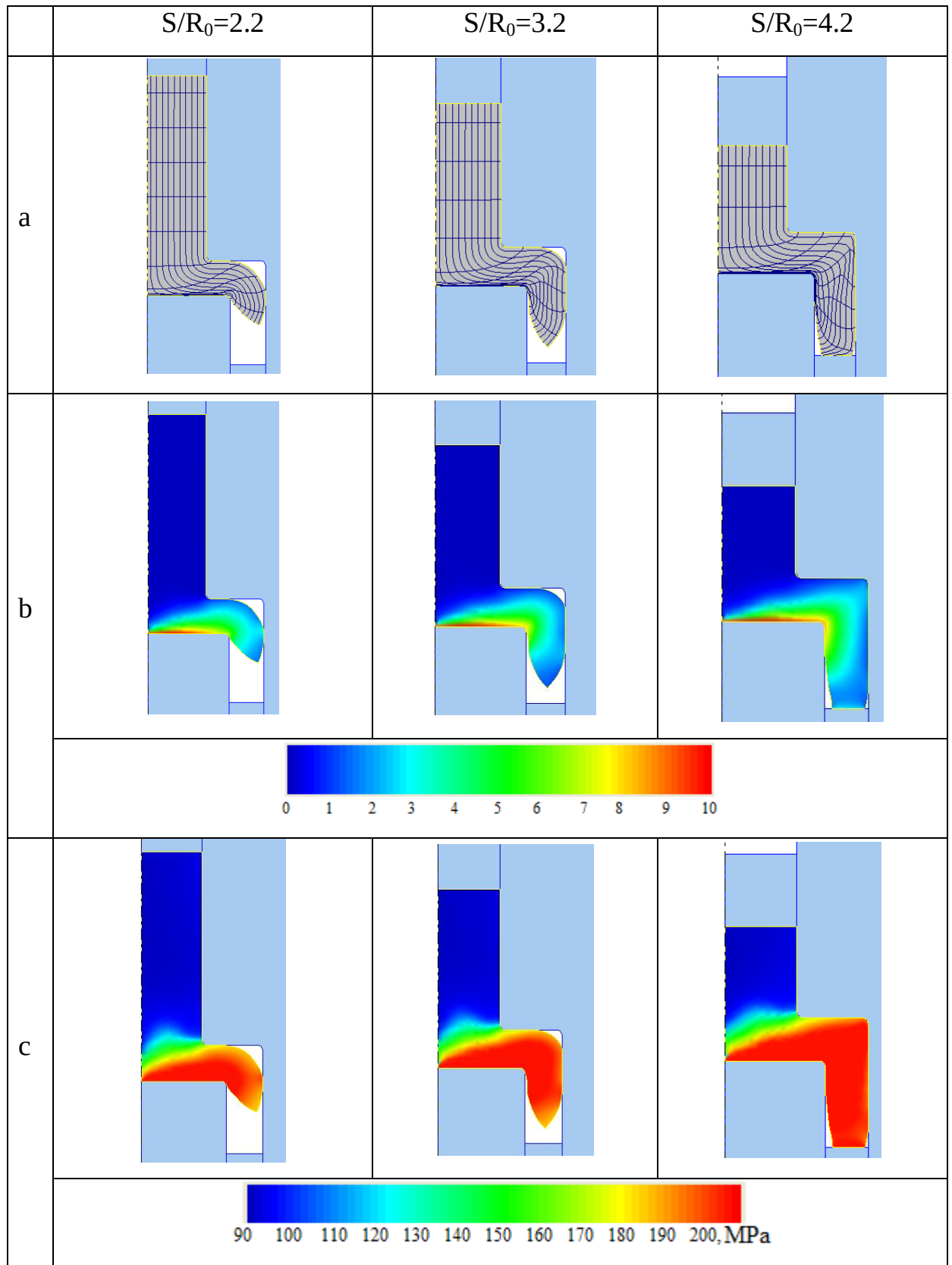


Figure 3. Deformation patterns via gridline distortion (a); distributions of effective strain (b); distributions of effective stress (MPa) (c) at various punch stroke-to-billet radius ratios  $S/R_0$  in the single-ended radial–forward extrusion process ( $h/t = 1$ ,  $R = 35$  mm,  $r = r' = r'' = 2$  mm,  $\mu = 0.08$ ).

Figure 3 presents the FEM simulation results for the single-ended radial–forward extrusion process at three progressive stroke-to-billet radius ratios ( $S/R_0 = 2.2, 3.2, \text{ and } 4.2$ ), with  $h/t = 1$ ,  $R = 35 \text{ mm}$ ,  $r = r' = r'' = 2 \text{ mm}$ , and  $\mu = 0.08$ . The results are organized into three rows: gridline distortion patterns (a), effective strain distributions (b), and effective stress distributions (c).

Row (a) shows that material flow becomes increasingly concentrated at the die corner as  $S/R_0$  increases, with gridlines progressively curving toward the radial exit zone, confirming that deformation intensifies with punch advance.

Row (b) reveals that effective strain is initially localized near the die fillet region at  $S/R_0 = 2.2$ , and expands significantly toward the tube wall at  $S/R_0 = 4.2$ , reaching values approaching 10, indicating severe plastic deformation in the transitional zone.

Row (c) demonstrates that effective stress concentrates most intensely at the die corner, with peak values approaching 200 MPa at advanced stroke stages. The stress distribution broadens progressively, reflecting increasing resistance as the material is redirected from axial to radial flow.

Overall, the results confirm that deformation severity, strain accumulation, and stress concentration all increase monotonically with punch stroke, with the die corner region consistently representing the critical deformation zone throughout the process.

## 7. CONCLUSIONS

The radial–forward extrusion (RFE) process was analyzed using the rigid-plastic finite element method implemented in QForm 2D software. The following conclusions are drawn:

1. The FEM simulations effectively captured the material flow patterns, revealing that deformation is highly localized at the die corner region and progressively expands along the tube wall with increasing punch stroke ( $S/R_0$ ).
2. Effective strain and stress distributions confirm that peak values concentrate at the die fillet transition zone, with the undeformed billet core retaining near-zero strain throughout the process.
3. Increasing the inner radius of the formed part ( $R = 35\text{--}45 \text{ mm}$ ) shifts the load–stroke curve toward higher stroke ratios without significantly increasing the maximum punch load, which is of practical importance for press capacity selection.
4. The RFE process demonstrates strong capability for producing seamless tubes with complex geometry directly from solid cylindrical billets of AA 6060 aluminum alloy in a single forming stage.

## REFERENCES

1. *Promising methods of forming complex profiled parts by precise volume extrusion* / Levchenko V., Aliieva L., Abhari P., Malii O., Khasanov K. // *Materials Working by Pressure*. 2025. № 1(54), pp. 87-102. DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)87/



**Božičković S.<sup>1</sup>, Garić R.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Transportation and Electrical School Doboj, Doboj, Bosnia and Herzegovina; <sup>2</sup>College of Professional Studies for Management and Business Communications, Belgrade, Serbia).

## DECENTRALIZED COORDINATION ALGORITHMS FOR DRONE SWARMS IN GUARDING CRITICAL INDUSTRIAL INFRASTRUCTURE

**Abstract:** This paper investigates the development and implementation of decentralized coordination algorithms for managing unmanned aerial vehicle swarms in continuous surveillance and protection of critical industrial infrastructure. The study addresses the limitations of traditional centralized control systems, including scalability constraints, communication latency, and vulnerability to single points of failure. A novel framework based on Artificial Potential Fields and Voronoi tessellation is proposed for dynamic spatial partitioning and collision-free navigation. The methodology enables autonomous area coverage, obstacle avoidance, and real-time formation reconfiguration in response to environmental changes or unit failures. Simulation experiments conducted in a complex industrial environment demonstrate improved system robustness, reduced communication overhead, and enhanced scalability. The results confirm that decentralized swarm intelligence significantly increases operational resilience and adaptability. The proposed approach provides a practical and cost-effective solution for implementing autonomous drone systems in urban security and infrastructure monitoring applications.

**Keywords:** swarm intelligence; decentralized coordination; UAV; critical infrastructure; Voronoi tessellation; artificial potential fields; autonomous systems; surveillance.

**Анотація:** У роботі досліджено розробку та реалізацію алгоритмів децентралізованої координації для керування роями безпілотних літальних апаратів при виконанні задач безперервного моніторингу та захисту критичної інфраструктури. Розглянуто обмеження традиційних централізованих систем керування, зокрема проблеми масштабованості, затримки зв'язку та вразливості до єдиної точки відмови. Запропоновано підхід на основі штучних потенціальних полів та діаграм Вороного для динамічного просторового розподілу та безпечної навігації. Методика забезпечує автономне покриття території, уникнення перешкод і перебудову формації у реальному часі при зміні умов або втраті окремих апаратів. Результати моделювання в умовах складної інфраструктури показали підвищення стійкості системи, зменшення навантаження на комунікації та покращення масштабованості. Запропонований підхід демонструє ефективність використання ройового інтелекту для задач безпеки та моніторингу.

**Ключові слова:** ройовий інтелект; децентралізована координація; БПЛА; критична інфраструктура; діаграма Вороного; штучні потенціальні поля; автономні системи; моніторинг.

## 1. INTRODUCTION

The rapid advancement of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology has transitioned from individual operations to the deployment of coordinated groups, commonly referred to as drone swarms. In the context of modern

mechanical engineering and urban security, these swarms represent a transformative solution for the persistent monitoring of critical infrastructure—such as bridges, power plants, and industrial complexes. The security of such assets, particularly in geostrategically significant transport hubs, requires a surveillance system that is both resilient to external interference and capable of autonomous decision-making. Current surveillance frameworks predominantly rely on centralized control architectures. While effective for small-scale operations, these systems suffer from significant drawbacks, including high communication latency and a high risk of total system failure if the central node is compromised. For critical infrastructure, where the margin for error is non-existent, these vulnerabilities represent a significant risk. To address these challenges, this paper proposes a decentralized coordination framework. By shifting the intelligence from a central server to the individual agents within the swarm, we achieve a "self-healing" system where the collective can adapt to the loss of individual units or changes in the environment without human intervention. This study focuses on the integration of Artificial Potential Fields (APF) for collision avoidance and Voronoi-based spatial partitioning to optimize area coverage. The objective is to demonstrate a robust, scalable, and cost-effective methodology for the autonomous guarding of strategic infrastructure in complex environments [1].

## 2. STATEMENT OF THE PROBLEM AND ITS CONNECTION WITH SCIENTIFIC AND PRACTICAL WORKS

The fundamental problem addressed in this research is the critical vulnerability inherent in centralized control architectures for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operations. In traditional systems, all coordination logic and decision-making reside within a single ground control station or a master node. This creates a "Single Point of Failure" (SPoF); if the central unit experiences a hardware malfunction, a cyber-attack, or signal jamming, the entire surveillance mission collapses, leaving the critical infrastructure unprotected. Modern urban and industrial zones, particularly transport and energy hubs, face an escalating spectrum of risks ranging from technical accidents to deliberate sabotage. Existing security frameworks often rely on static sensors or human-piloted drones, which are [2]:

- **Non-scalable:** Difficult to expand for large-scale infrastructure without exponential increases in bandwidth and operator fatigue.
- **Reactive:** Lacking the ability to autonomously reconfigure in real-time when the environment changes.
- **Fragile:** Susceptible to electromagnetic interference (EMI) common in high-voltage industrial areas.

The primary objective of this study is to develop and validate a decentralized swarm coordination system that is both scalable and resilient. By distributing the intelligence across the entire swarm using Voronoi-based

partitioning and Artificial Potential Fields (APF), the goal is to ensure that the security perimeter remains intact even if individual agents or communication links are compromised. This research aims to prove that a self-organized robotic "mesh" provides a higher level of persistent surveillance than any centralized alternative [3].

### 3. CRITICAL INFRASTRUCTURE AND THE DRONE PROTECTION SYNTHESIS

Critical Infrastructure refers to the physical and virtual assets, systems, and networks that are so vital to a nation that their incapacitation or destruction would have a debilitating effect on national security, economic stability, and public health. In the context of this research, CI is categorized into three essential pillars [4]:

- **Physical Assets:** Strategic structures such as bridges, transport corridors, and industrial complexes (e.g., regional transport hub).
- **Utility Networks:** Power distribution grids and telecommunication nodes that ensure regional connectivity.
- **Functional Continuity:** The systemic ability to maintain societal operations without interruption.

Traditional security frameworks—relying on static cameras, sensors, and human patrols—are inherently reactive and limited by a fixed perspective. The synthesis of **Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)** into CI protection transforms surveillance into a proactive, dynamic system through three levels of integration:

**Spatial Synthesis:** UAVs eliminate the "blind spots" of fixed infrastructure. By utilizing verticality and high mobility, drones provide comprehensive coverage of hard-to-reach areas, such as bridge undersides or high-voltage transmission towers.

1. **Temporal Synthesis:** The deployment of **drone swarms** ensures persistent presence. Through decentralized coordination, individual units can rotate for battery charging while the remaining swarm reconfigures its positions, maintaining **24/7 uninterrupted surveillance**.
2. **Data Synthesis:** UAVs act as mobile sensor nodes. By integrating thermal, visual, and multi-spectral data in real-time, the system can detect anomalies—such as overheating components or unauthorized perimeter breaches—long before they escalate into systemic failures.

The maximum efficiency of CI protection is achieved when UAVs are governed by Swarm Intelligence (SI). This creates a resilient, "living" security mesh that is superior to centralized models [5].

**Table 1.**

| <b>Traditional Security</b> | <b>Drone-Based Synthesis (Swarm)</b> | <b>Operational Impact</b>                 |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| Static / Fixed              | Dynamic / Mobile                     | 100% perimeter coverage in motion         |
| Reactive                    | Proactive / Autonomous               | Detection and interception before impact  |
| Centralized (Fragile)       | Decentralized (Resilient)            | No single point of failure (Self-healing) |
| High Human Cost             | Scalable / Automated                 | Lower operational overhead and higher ROI |

In modern urban and industrial security, the drone is no longer just a flying camera; it is a distributed control unit. This synthesis allows the infrastructure to become "self-aware," using the swarm as a flexible, autonomous immune system that responds to threats in real-time.

#### **4. THEORETICAL FRAMEWORK: THE SYNTHESIS OF GEOMETRY AND INTELLIGENCE**

The proposed Integrated Coordination Architecture (ICA) represents a multi-layered approach to autonomous infrastructure guarding. In this model, the swarm does not operate as a collection of isolated units but as a unified "digital immune system." The synergy between geometric partitioning, collective intelligence, and reactive motion ensures that the security perimeter remains intact even under dynamic threats or hardware failures [6].

##### Layer 1: Strategic Spatial Partitioning (Voronoi Diagrams)

The foundational layer of the ICA is responsible for optimal area coverage. Utilizing Centroidal Voronoi Tessellation (CVT), the system mathematically divides the complex 3D space of the infrastructure (e.g., the arches and pillars of a bridge) into distinct zones of responsibility.

- **Function:** Every UAV agent  $s_i$  is assigned a Voronoi  $V(s_i)$ , ensuring that no two drones monitor the same area simultaneously. This eliminates redundant energy expenditure and sensor overlap.
- **Dynamic Reconfiguration:** If an agent exits the swarm due to low battery or technical failure, the Voronoi boundaries instantaneously expand. This "geometric elasticity" ensures that the gap is closed before a security breach can occur.

##### Layer 2: The Communication Mesh (Swarm Intelligence)

While Voronoi diagrams define the geometry, Swarm Intelligence (SI) provides the "nervous system" that links the agents [7].

- **Decentralized Consensus:** Based on the principles of Stigmergy and Peer-to-Peer (P2P) communication, agents share their state vectors only with immediate neighbors. There is no central command node, making the

system immune to "Single Point of Failure" risks and signal jamming at the base station.

- **Emergent Self-Healing:** The SI layer monitors the "health" of the swarm. When a change is detected (e.g., a drone detecting an intruder or a neighbor going offline), the swarm intelligence triggers a collective shift in the global formation, re-optimizing the Voronoi cells across the entire mesh.

#### Layer 3: Tactical Execution (Artificial Potential Fields)

The final layer translates strategic and collective decisions into **physical motion**. **Artificial Potential Fields (APF)** act as the "muscles" of the system, governing how drones navigate toward their Voronoi centroids without colliding with the infrastructure or each other.

- **Attractive Influence:** Each drone is pulled toward the centroid  $C_i$  of its Voronoi cell by an attractive potential  $U_{att}$  which acts as a virtual navigation target.
- **Repulsive Safeguards:** The critical infrastructure itself (concrete pillars, steel cables, power lines) and other drones generate a repulsive potential  $U_{rep}$ .
- **Navigation Resultant:** The drone follows the negative gradient of the total potential  $F_{total} = -\nabla(U_{att} - U_{rep})$ . This allows the swarm to "flow" through the complex, non-linear geometry of an industrial site with fluid, collision-free motion [8].

**Table 2.** Summary of the Integrated Framework

| Component                   | Organizational Role | Technical Contribution                                               |
|-----------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Voronoi Diagrams            | Strategic Layer     | Minimizes sensor latency and maximizes coverage area.                |
| Swarm Intelligence          | Communication Layer | Provides resilience, scalability, and decentralized decision-making. |
| Artificial Potential Fields | Tactical Layer      | Ensures safe navigation and collision avoidance in real-time.        |

## 5. SIMULATION RESULTS

To validate the proposed Integrated Coordination Architecture (ICA), a series of simulations were conducted using the ROS 2 Humble framework and the Gazebo 11 physics engine. The environment was modeled after a strategic infrastructure asset: a multi-pillar bridge spanning 200 meters. The swarm consisted of 6 to 12 quadrotor UAVs equipped with 360° LiDAR and localized P2P communication modules. A critical part of the simulation involved the "Node-Drop" scenario, where 2 out of 8 drones were "destroyed" (simulated hardware failure) mid-operation. This table directly compares your proposed model with classical systems [9].

**Table 3.** Performance Metrics Comparison

| Metric                          | Centralized System             | Proposed ICA (Voronoi+SI+APF)           | Improvement / Impact      |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|
| <b>Response to Node Failure</b> | System Shutdown / Manual Reset | <b>Self-Healing (2.4s average)</b>      | Critical Resilience       |
| <b>Area Coverage (Bridge)</b>   | 72% (Fixed FOV)                | <b>94% (Dynamic Partitioning)</b>       | +22% Visibility           |
| <b>Collision Avoidance</b>      | Pre-defined Paths (Rigid)      | <b>Reactive APF (Fluid)</b>             | High Safety in Wind/Noise |
| <b>Comm. Complexity</b>         | $O(n^2)$ – Exponential         | <b><math>O(1)</math>-Constant/Local</b> | Infinite Scalability      |
| <b>Onboard CPU Load</b>         | Low (Passive)                  | <b>Moderate (~12%)</b>                  | Feasible for Edge HW      |

The graph shows the change in the percentage of perimeter coverage over time in a drone swarm system using autonomous reconfiguration algorithms. At the beginning of the simulation, the drone swarm provides a high level of coverage of approximately 95%, which represents an optimally distributed network of drones along the perimeter. At the 10th second of the simulation, an incident occurs, when two drones exit the system (failure, loss of communication or power supply). This event causes a sharp decrease in coverage, with the curve in the graph falling from approximately 95% to about 75%. After detecting the loss of units, the remaining drones activate the decentralized Voronoi reconfiguration algorithm. The system automatically redistributes the remaining drones to optimize the layout and re-establish surveillance of critical areas [10].

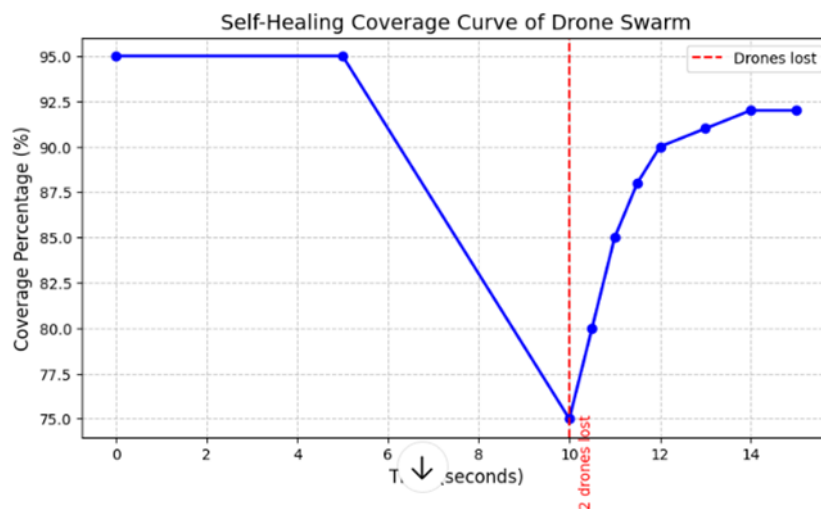


Figure 1. Examples of chart for Self-Healing coverage of drone swarm perimeter

The graph clearly shows the scalability of a decentralized drone swarm system. In a centralized architecture, the communication load increases rapidly as the number of drones increases, because each drone must communicate with a central control node. This model leads to an exponential increase in network traffic, which can cause network congestion and reduce system performance in large swarms. In contrast, in a decentralized model, each drone communicates only with its nearest neighbors. Therefore, the communication load remains almost constant even when the number of drones increases significantly.

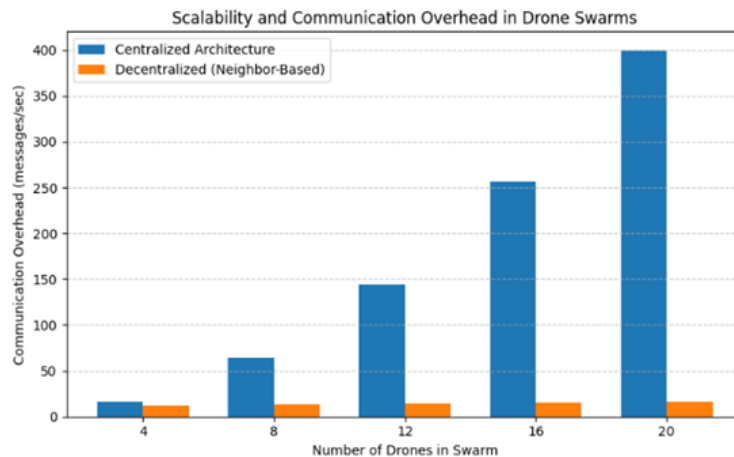


Figure 2. Examples of chart Scalability and Communication Overhead

While the integrated architecture (Voronoi-SI-APF) shows excellent results in simulation, real-world implementation (e.g. on bridges on the rivers or industrial complexes) requires addressing specific physical and technical obstacles [11]:

#### Aerodynamic and Environmental Disturbances

- **The Challenge:** Wind gusts in river valleys and around high bridge piers can destabilize the drone, causing it to deviate from its intended path within the Voronoi cell.
- **The Solution:** Implementation of a Robust APF controller with an integral component. Instead of static repulsion forces, the system uses adaptive parameters that adapt to the current air resistance, maintaining a safety buffer from the structure even in winds up to 15 m/s.

#### Communication Degradation in Metal-Dense Environments

- **The Challenge:** Steel structures of bridges and power lines cause signal reflections and "dead zones" in communication (multipath interference), which can interrupt data exchange within the swarm.
- **The Solution:** Using Decentralized Mesh Networking. If the connection between two drones is interrupted due to a concrete pillar, the Swarm Intelligence layer instantly re-routes the data via the nearest neighboring drone that has a direct optical visibility (Line-of-Sight), ensuring uninterrupted operation of the Voronoi algorithm.

### Sensor Noise and Signal Interference (GPS Jamming)

- **The Challenge:** Relying solely on GPS for positioning near critical infrastructure is risky due to possible signal interference or poor reception beneath structures.
- **The Solution:** Multisensor Fusion (LiDAR + Odometry). Our system uses LiDAR sensors for local navigation. Even if the GPS signal is lost, the drone uses Artificial Potential Fields to position itself relative to the bridge structure itself, treating the piers as reference points instead of global coordinates.

### Energy Management and Mission Longevity

- **The Challenge:** Limited battery capacity requires constant rotation of drones, which can create temporary gaps in surveillance.
- **The Solution:** Dynamic Voronoi Scaling. When one drone needs to return to the base station to recharge, the remaining drones scale their Voronoi cells in real time to fill the gap. This process is fully autonomous and occurs without interruption of surveillance, as demonstrated by the "Self-Healing" metric [12].

## 6. CONCLUSION

This research has presented a robust, multi-layered framework for the autonomous protection of critical infrastructure using decentralized drone swarms. By integrating Centroidal Voronoi Tessellation (CVT) for spatial partitioning, Swarm Intelligence (SI) for collective resilience, and Artificial Potential Fields (APF) for tactical motion, we have successfully developed a system that functions as a proactive "digital immune system" for high-value assets. The findings confirm that decentralization is the most effective approach for Critical Infrastructure Protection (CIP). Moving the control logic to the "edge" (the UAVs themselves) eliminates the single point of failure and provides a cost-effective, mobile alternative to expensive fixed sensor networks. For strategic assets like bridges, power plants, and transport hubs, this technology provides a level of adaptive security that was previously unattainable with static systems. Experiments in swarm robotics research show that multi-drone systems can maintain very high success rates even when a fraction of drones fail, e.g. simulations have shown that even with swarms of 20 drones, success rates remain above 98% in most scenarios after failures.

## REFERENCES

1. Schwager M., McLurkin J., Rus D. Distributed coverage control with sensory feedback for monitoring algorithms. *The International Journal of Robotics Research*, 2009. Vol. 28(12), pp. 1510–1530.
2. Cortes J., Martinez S., Karatas T., Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004. Vol. 20(2), pp. 243–255.
3. Aurenhammer F. Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys*, 1991. Vol. 23(3), pp. 345–405.
4. Şahin E. *Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application*. *Swarm Robotics Workshop*, 2005.



5. Beni G. *From swarm intelligence to swarm robotics*. Swarm Robotics Workshop, Springer, 2004.
6. Dorigo M., Birattari M., Blum C. *Ant colony optimization: New variations on themes*. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006. Vol. 1(4), pp. 28–39.
7. Khatib O. *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. The International Journal of Robotics Research, 1986. Vol. 5(1), pp. 90–98.
8. Koren Y., Borenstein J. *Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation*. IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991. pp. 1398–1404.
9. Ge S. S., Cui Y. J. *New potential functions for mobile robot path planning*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000. Vol. 16(5), pp. 615–620.
10. Koenig N., Howard A. *Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator*. IEEE/RSJ IROS, 2004.
11. Quigley M. et al. *ROS: an open-source Robot Operating System*. ICRA Workshop, 2009.
12. Hubaux J. P. *Securing critical infrastructure with autonomous systems*. IEEE Security & Privacy, 2020. Vol. 18(4), pp. 44–52.

UDK 621.791

**Bryhyda M., Khomyuk V., Piontkevych O.** (Vinnytsia National Technical University, Ukraine).

## **APPLICATION OF A DIGITAL TWIN OF A ROBOTIC WELDING COMPLEX FOR TORCH TRAJECTORY OPTIMIZATION**

**Abstract:** The study is devoted to the application of digital twin technology to improve the efficiency of robotic welding complexes in modern mechanical engineering. The transition from traditional robot programming by teaching to virtual simulation in CAD/CAE environments is substantiated as a key factor in reducing production downtime and increasing technological flexibility. A method for optimizing the trajectory of the welding torch is proposed based on minimizing the welding cycle time and automatic collision detection during motion simulation. The digital twin model enables accurate reproduction of the robot kinematics, including dynamic constraints such as acceleration and inertial effects. Simulation results demonstrate improved trajectory smoothness and reduced velocity variation, which is essential for ensuring uniform weld quality. The implementation of virtual modeling allows early detection of programming errors and eliminates the risk of equipment damage. The approach significantly reduces setup time and enhances operational safety, confirming the effectiveness of digital twin integration into robotic welding systems.

**Keywords:** digital twin; robotic welding; trajectory optimization; CAD/CAE; collision detection; industrial robot; welding torch; cycle time.

**Анотація:** Робота присвячена застосуванню технології цифрового двійника для підвищення ефективності роботизованих зварювальних комплексів у сучасному машинобудуванні. Обґрунтовано доцільність переходу від традиційного програмування роботів методом навчання до віртуального моделювання у середовищах CAD/CAE як ключового чинника зменшення простоїв виробництва та підвищення гнучкості

технологічних процесів. Запропоновано метод оптимізації траєкторії руху зварювального пальника, що базується на мінімізації тривалості зварювального циклу та автоматичному виявленні колізій під час симуляції руху. Цифровий двійник дозволяє точно відтворювати кінематику робота з урахуванням динамічних обмежень, зокрема прискорень та інерційних навантажень. Результати моделювання демонструють підвищення плавності руху та зменшення варіації швидкості, що є критично важливим для забезпечення рівномірної якості зварного шва. Використання віртуальної моделі дає змогу виявляти помилки програмування на ранніх етапах та усувати ризик пошкодження обладнання.

**Ключові слова:** цифровий двійник; роботизоване зварювання; оптимізація траєкторії; CAD/CAE; виявлення колізій; промисловий робот; зварювальний пальник; цикл.

**Statement of the problem and its connection with scientific and practical works.** Robotic welding is a key element of modern mechanical engineering, operating under conditions of high intensity and increased requirements for the accuracy and stability of technological processes [1, 2, 3]. Traditional methods of programming welding robots by direct teaching of the manipulator require significant time consumption [4, 5], suspension of the production process, and the involvement of highly qualified personnel [6, 7, 8].

In this regard, the application of digital twins [9, 10] is highly relevant, allowing the transfer of the programming and debugging stage into a virtual CAD/CAE environment [11, 12, 13]. This approach ensures a reduction in production preparation time and increases the operational safety of welding equipment.

The main purpose of the study is to evaluate the effectiveness of using digital twins of a robotic welding complex to optimize the trajectory of the torch.

**Presentation of the main material of the research.** The digital twin is based on the creation of an accurate geometric model of the robotic welding complex (Figure 1), which includes a manipulator, a welding torch, a platform, and technological equipment. The assembly of the twin and the research results were performed in the SOLIDWORKS environment. To analyze the motion, collision detection algorithms were applied, which determine the minimum distances between system elements during the simulation process.

A 6-axis industrial robot Fanuc Arc Mate 120iD, specifically designed for arc welding, was chosen as the primary equipment for performing welding operations. The Abicor Binzel ABIROB W500 welding torch model was selected. The Austrian Fronius TPS/i series equipment was chosen as the welding power source for integration with Fanuc. For wire feeding, a Fronius WF 25i Robacta Drive mechanism is used, with the wire being fed from a Marathon Pac, which is also located on the platform. The Marathon Pac is a

high-capacity continuous wire feeding system. The platform provides linear movement of the industrial robot with equipment up to 3 m [14].

Unlike static approaches, the use of a digital twin allows taking into account accelerations, inertial loads, and kinematic constraints of the manipulator. In addition, the simulation made it possible to avoid kinematic singularities, where the robot loses a degree of freedom, which often occurs during the manual teaching of complex seams.

Instead of a direct comparison with traditional methods, the effectiveness of the developed digital twin based on the Fanuc Arc Mate 120iD was evaluated through iterative simulation in a CAD/CAE environment. The optimization of the cycle time  $T_{cycle}$  is based on minimizing the total welding time and idle movements:

$$T_{cycle} = \sum (L_{weld} / v_{weld}) + \sum (L_{idle} / v_{idle}), \quad (1)$$

where  $L_{weld}$  is the total length of the welding seams;  $L_{idle}$  is the length of the idle trajectories;  $v_{weld}$  and  $v_{idle}$  are the respective movement speeds of the welding torch.

By using the  $T_{cycle}$  minimization algorithms according to formula (1), a trajectory was calculated that takes into account not only the seam length  $L_{weld}$  but also the dynamic constraints of the manipulator – acceleration and inertial loads. This allowed achieving high smoothness of motion, confirmed by a low coefficient of velocity variation (at the level of 4.8%), which is critical for ensuring uniform penetration depth.

The introduction of the virtual platform model (with a stroke of up to 3 m) and Fronius wire feeding mechanisms allowed for a comprehensive analysis of the reachability zones. Collision detection algorithms automatically identified potential collision points of the torch with technological equipment at the development stage, which in real conditions guarantees a zero probability of damaging expensive equipment.

Based on the simulation of complex trajectories, it was established that the virtual setup stage takes about 3.2 hours. This indicates the high efficiency of transferring programming from the physical workshop to the virtual environment, as it allows preparing control programs without stopping the production process.

The use of the digital twin allows taking into account the kinematic features of the 6-axis system, ensuring the optimal orientation of the ABIROB W500 torch relative to the weld pool throughout the entire trajectory.

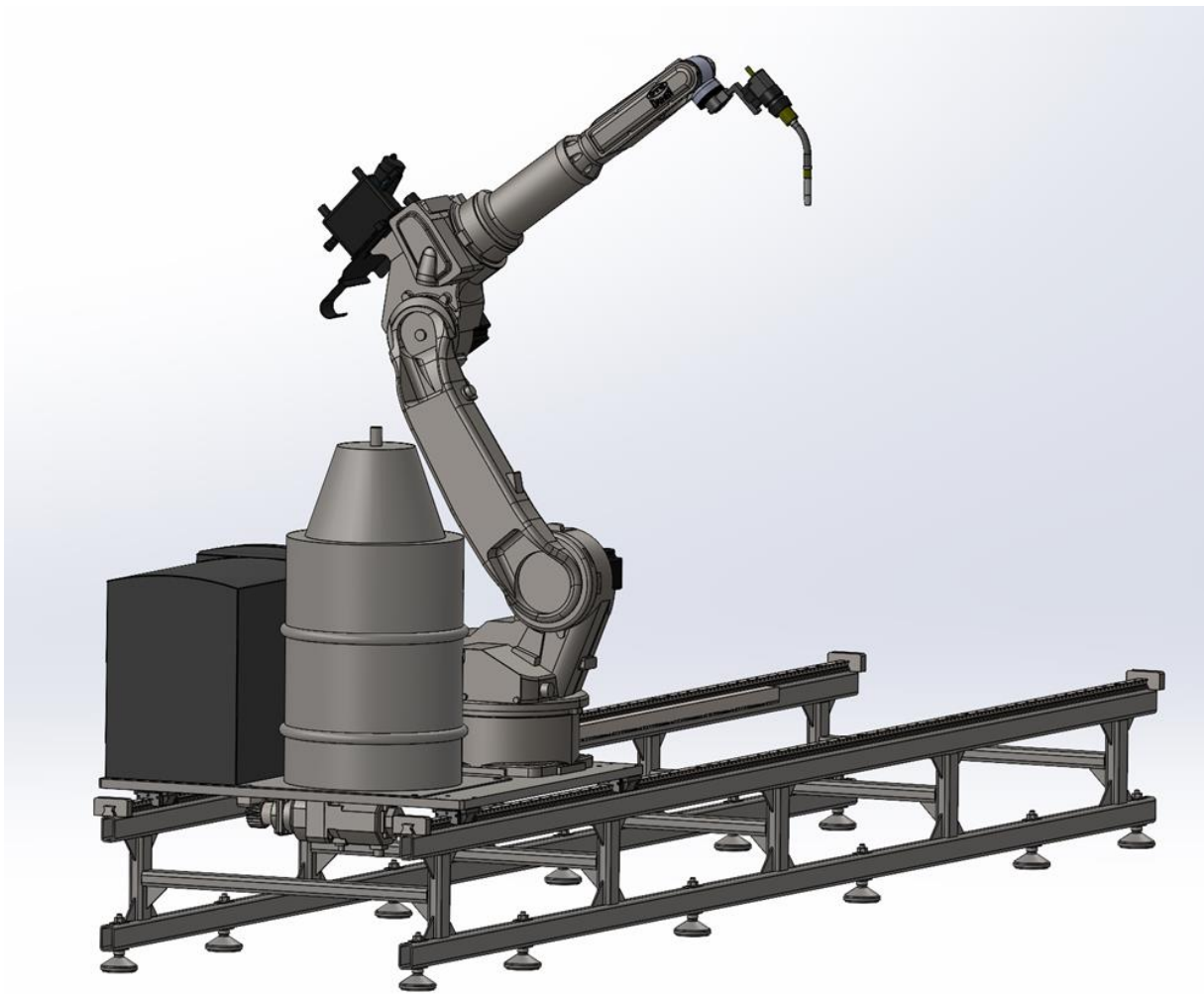


*Fig. 1. Three-dimensional model of the welding complex*

The obtained data demonstrate that the application of virtual models allows detecting programming errors at early stages. Ignoring the simulation stage leads to significant risks of damaging expensive technological equipment. The main economic effect of the implementation is the elimination of downtime of the robotic complex during the development of new technological programs.

**Conclusion.** The paper implements an approach to optimizing a robotic welding complex using digital twin technology. The integration of CAD/CAE systems into the production preparation process allows reducing programming time, eliminating collisions, and shortening the duration of the welding cycle.

The obtained results justify the feasibility of introducing digital twins in modern mechanical engineering to increase the efficiency, safety, and quality of welded structures.

## REFERENCES

1. Mohanraj R., Balaji S. N. *Digital Twin Technology: A Comprehensive Review of Modeling, Applications, Challenges and Future Directions in Complex System Integration*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2025. 26 p. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10397-3>
2. Kovarikova Z., Duchon F., Trebula M., Nagy F., Dekan M., Labat D., Babinec A. *Prototyping an intelligent robotic welding workplace by a cyber-physic tool*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023. No. 125(9), pp. 4855-4882. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10986-1>

3. Піонткевич О.В. Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві / О. В. Піонткевич, С. І. Сухоруков, О. В. Сердюк, В. М. Домославський // Вісник машинобудування та транспорту, 2022. № 16(2). С. 96-100. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-96-100>
4. Biesinger F., Kraß B., Weyrich M. A survey on the necessity for a digital twin of production in the automotive industry, in Proc. IEEE 23rd Int. Conf. Mechatronics Technol. (ICMT), 2019, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICMECT.2019.8932144>
5. Hägele M., Nilsson K., Pires J.N., Bischoff R. Industrial robotics. Springer Handbook of Robotics, Springer, 2016. pp. 1385-1422. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_54)
6. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. (). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. Mechatronics, 2018. No. 55, pp. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
7. Березюк О. В. Використання віртуального лабораторного стенда для проведення лабораторної роботи «Дослідження ефективності освітлення у виробничих приміщеннях». Педагогіка безпеки, 2017. Вип. 2(1), С. 35-39. <https://doi.org/10.31649/2524-1079-2017-2-1-35-39>
8. Muller F., Koch M., Hasse A. User Study to Validate the Performance of an Offline Robot Programming Method That Enables Robot-Independent Kinesthetic Instruction through the Use of Augmented Reality and Motion Capturing. Robotics, 2024. No. 13(3), 35. <https://doi.org/10.3390/robotics13030035>
9. Kritzing W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. Ifac-PapersOnline, 2018. No. 51(11), pp. 1016-1022.
10. Ковалевський С. В. Швидкодіючі моделі штучного інтелекту для реального часу в цифрових двійниках процесів обробки металів тиском. Materials working by pressure, 2025. Вип. 1 (54), С. 141-146. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2025-1\(54\)141](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2025-1(54)141)
11. Піонткевич О. В., Березюк О. В., Лозінський Д. О., Кавецький О. І. Застосування CAD/CAE-системи Autodesk Inventor для удосконалення фрезерногравірувального верстата з ЧПК. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вінниця: ВНТУ, 2025. Вип. 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-178-186>
12. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.
13. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Петров О. В., Сердюк О. В. «Комп'ютеризовані системи проєктування» для здобувачів вищої освіти зі спеціальності «Прикладна механіка»: електронний лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2025. 142 с.
14. Соколовський М. Є. Удосконалення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень з використанням CAD/CAE-систем: магістерська кваліфікаційна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / М. Є. Соколовський. Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2025. 112 ст.

UDC 004.891:001.8:528.94

**Gyula Mester<sup>1</sup>, Janos Santa<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>University of Szeged, Szeged, Hungary;  
<sup>2</sup>Metropolitan University, Belgrade, Serbia).

## THE RANKING LIST OF HUNGARIAN ROBOTICS RESEARCHERS 2026

**Abstract:** This scientific paper presents the 2026 ranking of Hungarian researchers in the field of robotics based on bibliometric indicators. The primary criterion for ranking is the h-index, which reflects both productivity and citation impact of researchers. In cases where

researchers have identical *h*-index values, additional differentiation is achieved using the total number of citations. The study includes 20 leading researchers whose minimum *h*-index equals 12. The data for ranking were obtained from the Google Scholar database, ensuring accessibility and transparency of bibliographic metrics. The paper also introduces the *g*-index as a complementary indicator derived from citation distribution and provides ORCID identifiers for accurate researcher identification. The results highlight the current state of robotics research in Hungary and demonstrate the applicability of bibliometric methods for evaluating scientific performance and comparative analysis across individuals and institutions.

**Keywords:** *h*-index, citations, robotics researchers ranking, Google Scholar database, ORCID ID, bibliometric analysis.

**Abstract:** This scientific paper presents the 2026 ranking of Hungarian researchers in the field of robotics based on bibliometric indicators. The primary criterion for ranking is the *h*-index, which reflects both productivity and citation impact of researchers. In cases where researchers have identical *h*-index values, additional differentiation is achieved using the total number of citations. The study includes 20 leading researchers whose minimum *h*-index equals 12. The data for ranking were obtained from the Google Scholar database, ensuring accessibility and transparency of bibliographic metrics. The paper also introduces the *g*-index as a complementary indicator derived from citation distribution and provides ORCID identifiers for accurate researcher identification. The results highlight the current state of robotics research in Hungary and demonstrate the applicability of bibliometric methods for evaluating scientific performance and comparative analysis across individuals and institutions.

**Keywords:** *h*-index, citations, robotics researchers ranking, Google Scholar database, ORCID ID, bibliometric analysis.

## 1.INTRODUCTION.

We present the 2026 ranking of Hungarian researchers in the field of robotics. The ranking of Hungarian researchers in the field of robotics is primarily based on their *h*-index. Researchers with the same *h*-index were ranked by the number of citations. The minimum *h*-index for researchers included in the ranking is 12. The ranking was compiled using the Google Scholar database. Google Scholar is Google's academic search engine. The ranking includes 20 researchers. We also present the Orcid ID number of the researchers [1-8].

The *h*-index, also known as the Hirsch index, is based on references. The *h*-index was published by physicist Jorge E. Hirsch (University of California, San Diego) in 2005: "A scientist has index *h* if *h* of his/her *N* papers have at least *h* citations each, and the other (*N*-*h*) papers have no more than *h* citations each". Thus, the *h*-index is the highest *h* number, indicating that *h* publications have at least *h* citations and all other scientific publications by the same author have, by definition, fewer than *h* citations [9-26].

Hirsch suggested that the index was originally intended to compare individual performance only, but that it could also be used to determine the index of:

- research groups,

- journals,
- disciplines,
- institutions, and
- countries.

The original h-index does not distinguish between dependent and independent citations, i.e. it also takes self-citations into account.

The first chapter is the introduction, the second chapter presents the ranking list of Hungarian robotics researchers 2026 and the third chapter summarizes the results of the research [27-50].

## 2. THE RANKING LIST OF HUNGARIAN ROBOTICS RESEARCHERS 2026.

We present the 2026 ranking list of Hungarian researchers in the field of robotics, primarily based on the h-index of the researchers. The ranking was compiled using the Google Scholar database. Researchers with the same h-index were ranked by the number of citations.

The minimum h-index for researcher 20 on the ranking is 12. Here is the ranking list:

### 1. Gyula Mester Orcid ID: 0000-0001-7796-2820



Gyula Mester (Orcid ID: 0000-0001-7796-2820, g-index=75, w-index=9)



Professor, [University of Szeged](#), Óbuda University, Hungary, University of Novi Sad, Serbia  
Verified email at inf.u-szeged.hu - [Homepage](#)

[Self-Driving Cars](#) [Flying Cars](#) [Autonomous Driving](#) [AI for Autonomous Driving](#)  
[Intelligent Robots](#)

Cited by

|           | All  |
|-----------|------|
| Citations | 6654 |
| h-index   | 64   |
| i10-index | 112  |

### 2. Imre J. Rudas Orcid ID: 0000-0002-2067-8578



Imre J. Rudas



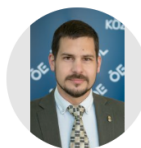
[Obuda University](#)  
Verified email at uni-obuda.hu

[robotics](#) [fuzzy systems](#) [computational cybernetics](#)

Cited by

|           | All   |
|-----------|-------|
| Citations | 10195 |
| h-index   | 46    |
| i10-index | 222   |

### 3. Tamás Haidegger Orcid ID: 0000-0003-1402-1139



Tamás Haidegger



Other names »

ACMIT | HandInScan | [Obuda University](#)  
Verified email at uni-obuda.hu - [Homepage](#)

[Surgical Robotics](#) [Robot Safety Standardization](#) [Infection Prevention&Control](#) [Digital Surgery](#)  
[Aut.](#)

Cited by

|           | All  |
|-----------|------|
| Citations | 7040 |
| h-index   | 42   |
| i10-index | 135  |

### 4. Annamária R. Várkonyi-Kóczy Orcid ID: 0000-0002-6932-8608



Annamária R. Varkonyi-Koczy



Other names »

[Obuda University](#)  
Verified email at uni-obuda.hu

[Image processing](#) [Signal processig](#) [Soft-computing techniques](#)

Cited by

|           | All  |
|-----------|------|
| Citations | 5943 |
| h-index   | 36   |
| i10-index | 104  |

### 5. Péter Pásztor Orcid ID: 0000-0002-8683-6639



### Peter Pastor



Robotist, [Google](#)  
Verified email at google.com - [Homepage](#)

[Mobile Manipulation](#) [Humanoid Robotics](#) [Machine Learning](#) [Motor Primitives](#)

Cited by

|           |       |
|-----------|-------|
|           | All   |
| Citations | 20286 |
| h-index   | 35    |
| i10-index | 41    |

## 6. Zoltán-Csaba Márton Orcid ID: 0000-0002-3035-493X



### Dr. Zoltán-Csaba Márton



AI Research Director, Agile Robots AG  
Verified email at agile-robots.com - [Homepage](#)

[Robotics](#) [Perception](#) [Cognitive Vision](#) [Machine Learning](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 8474 |
| h-index   | 33   |
| i10-index | 53   |

## 7. Péter Korondi Orcid ID: 0000-0002-0016-0384



### Peter Korondi



[University of Debrecen](#), Faculty of Engineering, Department of Mechatronics  
Verified email at eng.unideb.hu

[etho-robotics](#) [social robotics](#) [mechatronics](#) [systems and control](#) [sliding mode control](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 4288 |
| h-index   | 32   |
| i10-index | 117  |

## 8. József K. Tar Orcid ID: 0000-0002-5476-401X



### József K. Tar



Full Professor, [Óbuda University](#), Bejczy Antal iRobottechnikai Központ  
Verified email at nik.uni-obuda.hu - [Homepage](#)

[Nonlinear Control](#) [Robust Control](#) [Adaptive Control](#) [Robotics](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 4110 |
| h-index   | 30   |
| i10-index | 101  |

## 9. Péter Galambos Orcid ID: 0000-0002-2319-0551



### Péter Galambos



[Obuda University](#)  
Verified email at irob.uni-obuda.hu - [Homepage](#)

[Robotics](#) [Systems and Control](#) [Industrial Informatics](#) [VR](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 2424 |
| h-index   | 26   |
| i10-index | 57   |

## 10. János Botzheim Orcid ID: 0000-0002-7838-6148



### Janos Botzheim



Associate Professor, Eötvös Loránd University  
Verified email at ieee.org

[Computational Intelligence](#) [Cognitive Robotics](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 2305 |
| h-index   | 24   |
| i10-index | 77   |

## 11. Béla Lantos Orcid ID: -



### Bela Lantos



Professor, [Budapest University of Technology and Economics](#)  
Verified email at iit.bme.hu

[Control Theory](#) [Robot Control](#) [Image Processing](#) [Artificial Intelligence](#) [Vehicle Control](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 2101 |
| h-index   | 21   |
| i10-index | 46   |

## 12. György Eigner Orcid ID: 0000-0001-8038-2210



### György Eigner



[Obuda University](#)  
Verified email at nik.uni-obuda.hu - [Homepage](#)

[Biomedical engineering](#) [Control engineering](#) [Robotics](#) [Mechanical engineering](#)

Cited by

|           |      |
|-----------|------|
|           | All  |
| Citations | 1358 |
| h-index   | 18   |
| i10-index | 41   |



### 13. Péter Odry Orcid ID: 0000-0003-2395-5259



Peter Odry

University of Dunaújváros  
Verified email at appl-dsp.com - [Homepage](#)

[Robotica](#) [DSP](#) [Tomography](#)



Cited by

|           | All  |
|-----------|------|
| Citations | 1363 |
| h-index   | 16   |
| i10-index | 49   |

### 14. Gábor Sziebig Orcid ID: 0000-0002-3236-8999



Gabor Sziebig

Senior Research Scientist, SINTEF Manufacturing  
Verified email at sintef.no - [Homepage](#)

[Industrial Robots](#) [Control Theory](#) [Machine Vision](#)



Cited by

|           | All  |
|-----------|------|
| Citations | 1016 |
| h-index   | 16   |
| i10-index | 24   |

### 15. Szilveszter Pletl Orcid ID: 0000-0002-8721-6271



Szilveszter Dr. Pletl

[University of Szeged](#)  
Verified email at inf.u-szeged.hu

[control techniques](#) [control](#) [robotics](#) [sensor networks](#) [informatics](#)



Cited by

|           | All |
|-----------|-----|
| Citations | 852 |
| h-index   | 15  |
| i10-index | 24  |

### 16. Péter Tamás Szemes Orcid ID: 0000-0003-0911-1260



Péter Tamás Szemes

[University of Debrecen](#), Faculty of Engineering  
Verified email at eng.unideb.hu - [Homepage](#)

[Robotics](#) [Building automation](#) [Energy management](#)



Cited by

|           | All |
|-----------|-----|
| Citations | 734 |
| h-index   | 15  |
| i10-index | 27  |

### 17. Lőrinc Márton Orcid ID: 0000-0003-1070-2877



Lorinc Marton

[Sapientia University](#)  
Verified email at ms.sapientia.ro - [Homepage](#)

[control](#) [networks](#) [robotics](#)



Cited by

|           | All  |
|-----------|------|
| Citations | 1415 |
| h-index   | 14   |
| i10-index | 26   |

### 18. István Harmati Orcid ID: 0000-0001-6665-4582



Istvan Harmati

Associate Professor, [Budapest University of Technology and Economics](#)  
Verified email at iit.bme.hu

[Artificial Intelligence](#) [robotics](#) [multi agent systems](#) [control theory](#)



Cited by

|           | All |
|-----------|-----|
| Citations | 868 |
| h-index   | 14  |
| i10-index | 23  |

### 19. Péter Sarcevic Orcid ID: 0000-0003-4050-8231



Peter Sarcevic

[University of Szeged](#), Faculty of Engineering  
Verified email at mk.u-szeged.hu - [Homepage](#)

[Sensor Networks](#) [Intelligent Systems](#) [Robotics](#) [Pattern Recognition](#) [Sensor Fusion](#)



Cited by

|           | All |
|-----------|-----|
| Citations | 662 |
| h-index   | 13  |
| i10-index | 19  |

### 20. László L. Kovács Orcid ID: 0000-0003-0571-1242



Laszlo L. Kovacs

Research Associate, Department of Mechanical Engineering and Centre for Intelligent Machines, McGill  
Verified email at mm.bme.hu

Dynamics Modelling   Simulation and Control of ...   Robotics   Haptics  
Control of Underactuated S...



Cited by

|           | All |
|-----------|-----|
| Citations | 511 |
| h-index   | 12  |
| i10-index | 16  |

### 3.CONCLUSIONS.

This scientific paper presents the 2026 ranking of Hungarian researchers in the field of robotics. The ranking of researchers in the field of robotics is primarily based on their h-index. Researchers with the same h-index were ranked by the number of citations. The 20 researchers included in the ranking have a minimum h-index of 12. The ranking is compiled using the Google Scholar web database. We also present the Orcid ID number of the researchers.

### REFERENCES

- [1] Ugljesa Marjanovic, Gyula Mester and Bojana Milic Marjanovic, *Assessing the Success of Artificial Intelligence Tools: an Evaluation of ChatGPT Using the Information System Success Model*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 22, Issue 3, pp. 266-275, ISSN 1334-4684, DOI: 10.7906/indecs.22.3.3, Croatian Interdisciplinary Society, 2024.
- [2] Dalma Zilahy, Gyula Mester, *Managing Negative Emotions Caused by Self-Driving*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 21, Issue 4, pp. 351-355, DOI: 10.7906/indecs.21.4.4, ISSN 1334-4684, Croatian Interdisciplinary Society, 2023.
- [3] César Bautista, Gyula Mester, *Internet of Things in Self-Driving Cars Environment*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 21, Issue 2, pp. 188-198, DOI: 10.7906/indecs.21.2.8, ISSN 1334-4684, Croatian Interdisciplinary Society, 2023.
- [4] Jelena L. Pisarov, Gyula Mester, *Self-Driving Robotic Cars: Cyber Security Developments*, IGI Global Scientific Publishing, pp. 969-1001, 2022.
- [5] Gyula Mester, César Bautista, *Automotive Digital Perception, Review of the National Center for Digitization*, Issue 39, pp. 90-95, ISSN 1820-0109, Faculty of Mathematics, University of Belgrade, Serbia, 2021.
- [6] Jelena Pisarov, Gyula Mester, *Rang lista fizičara Srbije, Trend 2020, XXVI Skup Trendovi Razvoja: "Inovacije u Modernom Obrazovanju"*, *Zbornik radova*, p. 574, paper No. T4.2-3, pp. 559-562, ISBN 978-86-6022-241-3, Kopaonik, Serbia, 16-19.02.2020.
- [7] Attila Nemes, Gyula Mester, Tibor Mester, *A Soft Computing Method for Efficient Modelling of Smart Cities Noise Pollution*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 16, No. 3-A, pp. 302-312, ISSN 1334-4684, DOI: 10.7906/indecs.16.3.1, 2018.
- [8] Gyula Mester, *Rankings Scientists, Journals and Countries Using h-index*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 14, Issue 1, pp. 1-9, ISSN 1334-4684, DOI: 10.7906/indecs.14.1.1, 2016/1/30.
- [9] Gyula Mester, *Cloud Robotics Model*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 13, Issue 3, pp. 1-8, ISSN 1334-4684, Croatian Interdisciplinary Society, DOI: 10.7906/indecs.13.1.1, 2015.
- [10] Gyula Mester, *Design of the Fuzzy Control Systems Based on Genetic Algorithm for Intelligent Robots*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs*, Vol. 12, No. 3, pp. 245-254, ISSN 1334-4684, DOI: 10.7906/indecs.12.3.4, 2014.
- [11] Gyula Mester, *Új tudományos eredmények mérése, XXX Kandó Conference, Budapest, Hungary*, ISBN 978-615-5460-24-1, pp. 1-10, 2014.11.20.
- [12] Josip Stepanić, Gyula Mester, Josip Kasać, *Synthetic Inertial Navigation Systems: Case Study of Determining Direction*, 57. konferencije ETRAN, pp. RO2. 7.1-RO2. 7.3, Zlatibor, 2013.
- [13] Gyula Mester, Aleksandar Rodic, *Navigation of an Autonomous Outdoor Quadrotor Helicopter*, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Internet Society Technology and Management (ICIST)*, pp. 259-262, 2012.03.01.
- [14] Aleksandar Rodic, Gyula Mester, *Ambientally Aware Bi-Functional Ground-Aerial Robot Networked System for Remote Environmental Surveillance and Monitoring Tasks*, *Proceedings of*

- the 55<sup>th</sup> ETRAN Conference, Section Robotics, Society for Electronic, Vol. RO2, No. 5, pp 1-4, ISBN 978-86-80509-66-2, Banja Vrućica, Bosnia and Hercegovina, Jun 6-9, 2012.
- [15] Aleksandar Rodic, Milos Jovanovic, Svemir Popic, Gyula Mester, Scalable experimental platform for research, development and testing of networked robotic systems in informationally structured environments experimental testbed station for wireless robot-sensor networks, 2011 IEEE Workshop on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space, Paris, France, pp. 136-143, DOI: 10.1109/RIISS.2011.5945779, 2011.
- [16] Aleksandar Rodic, Gyula Mester, Modeling and Simulation of Quad-Rotor Dynamics and Spatial Navigation, Proceedings of the SISY 2011, 9<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, pp. 23-28, ISBN: 978-1-4577-1973-8, DOI: 10.1109/SISY.2011.6034325, Subotica, Serbia, 8–10 September 2011.
- [17] Rodic, Gyula Mester, Virtual WRSN-Modeling and Simulation of Wireless Robot-Sensor Networked Systems, Proceedings of the 8<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, SISY 2010, pp. 115-120, DOI: 10.1109/SISY.2010.5647245, ISBN: 978-1-4244-7394-6, Subotica, Serbia, 10-11 Sept. 2010.
- [18] Gyula Mester, Aleksandar Rodic, Autonomous Locomotion of Humanoid Robots in Presence of Mobile and Immobile Obstacles: Trajectory Prediction, Path Planning, Control and Simulation, Book, Towards Intelligent Engineering and Information Technology, pp. 279-293, Publisher Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [19] Gyula Mester, Obstacle Avoidance and Velocity Control of Mobile Robots, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Intelligent Systems and Informatics SISY 2008, pp. 97-101, IEEE, DOI 10.1109/SISY.2008.4664918, Subotica, Serbia, 26-27 September 2008.
- [20] Gyula Mester, Distance Learning in Robotics, Proceedings of The Third International Conference on Informatics, Educational Technology and New Media in Education, pp. 239-245, ISBN 86-83097-51-X, University of Novi Sad, Sombor, Serbia, Faculty of Education in Sombor, 2006.
- [21] Janos Santa, Gemini in Action Artificial Intelligence supporting office work, XXXII skup TRENDVI, pp. 177-181 Vrnjacka Banja, Serbia, 4-6.03.2026
- [22] Janos Santa, Artificial Intelligence Applied in Enterprise Resource Planning, Interdisciplinary Description of Complex Systems: Indecs, Vol. 22, Issue 3, pp. 360-363, DOI: 10.7906/indec.22.3.11, ISSN 1334-4684, 2024 pp. 302-305 Vrnjacka Banja, Serbia, 3-5.12.2025
- [23] Janos Santa, World Ranking of Automatization Researchers, Research Gate, pp. 1-4, 2025.
- [24] Janos Santa, Fully Automated Accounts Payable Process, Research Gate, pp. 1-4, 2025.
- [25] Janos Santa, The 2025 Ranking List of Self-Driving Robotic Cars Researchers from Serbia, Research Gate, pp. 1-4, 2025.
- [26] Janos Santa, Magyarország egyetemei a 2025-ös Shanghai világranglistán, Research Gate, pp. 1-5, 2025.
- [27] Gyula Mester, Janos Santa, Svetska rang lista istraživača veštačke inteligencije 2025, Research Gate, pp. 1-7, 2025.
- [28] Janos Santa, 2025 World Ranking of Unmanned Autonomous Systems Researchers, Research Gate, pp. 1-4, 2025.
- [29] Gyula Mester, Janos Santa, Svetska rang lista istraživača veštačke inteligencije 2025, Research Gates, pp. 1-4, 2025.
- [30] Janos Santa, World Ranking of Citation Indexing Researchers, Research Gate, pp. 1-4, 2025.
- [31] Janos Santa, Magyarországi egyetemek a Times Higher Education egyetemi világranglistán, Research Gate, pp. 1-7, 2025.
- [32] Janos Santa, Analyses of Investment Projects Efficiency Using Artificial Intelligence, XXXI skup TRENDVI RAZVOJA, Zbornik radova, pp. 302-305 Vrnjacka Banja, Serbia, 3-5.12.2025
- [33] Janos Santa, 2025 Ranking Researchers at University of Belgrade, Research Gate, pp. 1-4, 2025.
- [34] Sergiy V. Kovalevskyy, Artificial Intelligence as a Driver of Socio-Economic System Transformation in Ukraine, Interdisciplinary Description of Complex Systems, Indecs, Vol. 22, Issue 3, pp. 296-304, DOI: 10.7906/indec.22.3.5, 2024.
- [35] Sergiy V. Kovalevskyy, Olena S. Kovalevska, Acoustic Monitoring with Neural Network Diagnostics, American Journal of Neural Networks and Applications, Vol. 1, Issue 2, pp. 39-42, 2015.
- [36] S. V. Kovalevskyy, V. I. Tulupov, V. P. Dašić, A. P. Nikolaenko, The research of electro-impulse

- turning process, *Scientific Monography*, ISBN 978-86-6075-034-3, *Vrnjačka Banja: SaTCIP*, 2012.
- [37] S. V. Kovalevskyy, *Application of Acoustic Analysis in Control Systems of Robotic Machine Tools*, *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, Issue 2(45), pp. 51-59, 2018.
- [38] Sergiy V. Kovalevskyy, Ludmila V. Kosheva, *Research the Corporate Culture of Students Using Neural Network Models*, *American Journal of Neural Networks and Applications*, Vol. 1, Issue 2, pp. 43-47, 2015.
- [39] Zilahy Dalma, *Az önvezető autók elfogadása*, *Magyar Tudomány Napja a Délvidéken*, *Vajdasági Magyar Tudományos Társaság, konferencia kiadvány*, pp. 272-277, 2021.
- [40] László Berek, *Az online tudományos kommunikáció hitelességét veszélyeztető tényezők*, *Biztonságtudományi Szemle 2022. IV. évf. 2. különszám*, pp. 35-41, 2022.
- [41] László Berek, *Implementing RFID Technology for Libraries in the Field of Library Security*, *Óbuda University E-Bulletin*, Vol. 6, Issue 1, pp. 17-20, 2016.
- [42] László Berek, *Artificial Intelligence-Generated Text in Higher Education—Usage and Detection in the Literature*, *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, Indecs, Vol. 22, Issue 3, pp. 238-245, 2024.
- [43] V. Šerifi, P. Dašić, J. Dašić, *Functional and Information Model of Expert Specialization Using IDEF standard*, *Modelling and Optimization in the Machines Building Fields (MOCM)*, Vol. 14, Issue 2, pp. 268-279, Publisher University of Bacau, 2008.
- [44] V. Tonkonogiy, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, A. Grabchenko, I. Pavlenko, M. Edl, I. Kuric, P. Dasic, Springer: Cham, pp. 654-663, publisher Switzerland, 2021.
- [45] Branimir Milosavljević, Radivoje Pešić, Predrag Dašić, *Binary Logistic Regression Modeling of Idle CO Emissions in Order to Estimate Predictors Influences in Old Vehicle Park*, *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Vol. 21, Issue 1, p.1-10, June 2015.
- [46] P. Dašić, V. Nedeff, S. Čurčić, [Analysis and Evaluation of Software Tools for Life Cycle Assessment](#), *Annals of the University of Petrosani, Electrical Engineering*, Vol. 9, pp. 6-15, University of Petrosani, 2007.
- [47] Mester Gyula, Pisarov Jelena, Zilahy Dalma, Bautista César, Mester Tibor, *Tudományos közlemény azonosítójának-identifikátorának meghatározása a Google Scholar, Web of Science és Scopus internetes adatbázisokban*, *Kandó Konferencia, KSC2023*, pp. 259-264, Budapest, Hungary, 2023.
- [48] Sorin Ioan Deaconu, Lucian Nicolae Tutele, Gabriel Nicolae Popa, Tihomir Latinovic, *Artificial Loading for Rotating Electric Machines*, *Annals of Faculty Engineering Hunedoara*, pp. 219-224, Faculty of Engineering - Hunedoara, Romania, 2011.
- [49] Penghong Ci, Muhua Sun, Meenakshi Upadhyaya, Houfu Song, Lei Jin, Bo Sun, Matthew R. Jones, Joel W Ager, Zlatan Aksamija, Junqiao W, [Giant Isotope Effect of Thermal Conductivity in Silicon Nanowires](#) *Physical Review Letters*, Vol. 128, Issue 8, pages 08590, 2022.
- [50] Peng, W., Aksamija, Z., Scott, S. et al., *Probing the Electronic Structure at Semiconductor Surfaces using Charge transport in nanomembranes*. *Nature Communications*, Vol. 4, No. 1, 1339, DOI:10.1038 /ncomms2350, 2013.

**Isak Karabegović<sup>1</sup>, Ermin Husak<sup>2</sup>, Predrag Dašić<sup>3</sup>** (<sup>1</sup>Academy of Sciences and Arts of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; <sup>2</sup>University of Bihać, Technical Faculty Bihać, Bihać, Bosnia and Herzegovina; <sup>3</sup>Engineering Academy of Serbia (IAS), Belgrade, Serbia).

## INTEGRATION OF AI AND COLLABORATIVE ROBOTS FOR CYCLE TIME OPTIMIZATION IN CNC PRODUCTION

**Abstract:** This paper presents an experimental study on the integration of collaborative robots and artificial intelligence (AI) in CNC production systems. The research focuses on optimizing cycle time, reducing downtime, and improving overall equipment effectiveness (OEE). A UR5 collaborative robot was implemented for machine tending operations, while AI algorithms were used for adaptive optimization. The proposed system enables real-time data acquisition and intelligent decision-making, allowing dynamic adjustment of process parameters based on production conditions. In addition, the integration enhances human-robot collaboration by minimizing manual intervention and reducing the risk of operational errors. The results show a 17% reduction in cycle time, an increase in OEE from 64.6% to 85.6%, and a downtime reduction of up to 50%. Furthermore, the system demonstrates improved process stability and consistency in production quality. The payback period is approximately 1.2 years. These findings confirm the effectiveness of AI-driven collaborative robotics in Industry 4.0 systems and highlight their potential for wider industrial adoption.

**Keywords:** Industry 4.0; Collaborative robots; Artificial intelligence; CNC; Cycle time optimization.

**Анотація:** У цій статті представлено експериментальне дослідження інтеграції колаборативних роботів та штучного інтелекту (ШІ) у виробничі системи з ЧПК. Дослідження зосереджено на оптимізації часу циклу, скороченні простой та підвищенні загальної ефективності обладнання (ОЕЕ). Для обслуговування верстатів було впроваджено колаборативного робота UR5, а для адаптивної оптимізації використовувалися алгоритми ШІ. Запропонована система дозволяє збирати дані в режимі реального часу та приймати інтелектуальні рішення, що дозволяє динамічно регулювати параметри процесу залежно від виробничих умов. Крім того, інтеграція покращує співпрацю людини та робота, мінімізуючи ручне втручання та зменшуючи ризик операційних помилок. Результати показують скорочення часу циклу на 17%, збільшення ОЕЕ з 64,6% до 85,6% та скорочення часу простою до 50%. Крім того, система демонструє покращену стабільність процесу та стабільність якості виробництва. Термін окупності становить приблизно 1,2 роки. Ці результати підтверджують ефективність колаборативних роботів на основі ШІ в системах Індустрії 4.0 та підкреслюють їх потенціал для ширшого промислового впровадження.

**Ключові слова:** Індустрія 4.0; Колаборативні роботи; Штучний інтелект; ЧПК; Оптимізація часу циклу.

## 1. INTRODUCTION

The concept of Industry 4.0 represents a transformation of modern manufacturing through the integration of cyber-physical systems, artificial intelligence (AI), the Industrial Internet of Things (IIoT), and advanced robotics

into intelligent and interconnected production environments [1,2]. Unlike traditional automation, which is based on fixed and pre-programmed operations, Industry 4.0 enables adaptive, data-driven, and autonomous decision-making processes. This approach allows real-time monitoring, predictive analysis, and continuous optimization of production systems, leading to improved efficiency, flexibility, and product quality. Collaborative robots (cobots) have become a key component of this transformation due to their ability to safely interact with human operators in shared workspaces [3]. Their flexibility, ease of programming, and cost-effectiveness make them particularly suitable for CNC production systems, where they are widely used for machine tending, material handling, and repetitive auxiliary tasks. By reducing manual workload and improving operational consistency, cobots contribute to increased productivity and safer working conditions.

However, the full potential of collaborative robots cannot be achieved without intelligent optimization. In many industrial applications, cobots operate based on predefined programs, which limits their ability to respond to dynamic changes such as variations in machining time, tool wear, or unexpected machine interruptions. As a result, system performance may be suboptimal, especially in complex and variable production environments. Artificial intelligence offers a solution by enabling adaptive and data-driven control of manufacturing processes. AI techniques, including machine learning and predictive analytics, can analyze production data in real time, identify patterns, and optimize process parameters [4,5]. When integrated with collaborative robots, AI allows dynamic adjustment of robot operations, synchronization with CNC machines, and reduction of idle time. Additionally, AI supports predictive maintenance strategies, helping to detect anomalies and prevent unexpected downtime. Cycle time represents one of the most critical performance indicators in CNC production, directly affecting productivity and cost efficiency. Its optimization requires the coordination of multiple factors, including machining operations, robot motion, and system responsiveness. In parallel, overall equipment effectiveness (OEE), which combines availability, performance, and quality metrics, provides a comprehensive measure of system performance and is widely used for evaluating manufacturing efficiency. Despite significant research on robotics and AI, there is still a lack of experimental validation of their integrated application in real industrial CNC environments. Many studies are based on simulations or controlled laboratory conditions, which do not fully reflect the complexity of actual production systems. Consequently, there is a need for empirical studies that quantify the impact of AI-driven collaborative robotics on key performance indicators such as cycle time, downtime, and OEE. This study addresses this gap by presenting an experimental investigation of a collaborative robot integrated with AI-based optimization in a real CNC production system. A UR5 cobot is used for machine tending operations, while AI algorithms enable adaptive process control and performance improvement. The research provides practical insights into the implementation of intelligent

automation and its measurable benefits in terms of efficiency, reliability, and economic performance.

The remainder of the paper is organized as follows: Chapter 2 presents the theoretical background, Chapter 3 describes the methodology and experimental setup, Chapter 4 discusses the results, and Chapter 5 concludes the study.

## **2. IMPLEMENTATION OF SECOND-GENERATION INDUSTRIAL ROBOTS – COLLABORATIVE ROBOTS**

First-generation industrial robots were primarily developed to perform repetitive tasks within closed and strictly controlled work cells. In contrast, the modern generation of robots, known as collaborative robots (cobots), brings a fundamental change in the way humans and robots interact in industrial environments. The traditional use of robots was mostly limited to automated production lines, especially in the automotive industry, where robots operated behind protective fences and were physically separated from operators for safety reasons. The development of sensor technologies, advanced software solutions, and environment perception algorithms in the early 2000s represented a key turning point in robotics. In this context, the concept of Industry 4.0, based on digitalization, connectivity, and autonomous system management, enabled the development of robots that do not replace humans but actively collaborate with them – collaborative robots [6]. This approach opens up the possibility of establishing flexible production systems in which humans and robots share the same workspace, combining human cognitive capabilities with robotic precision and repeatability [7]. Collaborative robots are the result of the integration of multiple technological fields, including advanced sensors and vision systems, artificial intelligence and machine learning, safety mechanisms, as well as intuitive programming methods.

Thanks to these technologies, cobots are capable of detecting the presence and movements of operators, adapting their behavior in real time, and automatically stopping operation in the event of potential contact. This enables safe operation without the need for physical barriers, representing a significant advancement compared to conventional industrial robots. Unlike traditional systems that require programming by specialized personnel, collaborative robots can often be programmed through demonstration (teach-by-demonstration), where the operator directly demonstrates the desired movements or work sequences. According to authors [8] cobots are equipped with force and torque sensors, collision detection systems, and adaptive control strategies that enable safe operation in close proximity to humans. Compared to conventional robotic solutions, collaborative robots offer numerous advantages that make them particularly attractive for small and medium-sized enterprises. Key advantages include increased operational safety, fast and simple workspace reconfiguration, lower initial implementation costs, greater flexibility in handling production changes, as well as overall productivity improvement. Due to these characteristics, cobots are particularly suitable for application in production systems involving CNC machine tools, where frequent changes in workpieces



and technological parameters occur. Today, collaborative robots are applied across a wide range of industrial sectors, including assembly, packaging, quality control, welding, laboratory processes, as well as the food and pharmaceutical industries. Leading manufacturers such as Universal Robots, ABB, FANUC, KUKA, and Techman Robot dominate the global cobot market, offering solutions tailored to the requirements of modern flexible manufacturing.

The growth trend of their application is shown in Fig. 1 [9–12].

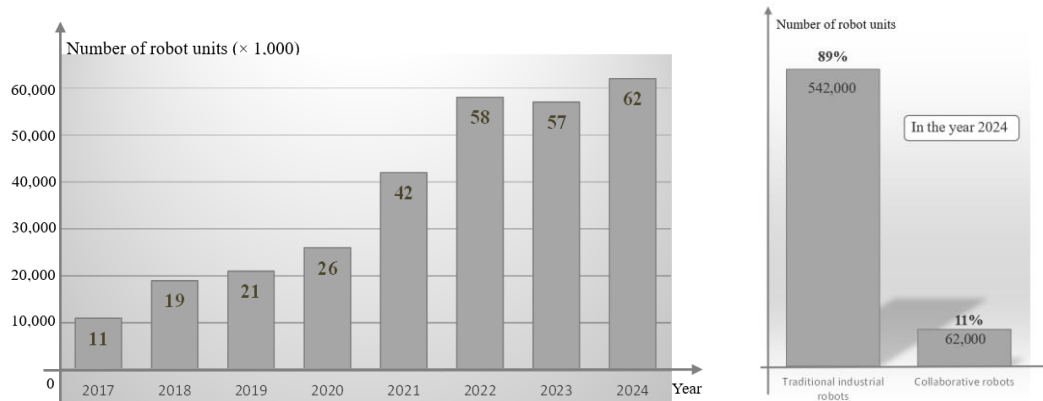


Figure 1. Growth in the application of collaborative robots in the period 2017–2024 with an illustration of their share in total implementation in 2024

The trend shown in Fig. 1 clearly indicates a continuous and significant increase in the application of collaborative robots in the period from 2017 to 2024. The annual number of installed units increased from approximately 11 thousand to about 62 thousand, which confirms the increasingly intensive integration of cobots into modern production systems. Although a slight decline was recorded in 2023 to approximately 57 thousand units, the overall trend remains steadily upward and positive in the long term. The analysis of the right part of Fig. 1 shows that collaborative robots accounted for approximately 11% of the total annual implementation in 2024 compared to conventional industrial robots. Such development is closely related to the advancement of key Industry 4.0 technologies, including the Internet of Things (IoT), cloud computing, artificial intelligence, and digital twins, which enable more efficient integration and greater operational flexibility of collaborative systems within smart factories. In such production environments, collaborative robots do not replace human labor but complement it, thereby achieving a higher level of efficiency, safety, and adaptability of production processes. Of particular importance is the fact that an increasing number of small and medium-sized enterprises are adopting cobots, primarily due to their affordability, ease of implementation, and relatively fast return on investment. These systems enable flexible automation of small- and medium-batch production, while simultaneously reducing costs and shortening installation time. Empirical studies further confirm that the application of collaborative robots can lead to a significant reduction in handling time, as well as an increase in the stability and reliability of processes within production cells [13].



### 3. METHODOLOGY

The research methodology is based on an experimental case study conducted in a real CNC production environment. The collaborative robot UR5 was integrated into the system for performing machine tending operations, including the loading and unloading of workpieces. The system architecture includes CNC machine tools, a robotic system, and a data analysis platform supported by artificial intelligence algorithms. Data were collected through industrial communication protocols and analyzed in real time [14]. Key performance indicators included cycle time, OEE, downtime, and economic metrics such as return on investment. Artificial intelligence algorithms were applied to optimize operation scheduling and minimize non-productive time. The methodology includes a comparative analysis between manual and robotic work, enabling a quantitative assessment of system improvements. The collaborative robot (UR5 – Universal Robots) is equipped with advanced force sensors and safety algorithms that enable interaction with the operator in a shared workspace, which is in line with modern approaches to HRC systems [15]. Its implementation aimed to reduce handling time during the placement and removal of products from the CNC machine, to increase the repeatability of operations, and to reduce process variability caused by the human factor.

Fig. 2 shows a collaborative robot integrated with a CNC machine for loading and unloading operations of workpieces. The robot can simultaneously cooperate with multiple CNC machines, enabling a continuous production flow and reduction of downtime. This configuration highlights the application of collaborative robotics in smart manufacturing systems, with increased flexibility and productivity, as well as safe human–robot interaction without protective fences. The integration of CNC machines, cobots, and the information platform is based on the principles of Industry 4.0, where all elements are considered as part of a unified digital system [16]. This enables optimization at the level of the entire production process through the integration of hardware and software components, including MES systems and AI algorithms. The system enables continuous data collection and analysis, as well as autonomous decision-making and process adaptation in real time.



Figure 2. Collaborative robot UR5 during the execution of loading and unloading operations of workpieces on a CNC machine tool in a digitalized production environment

Data collected from CNC machines, the collaborative robot, and sensors are processed in the analytical module, where machine learning algorithms are applied to optimize cycle time and operation scheduling [17]. The study utilized models for predictive analysis of operation duration, anomaly detection, and adaptive control of task sequences. The integration of AI enables dynamic adjustment of operating parameters, thereby reducing process variability and increasing production stability. The block diagram in Fig. 3 illustrates the central role of artificial intelligence in optimization through predictive analytics and continuous system performance improvement. Particular emphasis is placed on the connectivity between CNC machines and the collaborative robot, which enables flexible automation, higher efficiency, and reduced downtime. The system also supports remote monitoring, diagnostics, and data-driven decision-making, thereby increasing production reliability. Experimental validation was performed by comparing performance before and after implementation, including cycle time, OEE, and downtime, enabling a quantitative assessment of the technical and economic effects of integration.

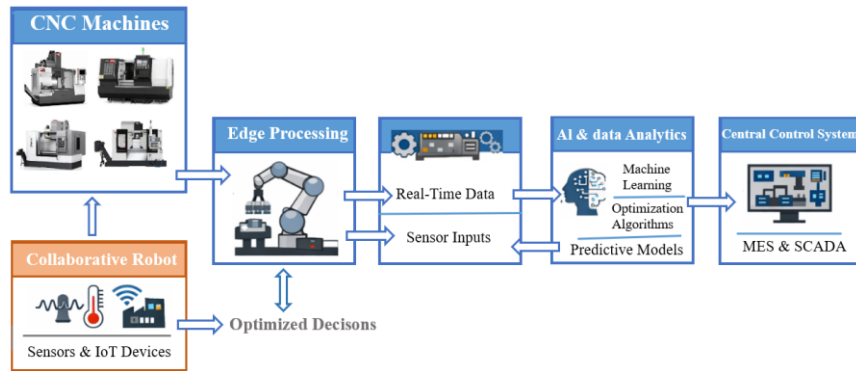


Figure 3. Architecture of a smart manufacturing system integrating CNC machines, collaborative robots, and AI analytics within the Industry 4.0 environment

### 3. RESULTS

The experimental results demonstrate significant improvements in production performance following the implementation of the collaborative robot and AI-based optimization in the CNC system. The integration of these technologies enabled a more efficient, stable, and adaptive production process, directly impacting key performance indicators such as cycle time, overall equipment effectiveness (OEE), and downtime. As shown in Table 1, cycle time was reduced from 70 seconds in manual operation to 58 seconds under robotic operation, representing a decrease of approximately 17%. This reduction is primarily attributed to faster and more consistent part handling, elimination of operator-related delays, and improved synchronization between the CNC machine and the robotic system. In addition, the robotic system ensures repeatability of operations, which minimizes variability and contributes to overall process stability.

Table 1. Cycle Time Comparison

| <i><b>Parameter</b></i> | <i><b>Manual</b></i> | <i><b>Collaborative Robot</b></i> |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Cycle Time (s)          | 70                   | 58                                |
| Reduction               | –                    | 17%                               |

A significant improvement is also observed in overall equipment effectiveness, as presented in Table 2. The OEE increased from 64.6% to 85.6%, reflecting a substantial enhancement of 21 percentage points. This improvement is the result of combined gains in availability, performance, and quality. Reduced downtime and fewer interruptions increased machine availability, while optimized task execution improved performance efficiency. At the same time, consistent handling and reduced human error contributed to maintaining stable product quality.

Table 2. OEE Comparison

| <i><b>Metric</b></i> | <i><b>Manual</b></i> | <i><b>Robot</b></i> |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| OEE (%)              | 64.6                 | 85.6                |
| Improvement          | –                    | +21%                |

Downtime analysis further confirms the benefits of the implemented system, with reductions ranging from 30% to 50%. This improvement is largely due to the application of AI algorithms, which enable adaptive optimization of process parameters and early detection of potential inefficiencies. By continuously analyzing production data, the system can adjust operational parameters in real time, reducing idle periods and preventing unnecessary stoppages. The economic impact of the proposed system is summarized in Table 3. The total investment of €35,000 is offset by annual savings of €28,800, resulting in a return on investment (ROI) of approximately 1.2 years. The estimated payback period of 12–15 months confirms the economic feasibility and attractiveness of implementing collaborative robotics combined with AI optimization, particularly for small and medium-sized enterprises. These results demonstrate that, beyond technical improvements, the system also provides measurable financial benefits.

Table 3. Economic Analysis

| <i><b>Parameter</b></i> | <i><b>Value</b></i> |
|-------------------------|---------------------|
| Investment              | €35,000             |
| Annual savings          | €28,800             |
| ROI                     | 1.2 years           |
| Payback                 | 12–15 months        |

Overall, the presented results confirm that the integration of collaborative robots and AI significantly enhances production efficiency, reduces operational variability, and improves economic performance. The findings are consistent

with recent studies highlighting the advantages of intelligent automation in Industry 4.0 environments [18-22].

#### **4. DISCUSSION**

The results of this research clearly confirm that the integration of collaborative robots and artificial intelligence algorithms significantly improves the performance of CNC production systems. The reduction of cycle time by 17% indicates a direct impact of automated machine tending and optimization of operation sequences, thereby eliminating non-productive time intervals characteristic of manual work. At the same time, the increase in OEE from 64.6% to 85.6% represents a significant improvement in overall system efficiency, as it encompasses enhancements in availability, performance, and production quality. It is particularly important to emphasize the role of artificial intelligence in reducing process variability. AI algorithms enable continuous monitoring and adaptive adjustment of operating parameters, resulting in a more stable and predictable production process. This is consistent with contemporary research highlighting the importance of predictive analytics and smart systems within Industry 4.0 [23–25]. The integration of robots and AI brings not only increased speed but also improved process control, which is crucial for high-precision manufacturing. The reduction of downtime by 30–50% further confirms the effectiveness of the implemented system. This result can be associated with the ability to detect anomalies in a timely manner and optimize operation scheduling. This minimizes waiting time between operations and increases the utilization of CNC machines. Additionally, collaborative robots enable safe operation in a shared workspace with operators, contributing to improved ergonomics and reduced human error. The economic analysis shows that the system is particularly suitable for small and medium-sized enterprises, given the relatively short return on investment period (1.2 years). These results confirm that intelligent automation is not only technologically advanced but also economically justified. However, certain limitations of the research include a focus on a single type of CNC system and a limited number of experimental scenarios. Future research should include more complex production configurations and a higher level of integration with digital twins and advanced AI models.

#### **5. CONCLUSION**

This research has shown that the integration of collaborative robots and artificial intelligence represents an effective approach to improving CNC production systems within Industry 4.0. Experimental results confirm a significant reduction in cycle time, an increase in overall equipment efficiency (OEE), and a reduction in downtime, which directly contributes to increased productivity and production reliability. The application of a collaborative robot in machine tending operations enabled greater repeatability and process stability, while reducing the influence of the human factor. At the same time, the implementation of AI algorithms enabled adaptive process control and real-time

decision-making, achieving a higher level of autonomy of the production system. Such an approach represents a key step toward the development of smart factories and digitally connected production systems. In addition to technical improvements, the results also demonstrated significant economic benefits, including a short return on investment period and reduced operational costs. This confirms that the application of collaborative robotics and artificial intelligence is justified not only from a technological but also from an economic perspective, especially for small and medium-sized enterprises. Although the results are very encouraging, there is room for further system development and improvement. Future research should focus on the application of more advanced AI methods, such as deep learning and reinforcement learning approaches, as well as on the integration of multiple CNC machines and more complex production lines. Furthermore, the development of digital twins and advanced simulation models can further enhance optimization and predictive management of production processes. In conclusion, the integration of AI and collaborative robots represents a key element of future industrial production, enabling flexible, efficient, and intelligent manufacturing systems that are aligned with the requirements of the modern market.

## REFERENCE

- [1] Bildstein, A., Seidelmann, J. (2014). *Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung*. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B. (eds) *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Vieweg, Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8_30).
- [2] Karabegović, I.; Kovačević, A.; Banjanović-Mehmedović, L. & Dašić, P. (editors): *Handbook of research on integrating Industry 4.0 in business and manufacturing*. Hershey (Pennsylvania – USA): IGI Global, 2020. – 661 pp. ISBN 978-1-7998-2725-2. doi: [10.4018/978-1-7998-2725-2](https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2725-2).
- [3] Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>.
- [4] Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>.
- [5] Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.
- [6] Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using OEE. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517–3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>.
- [7] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Springer (acatech – National Academy of Science and Engineering). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48273-2>.
- [8] Haddadin, S., & Croft, E. (2016). *Physical human–robot interaction*. Springer Handbook of Robotics. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>.
- [9] International Federation of Robotics (IFR), (2025). *Presentation of World Robotics 2025 Industrial Robots*, [https://ifr.org/downloads/press\\_docs/PressConference2025\\_presentation.pdf](https://ifr.org/downloads/press_docs/PressConference2025_presentation.pdf).
- [10] Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>.
- [11] Karabegović, I., (2017). The Role of Industry 4.0 in the Modernization of Industrial production in China, *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(9), 177–186. <http://jsaer.com/download/vol-4-iss-9-2017/JSAER2017-04-09-177-186.pdf>.
- [12] Malik, A. A., & Brem, A. (2021). Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102092. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102092>.

- [13] Marvel, J. A., & Norcross, R. (2017). Implementing collaborative robots in industrial environments: A review of safety, applications, and performance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.001>.
- [14] Sahoo, S., & Lo, C.-Y. (2022). Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.008>.
- [15] Bauer, W., Schlund, S., Hornung, T., & Schuler, S. (2021). Human–robot collaboration in Industry 4.0: A review. *Robotics*, 10(4), 98. <https://doi.org/10.3390/robotics10040098>.
- [16] Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(5), 889–907. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2018-0017>.
- [17] Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., & Thoben, K. D. (2020). Machine learning in manufacturing. *Sensors*, 20(5), 1235. <https://doi.org/10.3390/s20051235>.
- [18] Kim, J., Seo, D., Moon, J., Kim, J., Kim, H., & Jeong, J. (2022). Design and Implementation of an HCPS-Based PCB Smart Factory System for Next-Generation Intelligent Manufacturing. *Applied Sciences*, 12(15), 7645. <https://doi.org/10.3390/app12157645>.
- [19] Meindl, B., & Mendonça, J. (2021). Mapping Industry 4.0 Technologies: From Cyber-Physical Systems to Artificial Intelligence. *arXiv preprint*, arXiv:2111.14168. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.14168>.
- [20] Karabegović, I., Karabegović, E. (2019). The Role of Collaborative Service Robots in the Implementation of Industry 4.0, *International Journal of Robotics and Automation Technology*, 6, 40–46. <https://doi.org/10.31875/2409-9694.2019.06.5>.
- [21] Pisarov, J., Mester, G. (2021). Implementing New Mobility Concepts with Autonomous Self-Driving Robotic Cars. *IPSI Transactions on Advanced Research (TAR)*, 17(2), 41–49.
- [22] Mester, G. (2010). Intelligent mobile robot motion control in unstructured environments. *Acta Polytechnica Hungarica*, 7(4), 153–165.
- [23] Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118–1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>.
- [24] Karabegović, I., Karabegović, E., Mehmić, M., Husak, E. (2021). The Application of Industry 4.0 in production Processes of the Automotive Industry. *Journal Mobility and Vehicle*, 47(2), 35–44. <https://doi.org/10.24874/mvm.2021.47.02.02>.
- [25] Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>.

UDC 502.131.1: 656.6

**Sonja Ketin<sup>1</sup>, Rade Vasiljević<sup>1</sup>, Tihomir Đurić<sup>2</sup>, Rade Biočanin<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>*Academy of Technical and Art Applied Studies Belgrade (ATUSS), Belgrade, Serbia;* <sup>2</sup>*International Faculty Travnik, Travnik. Bosnia and Herzegovina*).

## SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND WATER TRANSPORT

**Abstrakt:** Water transport, particularly Inland Waterway Transport (IWT), is a key pillar of sustainable development due to its high energy efficiency, large cargo capacity, and lower environmental footprint compared to road and rail transport. Integrating water transport into broader mobility systems supports at least seven of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), including those for climate action, sustainable cities, and infrastructure innovation. Traffic is an organized movement of transport units on the



road network. Traffic is an unintended result of transport. Traffic exists only if there are transport units that range in a common network. If to engage in the history of the development of transport on inland waters, we can establish a good degree of certainty that this is one of the oldest forms of transport in general, if not the oldest. The traffic is very old because the rivers and lakes were the first affordable communications to which the primitive man could with modest technical resources and limited cognitive ability perform movements and perform some form of transport.

**Key words:** traffic, transport, tariff principles, sustainable development.

**Анотація:** Водний транспорт, зокрема внутрішній водний транспорт (ВВТ), є ключовим елементом сталого розвитку завдяки високій енергоефективності, великій вантажопідйомності та меншому впливу на навколишнє середовище порівняно з автомобільним та залізничним транспортом. Інтеграція водного транспорту в ширші системи мобільності підтримує щонайменше сім Цілей сталого розвитку Організації Об'єднаних Націй (ЦСР), включаючи цілі щодо боротьби зі зміною клімату, сталого розвитку міст та інновацій в інфраструктурі. Рух транспорту – це організоване переміщення транспортних одиниць по дорожній мережі. Рух транспорту є непередбачуваним результатом транспорту. Рух транспорту існує лише за наявності транспортних одиниць, що розташовані в спільній мережі. Якщо заглибитися в історію розвитку транспорту на внутрішніх водах, можна з великою ступенем впевненості встановити, що це один з найдавніших видів транспорту взагалі, якщо не найдавніший. Рух транспорту дуже давній, оскільки річки та озера були першими доступними комунікаціями, за допомогою яких первісна людина могла зі скромними технічними ресурсами та обмеженими когнітивними здібностями здійснювати переміщення та здійснювати певний вид транспорту.

**Ключові слова:** дорожній рух, транспорт, тарифні принципи, сталий розвиток.

## 1. INTRODUCTION

Water traffic includes traffic that takes place on water surfaces (sea, lakes, rivers, canals). However, maritime traffic is by far the most important within water transport. In terms of volume of cargo and labor productivity, maritime traffic exceeds all other types of traffic. The cost of transporting cargo by sea is the lowest of all types of traffic. Labor productivity in sea transport is 5-6 times higher than in rail and river transport, and the price is almost 2 times lower. Water traffic includes all traffic that takes place on water surfaces (sea, lakes, rivers, canals). However, maritime traffic is by far the most important within water traffic. Prehistoric man got the idea of using a waterway for movement by observing what kind of tree or branch the water was carrying and on which was a bird or some other animal.

In the further improvement of this invention, man began to use his own hands for rowing and steering, to deepen the tree and thus lower the center of gravity and increase the stability of the original floating objects, to connect several trees into a raft, etc. From rowing with his hands, he switches to rowing with a branch, which he adjusts more and more and gets an oar. By gradually increasing the size of the boat, a ship with oars was developed, which dominated water traffic for many centuries, with an increase in the number of oars and oarsmen.

It can be stated that the history of maritime traffic is very long, from the Phoenicians, through the ancient Greeks and Romans, all the way to the Middle Ages and the Great Geographical Discoveries. However, events from the beginning of the 19th century are of great importance for today's maritime traffic.

Established the first regular maritime lines around the world, especially between Europe and North America (traffic on them was maintained by fast sailing ships - clippers, whose development culminated in the period 1840-1870); the invention of the first mechanically propelled ship (Clermont), constructed in 1807 by Robert Fulton ("Clermont" maintained regular traffic on the Hudson River, USA); the first steamship trip across the Atlantic - the steamship Savannah was the first to cross the Atlantic in 1819 (New York - Liverpool) in 29 days; the first regular transatlantic passenger line was introduced in 1838; at the end of the 19th century, the Baltic Sea began to use the first ferries for the transport of railway compositions; significant improvements to steamships were: the introduction of propellers (1840) and steel reinforcement (1860).

## **2. TARIFF PRINCIPLES IN TRAFFIC**

During the application of tariffs, tariff principles were also created. The basic tariff principles are the following: the principle of publicity, the principle of equality, the principle of durability and the principle of clarity.

a) The principle of publicity - in general, tariffs must be published in the usual way and must be accessible to everyone. This is usually implied in railway tariffs, although not in all countries, e.g. in England, while tariffs in some other industries are less often published, such as in maritime traffic. In our country, tariffs must generally be published, especially in rail traffic. Various changes in tariffs, such as toll and fee increases, as well as changes and additions that make the conditions more difficult for the user, can be applied only after the 8-day period has expired.

b) The principle of equality - when all conditions for the application of tariffs are met, they must be applied to everyone equally. Discrimination of some users compared to others is not allowed, nor is the execution of transportation if the stipulated tariff conditions are met.

c) The principle of permanence - tariffs cannot and must not be changed often. Because they also serve for the calculation of future services that are included in the calculations of costs and prices of various goods, and not only for the calculation of services that are performed or that have been performed. So, tariffs must be prescribed in the long term. That term can be indefinite or definite. The largest number of tariffs are issued for an indefinite period of time. Various tariff changes, i.e. new tariffs, may come into force only after a certain period of time after their publication. This deadline is generally different in different countries.



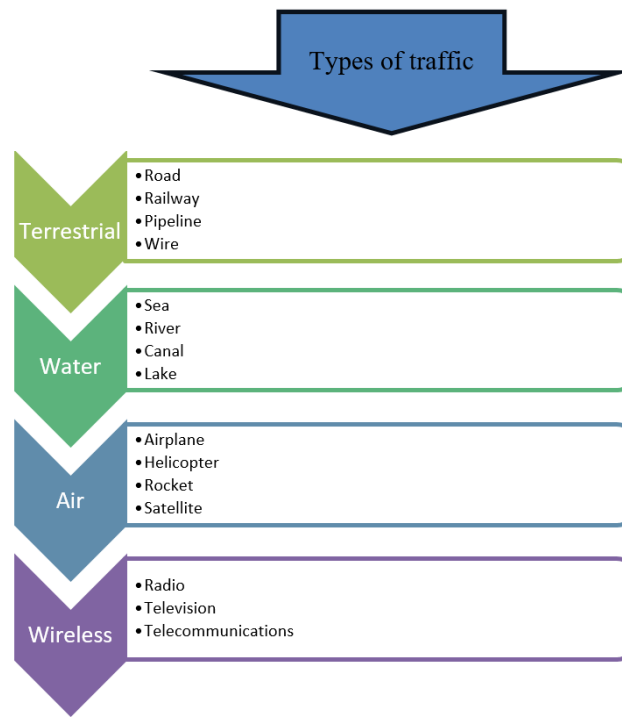


Figure 1.Types of traffic according to the place where it takes place

#### 4. TARIFFS IN MARITIME TRANSPORT

In maritime freight transport, transport tariffs exist only in liner shipping, while in free (including tanker) shipping, there are no permanent tariffs, but the price of transport is negotiated in a transport contract for each individual case. The price of free transportation is adjusted according to the supply and demand of ship space on the basis of free competition.

The specificity of maritime transport imposed the creation of a world maritime market, which was formed in London. Practically, the supply and demand of shipping tonnage from all over the world flows into the London maritime exchange. Due to the inevitable fluctuations in supply and demand, which are affected by various factors (political or economic situation, recession, etc.), transportation prices also change, there is less or more employment of ships, and ultimately crisis situations and competition in shipping.

Recently, free competition has been significantly restricted by various protectionist measures of individual countries or groups of countries, which try to transport as much cargo as possible with their own ships. By the way, in maritime tariffs, transport prices can be determined in several ways, namely:

a) according to the weight ( $W$ =Weight) of the cargo, which comes into consideration in the so-called "heavy" goods (over 1 ton per 1 m<sup>3</sup>). Freight rates for such goods are determined either for 1 metric ton, or for 1 small ton (short ton) or for 1 large ton (long ton);

b) according to the volume ( $M$ =Measurement) of the cargo, which comes into consideration in the so-called "light" goods (below 1 ton per 1 m<sup>3</sup>). Freight rates for such goods are determined per 1 m<sup>3</sup> when applying the metric system, and per 40 ft<sup>3</sup> (cft) of volume when applying the English

system. For general cargo, liner shipping companies usually offer freight rates under the W/M clause, e.g. \$10 W/M, which means that the shipper has the right to choose, i.e. to choose for a specific cargo to charge the freight according to the weight or according to the volume, i.e. whichever is more favorable to him.



Figure 4. Maritime transport as the most profitable form

## **5. PROCEDURE FOR CUSTOMS CLEARANCE OF GOODS IN PASSENGER TRAFFIC**

On the website of the Administration for Indirect Taxation of Bosnia and Herzegovina, we found the procedure for customs clearance of goods in passenger traffic. In the next part, the procedure will be presented. All goods brought into the customs territory of Bosnia and Herzegovina are subject to customs supervision and inspection measures from the moment of their entry into the customs territory, regardless of whether they are goods subject to the obligation to pay customs duties or not. This means that Bosnia and Herzegovina and foreign citizens are obliged to declare to the customs officer the goods they carry with them when crossing the customs border. In passenger traffic, a simplified way of declaring goods is applied, with the fact that the customs officer determines whether the goods that have been declared are actually imported, whether the import of goods is subject to the calculation and payment of import duties and, depending on this, determines further handling of the goods.

If the goods brought by the traveler for private purposes are not exempted from the payment of import duties, it is possible to calculate and collect import duties in a shortened procedure at the border crossing, except for goods that are subject to mandatory annual registration, under the following conditions:

- a) that the passenger carries the goods with him,
- b) that the value of the goods does not exceed the amount of 1,500 KM,
- c) that the goods are cleared at a single customs rate.

The rules on the single customs rate are an integral part of the customs tariff for the year 2013 and read, we quote: "The single customs rate of 10% ad valorem is applied to goods that are in shipments sent by natural persons from

abroad to natural persons in BiH or that are in the personal luggage of passengers".

This single customs rate of 10% will be applied, provided that the customs value of the goods subject to the payment of import duties does not exceed 1,500 KM per shipment or per passenger and provided that the import is not for commercial purposes. The unified customs rate cannot be applied to goods that, according to the Law on Excises in Bosnia and Herzegovina, are subject to the obligation to be marked with excise stamps.

If it is about shipments sent by natural persons from abroad to natural persons in BiH, the import is not for commercial purposes, if the shipments are occasional and contain goods exclusively intended for the recipient's own use or his family, and which by their type and quantity do not reflect any commercial interest, and that the sender sends them to the recipient without any payment.

If it concerns goods contained in the passenger's personal luggage, the import is not for commercial purposes, if it concerns goods that the passenger occasionally imports or brings in upon arrival from abroad, and which are exclusively intended for the passenger's own use or his family, or as a gift, and which, by their type and quantity, do not indicate that they are imported for commercial purposes.

The uniform customs rate will not be applied to goods imported under the conditions of points 1 and 2 of these Rules, if the recipient of the shipment or the passenger requests that the import duties be calculated at the customs rate prescribed in the customs tariff for those goods. In that case, taking into account the provisions on exemption from payment of import duties, import duties will be calculated at the prescribed rate, for all goods, i.e. for the entire shipment.

The passenger can request that the rate according to the customs tariff of Bosnia and Herzegovina be applied during customs clearance, in which case it is referred to the implementation of the regular customs clearance procedure at the internal customs office. If the traveler carries with him goods originating from a country with which Bosnia and Herzegovina has signed a Free Trade Agreement, preferential treatment may be applied to the goods at the request of the traveler, in accordance with the provisions of the agreement, provided that the value of the goods and personal luggage does not exceed 2,400 KM, and if it is about sent shipments, the value does not exceed 1,000 KM.

When it comes to postal traffic, it is clear from the cited Rules that the single customs rate of 10% ad valorem applies only to goods contained in shipments sent by natural persons from abroad to natural persons in BiH, provided that the customs value of the goods subject to the payment of import duties does not exceed 1,500 KM per shipment, if the shipments are occasional and contain goods exclusively intended for the recipient's own use or his family, and which by their type and quantity does not reflect any commercial interest, and that the sender sends them to the recipient without any payment. When the conditions for the application of a single customs rate are not met or when the

recipient of the shipment requests, the import duties are calculated at the customs rate prescribed in the customs tariff for those goods.

## 6.CONCLUSION

Tariff principles in traffic represent a set of rules and criteria on the basis of which the prices of transport services are formed. The goal is to establish a balance between the economic viability of the carrier and the accessibility of the service to users.

As already stated in this paper, tariffs can be applied in every aspect of human business. If the term tariff were to be seen in the narrower sense of the word, it could mean only a systematic review of prices. However, in a broader sense, tariffs include all those regulations and conditions based on which those prices are applied. In the same way, tariffs can be applied in every part of this direction. This is how we distinguish tariffs in maritime, road, air and other types of traffic. They serve us, above all, for quality organization and easier price management.

Final point: Modern tariff principles must be user-friendly, transparent and digitally supported in order for the transport system to be efficient and sustainable.

## REERENCES

1. Bulajić S., Ketin S., Tomić S., Jevtić S., Andrejić M. *Impact of passengers and goods transport on environmental protection. Fresenius Environmental Bulletin*, 2022. Vol. 31(3), pp. 2997–3005.
2. Bulajic S., Antanaskovic D., Ketin S., Tomic S., Lukic V. *Economic instruments in environmental protection – Serbian case. Fresenius Environmental Bulletin*, 2020. Vol. 29(10), pp. 9522–9527.
3. Jusufranic I., Neskovic S., Ketin S., Biocanin R. *Management of transport of hazardous materials. Fresenius Environmental Bulletin*, 2018. Vol. 27(6), pp. 4325–4331.
4. Saćirovic S., Ketin S., Vignjevic-Đorđević N. *Eco-industrial zones in the context of sustainable development of urban areas. Environmental Science and Pollution Research*, 2019.
5. Elezovic N., Ilic Komatina D., Dervisevic I., Ketin S., Dašić P. *Analysis of SWQI index of the river Ibar. Fresenius Environmental Bulletin*, 2018. Vol. 27(4), pp. 2505–2509.
6. Ketin S., Arsic M., Bjelica Vlajic I., Jevtic S. *EU Emissions Trading System (ETS) in water transport. Environmental Engineering Conference*, 2024. pp. 76–80.
7. Stefanov S., Biočanin R. *Management shipping, transportation and storage of hazardous waste in the Western Balkan countries. SIPS2019, Flogen*, 2019.
8. Popovic Dj., Djuric T., Biočanin R., Ketin S. *Innovation requirements in analysis of damages in regional transport. SIPS 2025, Philippines*.
9. Ketin S., Arsić M., Jevtić S. *Traffic and air quality control. Conference on Energy Efficiency and Sustainable Development*, 2025. pp. 240–250.
10. Arsić M., Jovanović D., Ketin S. *Management of passenger transport process. Conference on Energy Efficiency and Sustainable Development*, 2025. pp. 320–321.

**Pravdić P.<sup>1</sup>, Milosavljević Z.<sup>1</sup>, Manjenčić D.<sup>1</sup>, Dorđević V.<sup>2</sup>** (*<sup>1</sup>Academy of Professional Studies Kruševac, Department of Technical and Technological Studies, Kruševac, Serbia; <sup>2</sup>Technical College of Vocational Studies Novi Sad, Novi Sad, Serbia).*

## **APPLICATION OF ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGY OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING IN MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT AS AN INSTRUMENT OF SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL PROTECTION**

**Abstract:** *This paper examines the role of robotics and nanotechnology in modern mechanical engineering as key technologies for improving municipal waste management systems and ensuring sustainable environmental protection. The study highlights the growing challenges associated with increased waste generation due to urbanization and industrial development, emphasizing the need for innovative technological solutions. Robotics is analyzed as an effective tool for automating waste collection, sorting, and processing, enabling higher efficiency, improved safety, and reduced human exposure to hazardous conditions. In parallel, nanotechnology is considered for its potential in enhancing material properties, improving filtration processes, and enabling more efficient recycling and pollution control. The integration of these technologies within modern mechanical engineering systems allows the development of intelligent, adaptive, and energy-efficient waste management solutions. The results indicate that such integrated approaches significantly contribute to reducing environmental impact, optimizing resource utilization, and supporting circular economy principles. The research confirms the importance of interdisciplinary engineering solutions in addressing global environmental challenges.*

**Keywords:** *robotics; nanotechnology; mechanical engineering; municipal waste; environmental protection; sustainable development; recycling; circular economy.*

**Анотація:** *У статті розглянуто роль робототехніки та нанотехнологій у сучасному машинобудуванні як ключових технологій для удосконалення систем управління побутовими відходами та забезпечення сталого екологічного розвитку. Показано, що зростання обсягів відходів внаслідок урбанізації та розвитку промисловості потребує впровадження інноваційних технічних рішень. Робототехніка розглядається як ефективний інструмент автоматизації процесів збору, сортування та переробки відходів, що забезпечує підвищення ефективності, безпеки та зменшення впливу небезпечних факторів на людину. Нанотехнології аналізуються з точки зору покращення властивостей матеріалів, ефективності фільтрації та процесів переробки і очищення довкілля. Інтеграція цих технологій у системах сучасного машинобудування дозволяє створювати інтелектуальні, адаптивні та енергоефективні системи управління відходами. Отримані результати свідчать про значне зниження негативного впливу на довкілля, підвищення ефективності використання ресурсів та підтримку принципів циркулярної економіки.*

**Ключові слова:** *робототехніка; нанотехнології; машинобудування; побутові відходи; охорона довкілля; сталий розвиток; переробка; циркулярна економіка.*

## 1. INTRODUCTION

The modern development of society and accelerated urbanization have led to a significant increase in the amount of municipal waste, which represents one of the key environmental challenges of today. Inadequate waste management has negative consequences for environmental quality, human health and sustainable community development. In this context, modern mechanical engineering, with the application of robotics and nanotechnology, offers innovative solutions for the improvement of the collection, sorting, processing and disposal of municipal waste. The integration of advanced technologies enables more efficient, safer and environmentally friendly waste management, thus contributing to sustainable environmental protection. The development of modern society is accompanied by intensive technological progress, population growth and the constant expansion of urban areas. Such processes inevitably lead to increased consumption of resources and the creation of large amounts of municipal waste. Waste management is becoming one of the most significant challenges of the modern age, especially in the context of environmental protection and sustainable development. Traditional municipal waste management systems are often not efficient enough to respond to the growing demands of modern cities. Improper disposal of waste leads to pollution of soil, underground and surface water, as well as degradation of air quality. In addition to environmental consequences, this practice has serious economic and health implications. Modern approaches to waste management require the application of innovative technologies that enable reducing the negative impact on the environment. In this sense, modern mechanical engineering has a key role in the development and application of technical solutions for more efficient municipal waste management. Robotics is increasingly being recognized as an important tool in modern industrial and utility systems. Process automation enables more accurate, faster and more reliable execution of tasks compared to traditional work methods. In the field of waste management, robotic systems enable the improvement of the process of sorting, transporting and processing different types of waste. This significantly reduces the need for manual work and increases employee safety. In parallel with the development of robotics, nanotechnologies are experiencing intensive progress and find application in numerous areas of technology and industry. Their ability to improve the properties of materials and processes opens up new opportunities in environmental protection. In the context of municipal waste, nanotechnologies enable more efficient filtration of pollutants and improvement of the recycling process. In this way, it contributes to a more rational use of natural resources.

The integration of robotics and nanotechnology represents a modern approach to solving complex environmental problems. These technologies enable the development of smart systems that can independently analyze, adapt and optimize waste management processes. Such systems contribute to reducing energy consumption and increasing overall efficiency. Their application is in accordance with the principles of circular economy and sustainable

development. The role of mechanical engineers in the design, development and implementation of these modern technologies is of particular importance. Mechanical engineering represents the basis for the integration of mechanical, electronic and information systems into unique functional units. This creates technical conditions for the development of sustainable municipal waste management systems. The development of such systems represents a long-term investment in the preservation of the environment.

## **2. MUNICIPAL WASTE AND THE IMPORTANCE OF SUSTAINABLE MANAGEMENT**

Municipal waste includes waste generated in households, public institutions and service activities. Its composition is heterogeneous and includes organic waste, plastic, paper, glass, metal and other materials. Inadequate management of these types of waste leads to soil, water and air pollution, as well as to an increase in greenhouse gas emissions. Sustainable municipal waste management implies the application of the waste hierarchy, which includes waste reduction, reuse, recycling, energy recovery and, as a last resort, safe disposal. Municipal waste represents one of the most significant problems of modern urban environments. It arises as a consequence of the daily activities of the population, economy and public institutions. With the increase in population and living standards, the amount of municipal waste is continuously increasing. The composition of this waste is very diverse and includes organic matter, plastic, paper, glass, metal and hazardous components in smaller quantities. It is precisely this heterogeneity that makes it difficult to classify and process it properly. Unsustainable municipal waste management leads to numerous negative consequences for the environment. Uncontrolled waste disposal causes soil and groundwater pollution. The decomposition processes of organic waste produce gases that negatively affect air quality. Waste dumps are often a source of unpleasant odors and hotspots of infectious diseases. In the long term, this practice threatens human health and ecosystem stability. Sustainable management of municipal waste implies a systematic and planned approach to its treatment. This concept is based on the principles of waste reduction, reuse and recycling. Special emphasis is placed on the rational use of natural resources. Effective waste management contributes to reducing the amount of material that ends up in landfills. This extends the life of existing landfills. The importance of sustainable management is also reflected in the economic aspect. Recycling enables the reuse of valuable raw materials. This reduces production costs and dependence on natural resources. Modern waste management systems contribute to the development of new industries. They open up opportunities for employment and technological progress. Sustainable municipal waste management requires the application of modern technologies and a multidisciplinary approach. The role of technical sciences, especially mechanical engineering, is of key importance in this process. The development of efficient systems for the collection and processing of waste is the basis for long-term preservation of the environment. That is why sustainable municipal

waste management is considered one of the priorities of modern society. The modern concept of municipal waste management requires a transition from linear to integrated management systems.

The linear model, which implies production, consumption and disposal, has proven to be unsustainable in the long term. This approach leads to excessive exploitation of natural resources. At the same time, the amount of waste ending up in landfills is increasing. Landfill space is becoming an increasingly limited resource in urban areas. One of the key problems in municipal waste management is insufficiently developed infrastructure. In many environments, there is no adequate equipment for the selective collection of waste. The lack of technical and financial resources further complicates the implementation of sustainable solutions. Also, the low level of environmental awareness of the population represents a significant obstacle. Without the active participation of citizens, efficient waste management systems cannot be fully implemented. Sustainable municipal waste management also requires appropriate legislation. Correctly defined regulations enable control and supervision of waste management processes. Their application encourages the responsible behavior of all participants in the system. Special attention is paid to the prevention of waste generation. Reducing the amount of waste at the source is the most effective measure of environmental protection. In modern waste management systems, the concept of circular economy is of increasing importance. This concept implies that waste is viewed as a potential resource.

The reuse of materials contributes to reducing the consumption of energy and raw materials. In this way, positive environmental and economic effects are achieved. Municipal waste management is becoming an integral part of the sustainable development of society. The development of new technologies enables the improvement of all phases of waste management. Modern technical solutions enable more precise monitoring of waste flows. This ensures better process control and greater system efficiency. Sustainable municipal waste management represents a long-term strategy for environmental protection. Its application has a key role in preserving natural resources for future generations.

### **3. THE ROLE OF ROBOTICS IN MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT**

Robotics represents one of the key areas of modern mechanical engineering, which is increasingly used in waste management systems. Industrial and service robots are used in waste sorting facilities, where they use sensors, cameras and artificial intelligence to recognize and separate different types of materials. Such systems allow greater speed and accuracy of sorting compared to manual work, while reducing the exposure of workers to harmful and dangerous working conditions. Autonomous robotic vehicles are increasingly being used for waste collection in urban areas, reducing operating costs and fuel consumption. Robots are also used in hazardous environments, such as landfills and waste processing plants, where they perform tasks that would be risky for humans. In this way, robotics contributes to increasing the safety, efficiency and sustainability of the municipal waste management system.



Robotics, as a field of modern mechanical engineering, plays an increasingly important role in the improvement of the municipal waste management system. The development of automated systems made it possible to perform complex and repetitive tasks more efficiently. In waste treatment plants, robots are used to sort different materials. These systems can recognize plastic, metal, paper and glass with high precision. In this way, the degree of recycling is significantly increased. The application of robotics contributes to reducing the need for manual work in unfavorable conditions. Workers are often exposed to hazards such as sharp objects, dust and harmful substances. Robotic systems take over the riskiest operations. This increases employee safety and reduces the risk of injuries. Process automation also enables continuous operation without interruption. Autonomous robots and vehicles are increasingly being used in the municipal waste collection phase. Such systems enable the optimization of routes and the reduction of fuel consumption. This directly reduces the emission of harmful gases. Smart robots can monitor the filling of containers and adjust the dynamics of emptying. This approach contributes to a more rational use of resources. Robotics also plays an important role in work at waste dumps. Robots are used to compact, move and cover waste. In dangerous zones, where there is a risk of collapse or emission of harmful gases, robots replace human work. This significantly improves the security of the entire system. Robotic surveillance also enables monitoring of landfill conditions in real time. The integration of robotics into municipal waste management systems contributes to an increase in overall efficiency. The precision and speed of robotic systems enable better process control. Such solutions are in accordance with modern principles of sustainable development. The further development of robotics represents an important step towards the creation of smart and environmentally friendly cities.

The role of robotics in this field is of increasing importance in the future. Further development of robotics enabled the application of advanced systems in all phases of municipal waste management. Modern robots are equipped with sensors, cameras and intelligent control systems. Such technology enables autonomous decision-making during work. Robots can adapt their activities to changing conditions in real time. This makes the system more flexible. In waste processing plants, robots enable stable process quality. Their precision reduces errors that are common in manual work. Automated systems can work continuously, without being affected by fatigue. This leads to increased productivity and reduced operating costs. In the long term, investing in robotics brings significant economic benefits. Robotics also plays a significant role in the control and monitoring of the waste management system. Robots and automated devices enable constant monitoring of key parameters. Based on the collected data, it is possible to optimize work processes. Potential problems and malfunctions are detected in a timely manner. This reduces downtime and unforeseen maintenance costs. The application of robotics also contributes to reducing the negative impact on the environment. More precise sorting of waste enables a higher degree of recycling. This reduces the amount of waste that ends

up in landfills. Automated systems also enable more rational energy consumption. More efficient management of resources has direct ecological significance. The development of smart cities further increases the importance of robotics in the field of utility systems. Robotic systems are becoming an integral part of urban infrastructure. Their application contributes to improving the quality of life of the population. Robotics enables the transition to sustainable and environmentally friendly models of waste management. In the future, an even wider application of robotic technologies in this area is expected.

#### **4. APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES IN THE FIELD OF WASTE AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Nanotechnologies represent an interdisciplinary field that deals with the manipulation of matter at the level of atoms and molecules. In the field of municipal waste management, nanotechnologies find application in the development of new materials and processes for waste treatment and environmental protection. Nanomaterials are used to improve the efficiency of filtration of pollutants from water and air, as well as to neutralize hazardous substances present in waste. The application of nanocatalysts in the processes of decomposition of organic waste and wastewater treatment is of particular importance. Also, the development of nanocomposite materials enables the production of lighter, more durable and more environmentally friendly products, which indirectly reduces the amount of waste. Nanotechnologies also contribute to the improvement of the recycling process, enabling more efficient separation and reuse of valuable raw materials. Nanotechnologies represent one of the most promising areas of modern science and technology. They are based on the study and application of materials and structures whose dimensions are in the nanometer range. Such materials have specific physical, chemical and mechanical properties that differ significantly from the properties of macroscopic materials. These properties enable their wide application in the field of environmental protection. In the context of municipal waste management, nanotechnologies offer innovative solutions for reducing pollution. One of the significant applications of nanotechnologies relates to the treatment of waste water. Nanomaterials are used in filters to remove heavy metals, organic pollutants and microorganisms. Their large specific surface enables high adsorption efficiency.

This improves the quality of the water that returns to the natural cycle. Such systems contribute to the preservation of water resources. Nanotechnologies also play an important role in air pollution control. Nanocatalysts have been developed that enable the decomposition of harmful gases. These materials are used in flue gas purification systems. Their application leads to a reduction in the emission of harmful substances into the atmosphere. This directly affects the improvement of air quality in urban areas. In the field of municipal waste management, nanotechnologies are used to improve the recycling process. Nanomaterials enable more efficient separation of complex materials. Their application in the recycling of plastic and electronic

waste is particularly important. This increases the use of secondary raw materials. This approach contributes to reducing the need to exploit natural resources. Nanotechnologies are also applied in the development of biodegradable materials. These materials make it possible to reduce the amount of waste that remains in nature for a long time. Their application is of particular importance in the packaging industry. The development of environmentally friendly products contributes to the prevention of waste generation. This results in long-term environmental benefits. The importance of nanotechnologies is also reflected in the remediation of polluted surfaces. Nanomaterials are used to bind and neutralize hazardous substances in the soil. These processes enable the restoration of degraded ecosystems. This creates the possibility of reuse of land. Application of nanotechnologies represents an important step towards sustainable environmental protection.

## **5. INTEGRATION OF ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGY IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

Modern mechanical engineering has a key role in the integration of robotics and nanotechnologies into unique municipal waste management systems. The design and development of advanced machine systems enable the application of robotic solutions with the use of nanomaterials, which achieves better technical and environmental results. Such integrated systems contribute to reducing energy consumption, increasing equipment reliability and extending its working life. The application of these technologies enables the transition from traditional models of waste management to smart and sustainable systems, which are in accordance with the principles of the circular economy. This reduces the negative impact on the environment and creates conditions for long-term sustainable development. Modern mechanical engineering represents the basis for the integration of various advanced technologies. The development of robotics and nanotechnology has significantly improved the possibilities of mechanical engineering. Their integration enables the creation of intelligent and efficient technical systems. Such systems are widely used in industry, energy and environmental protection. They are of particular importance in the area of municipal waste management. The integration of robotics and nanotechnology makes it possible to improve the performance of machine systems. Robots equipped with nanomaterials have greater durability and precision. The application of nanotechnologies contributes to reducing wear and extending the service life of equipment. This reduces maintenance costs. The efficiency of the entire system increases significantly. In modern waste treatment plants, robotic systems use nanotechnology sensors. These sensors enable precise detection and identification of materials. Based on the collected data, the robots make decisions in real time. This achieves a high degree of automation. Processes become more reliable and stable. Integrated systems also enable better energy efficiency. Nanomaterials contribute to the reduction of energy consumption in mechanical components. Robots optimize work cycles and reduce losses. This approach has a direct positive impact on the environment. The emission of

harmful gases is reduced. Modern mechanical engineering has a key role in the design of such integrated systems. Mechanical engineers connect mechanical, electronic and information-control components. The integration of robotics and nanotechnology requires multidisciplinary knowledge. This opens up new opportunities for the development of innovative solutions. Such systems are the basis of smart industrial and utility systems. Application of integrated technologies contributes to the development of sustainable technical solutions. Sustainable waste management systems are becoming more efficient and environmentally friendly. The integration of robotics and nanotechnology enables the transition to advanced resource management models. This reduces the negative impact on the environment. Modern mechanical engineering has a key role in the realization of these goals. The development of these technologies has long-term significance for society. Integrated systems represent the foundation of future technological development. Their application contributes to improving the quality of life. Sustainable solutions are becoming the standard of modern engineering. The integration of robotics and nanotechnology represents one of the most important directions in the development of modern mechanical engineering.

## **6. CONCLUSION**

Municipal waste management represents one of the key challenges of modern society and requires the application of modern technological solutions. The increase in the amount of waste is conditioned by the growth of the population, urbanization and the development of the consumer society. Traditional models of waste management have proven to be insufficiently effective in the conditions of modern environmental requirements. Therefore, it is necessary to apply innovative approaches based on the development of technique and engineering. Modern mechanical engineering, through the application of robotics and nanotechnology, provides significant opportunities for the improvement of municipal waste management systems. Robotic systems enable the automation of waste collection, sorting and processing processes. Their application contributes to increasing efficiency and reducing the risk to human health. At the same time, the need for manual work in dangerous and unfavorable conditions is reduced. Nanotechnologies enable the development of new materials and processes that improve environmental protection. Their application in the treatment of waste water, air and soil contributes to the reduction of pollution. Improving the recycling process and developing biodegradable materials represent an important step towards sustainable resource management. This reduces the pressure on natural resources and ecosystems. The integration of robotics and nanotechnology in modern mechanical engineering enables the creation of smart and sustainable systems. Such systems ensure better process control and more rational use of energy. Their application is in accordance with the principles of sustainable development and circular economy. This achieves long-term benefits for both society and the environment. The role of mechanical engineers in the design and

implementation of these technologies is of particular importance. A multidisciplinary approach enables effective application of modern solutions in practice. The development of such systems requires continuous improvement and research. In the future, an even greater application of robotics and nanotechnologies is expected in the area of municipal waste management. Based on the above, it can be concluded that the application of modern technologies is a necessary condition for sustainable environmental protection. Further development and integration of robotics and nanotechnology will play a key role in improving the quality of life. Sustainable municipal waste management is becoming a strategic goal of modern society. Modern mechanical engineering plays a crucial role in achieving that goal.

## REFERENCES

1. Peavy H. S., Row K. *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*. McGraw-Hill Education, 2014.
2. Tchobanoglous G., Kreith F. *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill, 2002.
3. Craig J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Education, 2018.
4. Kumar V., Kumar A. *Nanotechnology for Environmental Protection*. Springer, 2019.
5. World Bank. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications, 2018.
6. European Commission. *Circular Economy Action Plan*. European Union, 2020.
7. Wang X., Chen Y. *Nanomaterials in Wastewater Treatment*. Elsevier, 2017.
8. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.
9. United Nations Environment Programme. *Global Environment Outlook*. UNEP, 2019.
10. Allwood J. M., Cullen J. M. *Sustainable Materials: With Both Eyes Open*. UIT Cambridge, 2012.
11. Budynas R. G., Nisbett J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill, 2015.

UDC 504.06:621

**Pravdić P.<sup>1</sup>, Milosavljević Z.<sup>1</sup>, Manjenčić D.<sup>1</sup>, Dorđević V.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup> *Academy of Professional Studies Kruševac, Department of Technical and Technological Studies, Kruševac, Serbia;* <sup>2</sup> *Technical College of Vocational Studies Novi Sad, Novi Sad, Serbia*).

## INTEGRATION OF ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGIES OF MODERN MECHANICAL ENGINEERING INTO MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT SYSTEMS TO IMPROVE ECOLOGICAL SAFETY AND SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL PROTECTION

**Abstract:** *This paper investigates the integration of robotics and nanotechnologies in modern mechanical engineering as an advanced approach to improving municipal waste management systems and enhancing environmental safety. The study analyzes sustainable waste management strategies, including collection, sorting, recycling, and treatment of hazardous materials, emphasizing the need for innovative technological solutions. Special attention is given to the role of robotic systems and nanosensors in increasing efficiency,*

precision, and operational safety. The research highlights the ability of robotic automation to reduce manual labor, optimize processes, and improve reliability, while nanotechnologies contribute to enhanced material properties, pollutant filtration, and recycling efficiency. The synergy of robotics and nanotechnologies enables the development of intelligent waste management systems capable of real-time monitoring, adaptive control, and predictive optimization. The findings confirm that the integration of these technologies significantly contributes to sustainable environmental protection, rational resource utilization, and the development of smart and resilient urban infrastructure.

**Keywords:** municipal waste; robotics; nanotechnology; sustainable management; environmental safety; recycling; smart systems; mechanical engineering.

**Анотація:** У статті досліджено інтеграцію робототехніки та нанотехнологій у сучасному машинобудуванні як ефективний підхід до вдосконалення систем управління побутовими відходами та підвищення рівня екологічної безпеки. Проаналізовано стратегії сталого управління відходами, включаючи їх збір, сортування, переробку та обробку небезпечних матеріалів, із акцентом на необхідність впровадження інноваційних технологічних рішень. Особливу увагу приділено ролі роботизованих систем і наносенсорів у підвищенні ефективності, точності та безпеки процесів. Показано, що автоматизація на основі робототехніки дозволяє зменшити обсяг ручної праці, оптимізувати процеси та підвищити надійність систем, тоді як нанотехнології сприяють покращенню властивостей матеріалів, фільтрації забруднювачів і ефективності переробки. Синергія цих технологій забезпечує створення інтелектуальних систем управління відходами з можливістю моніторингу в реальному часі, адаптивного керування та прогнозової оптимізації.

**Ключові слова:** побутові відходи; робототехніка; нанотехнології; стале управління; екологічна безпека; переробка; інтелектуальні системи; машинобудування.

## 1. INTRODUCTION

Modern society faces growing challenges in the field of environmental protection, especially when it comes to municipal waste management. The increase in urban areas and the growth of living standards directly affect the amount of generated waste, which imposes the need for new and more efficient management systems. Traditional approaches often fail to ensure adequate ecosystem protection and citizen safety, which requires the application of modern technologies. The development of modern mechanical engineering and the application of automation are key factors in the improvement of waste processing and treatment systems. Robotics enables accurate and efficient sorting of materials, reduces the need for manual work in risky conditions and increases employee safety. At the same time, nanotechnologies contribute to the development of materials and processes that improve the treatment of waste water, air and soil, increasing the efficiency of recycling and reducing the negative impact on nature. The integration of robotics and nanotechnology enables the creation of intelligent systems that can analyze and optimize processes in real time. Smart waste management systems reduce the consumption of energy and resources, reduce the emission of harmful gases and contribute to sustainable development. In addition to the technical aspect, a multidisciplinary approach is essential, including mechanical engineering,

electronics, information management and environmental sciences. Municipal waste management is no longer just a matter of operational logistics, but is becoming a strategic element of sustainable development. Efficient systems enable the rational use of resources, reduce the amount of waste in landfills and enable the restoration of degraded ecosystems. The aim of this work is to show how modern technologies, specifically robotics and nanotechnologies, can contribute to the improvement of municipal waste management and environmental protection. New solutions in this area enable better planning and monitoring of all stages of the process, from waste collection, through sorting, to recycling and final disposal. Digitization and automation of processes additionally increase the reliability and economy of the system. The application of advanced technologies contributes to the reduction of operating costs, improves the quality of work and ensures long-term sustainability. In this context, the role of mechanical engineers and other specialists becomes central.

Their knowledge enables the integration of various technologies into functional, sustainable and environmentally friendly systems. The development of such systems not only contributes to environmental protection, but also has economic and social benefits, opening up space for innovation, new jobs and technological progress.

## **2. CHALLENGES AND STRATEGIES OF MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT**

Municipal waste is an increasingly present problem in modern urban environments and represents a challenge for both local governments and industrial systems. It is created as a consequence of the daily activities of the population, the economy and public institutions, and the composition of waste is diverse and includes organic matter, plastic, paper, glass, metal and dangerous substances. It is precisely the heterogeneity of waste that makes it difficult to properly sort and process it. Inadequate waste management has serious environmental consequences, including soil, water and air pollution. The processes of decomposition of organic waste lead to the emission of gases with a negative impact on the atmosphere. Landfills represent potential sources of unpleasant odors, microbiological risks and long-term ecosystem degradation. All these consequences directly threaten people's health and the stability of natural systems. Sustainable municipal waste management requires a systematic and planned approach, including waste reduction, reuse and recycling. Special emphasis is placed on the rational use of natural resources, which reduces the need for new raw materials. Efficient systems allow extending the life of existing landfills and reducing negative environmental impact. The implementation of sustainable systems includes adequate infrastructure, employee training, public education and timely monitoring of the waste flow. A multidisciplinary approach enables better planning and organization of the process. Legislation and local regulations play a key role in controlling and monitoring the process, encouraging responsible behavior by all participants.

The concept of circular economy, in which waste becomes a resource, is of increasing importance in modern systems. Recycling and reuse of materials reduces pressure on natural resources and provides economic benefits. Reducing the generation of waste at the source represents the most effective strategy for environmental protection, while technology enables precise monitoring and optimization of the process. Municipal waste represents a complex problem that requires a multidisciplinary approach. Every urban environment has a specific composition of waste, which requires adapted methods of collection, transport and processing. Organic waste, plastic, metal, paper, glass and electronic waste require different treatment methods. Unsustainable waste management leads to soil, underground and surface water pollution, as well as the emission of harmful gases. Waste dumps become a source of microbiological and chemical hazards. Pollution affects biodiversity, land and water ecosystems, and in the long term it can disrupt the climate balance. Sustainable municipal waste management requires planning of all phases - from collection, through sorting, to recycling and final disposal. Efficient infrastructure and modern monitoring systems enable precise control of the amount of waste and process optimization. Citizen education and raising environmental awareness also play a key role in reducing waste generation. Waste reduction strategies include the "3R" concept - Reduce, Reuse, Recycle. Application of these principles contributes to more rational consumption of resources and reduction of negative impact on the environment.

In addition, technological progress enables the development of new materials and biodegradable products. Modern waste management systems use software solutions to track waste flows. Smart sensors and IoT devices enable the optimization of waste collection and transport routes, which reduces CO<sub>2</sub> emissions and fuel costs. Digitization of processes contributes to greater transparency and efficiency. Legislation and regulations are essential to the implementation of sustainable systems. Clearly defined standards for disposal, recycling and waste treatment encourage responsible behavior by all participants. Local governments and industry must harmonize their activities with national and international regulations. The application of modern technologies in this area enables the reduction of the human factor in risky processes. Automation reduces workers' exposure to harmful substances and physical hazards. Robots can perform tasks that are dangerous or monotonous, increasing productivity and reducing injuries. Municipal waste management in accordance with the principles of the circular economy contributes to the preservation of natural resources. Recycled materials re-enter the production process, reducing the need for exploitation of new raw materials. This is especially important for metals, plastics and paper, the production of which consumes large amounts of energy. The integration of education, legal frameworks, technological solutions and industrial procedures enables the creation of sustainable and environmentally friendly systems. In addition to reducing environmental risks, this contributes to economic savings and increased competitiveness of local and national waste management systems.



### **3. APPLICATION OF ROBOTICS IN MODERN WASTE MANAGEMENT SYSTEMS**

Robotics has become a key component of modern municipal waste management systems. Modern robots are equipped with sensors, cameras and intelligent algorithms, which enables them to autonomously sort and recognize materials. Accurate sorting increases the degree of recycling and reduces the amount of waste that ends up in landfills. Process automation also reduces the need for manual work in hazardous and uncomfortable conditions. The use of robots contributes to increasing efficiency, reducing operating costs and increasing system reliability. Autonomous vehicles and robotic arms enable optimization of transport routes and processes, while waste processing robots reduce the risk of employee injuries. Further applications include monitoring the condition of landfills, controlling gas emissions and monitoring container occupancy in real time. Integrating robotics with smart sensors and software systems enables data collection for process optimization. Based on data analysis, it is possible to predict failures, optimize work cycles and improve recycling strategies. Robotics contributes to the reduction of harmful gas emissions and more rational energy consumption, which directly improves environmental safety. The development of smart cities further increases the importance of robotics. Robotic systems become part of urban infrastructure and enable more efficient management of resources. Sustainable and environmentally friendly models of waste management are becoming realistic, while technology enables better control and planning of all stages of the process. Robotics in the field of municipal waste management enables efficient sorting, transportation and processing of different types of waste. Robots can recognize and separate materials based on color, weight, shape and other characteristics. Automating these processes increases accuracy and reduces human error. Autonomous waste collection vehicles optimize routes and reduce fuel consumption. In this way, the emission of harmful gases is reduced and contributes to the preservation of the environment. Waste processing robots reduce the risk of employee injuries and enable continuous work without interruption. Smart sensors integrated into robotic systems enable monitoring of the state of waste in real time. Robots can detect overfilling of containers, identify hazardous materials and automatically adjust their activities. This increases the efficiency of the system and reduces the number of failures. In recycling plants, robots enable precise separation of materials, which increases the degree of recycling and the quality of final products. Automated systems can work continuously, without fatigue or errors, which increases productivity. The robots can also monitor the level of gas emissions and control temperatures during waste processing. Further applications of robotics include working in risky and adverse conditions, such as landfills or facilities with hazardous chemicals. Automated systems take over dangerous tasks and reduce human exposure to harmful factors. This increases the security and reliability of the system. Robots are also used for real-time data monitoring and analysis. The collected data enables optimization of the process,

timely detection of faults and improvement of waste management strategies. Data analytics enables predictive maintenance and rationalization of resources.

The application of robotics contributes to reducing the negative impact on the environment. Accurate sorting of waste reduces the amount of material in landfills, optimizes recycling and contributes to rational energy consumption. Robotic systems enable integration with smart city and environmental networks, creating a sustainable urban infrastructure. Further integration of robotics with nanotechnologies and digital systems is expected in the future. Intelligent robots will be able to independently analyze and adjust processes, improving efficiency and reducing costs. Such integration represents a new generation of environmentally friendly municipal waste management systems.

#### **4. APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES IN THE FIELD OF WASTE AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Nanotechnologies enable innovative solutions in the treatment and processing of municipal waste. The application of nanomaterials in filtration enables the removal of micro- and nano-particles from waste water, which significantly reduces the pollution of rivers and lakes. Nanoporous materials improve the selectivity and efficiency of pollutant adsorption. In solid waste processing, nanotechnologies enable better separation of waste components. Nanomaterials are used in sensors that recognize the chemical composition of waste, which increases the precision of sorting. These materials can recognize toxins, heavy metals and other hazardous substances in real time. Nanotechnologies enable the development of catalysts to reduce the emission of harmful gases. Catalytic nanomaterials accelerate the decomposition of organic matter and reduce methane emissions from landfills. This reduces the negative impact on climate change and improves environmental safety. Nanotechnology enables the creation of antibacterial and self-cleaning surfaces in waste treatment plants. These surfaces reduce the spread of microorganisms and ensure a hygienic standard. Nanomaterials can also improve the efficiency of thermal and chemical waste treatment. In the process of recycling plastics and metals, nanotechnologies increase the quality and purity of the obtained materials. Nanocoatings improve the resistance of the material and reduce the need for additional chemical treatment. These approaches make recycled materials competitive in industrial production. The application of nanotechnologies in municipal waste contributes to sustainable environmental protection by reducing the amount of waste that ends up in landfills. This extends the life of existing landfills and reduces rehabilitation costs. Nanotechnologies enable precise monitoring and control of emissions, which contributes to better environmental policy. Nanomaterials are also used in air treatment, where they remove polluting particles and toxins. Nanofilter systems reduce the emission of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles, improving urban air quality. In combination with sensors, nanotechnologies enable automatic adjustment of the system in real time. Further applications include the development of nanosensors for the detection of

hazardous waste. These sensors can detect electronic, chemical and biological waste, increasing the safety of workers and the public. Smart nanosensors enable integration with robotics and digital control systems. Nanotechnologies also enable the development of new environmentally friendly packaging materials, which reduces the generation of waste. Biodegradable nano-coated films and composites contribute to the reduction of plastic in nature. This supports the principle of circular economy and more rational use of resources. The integration of nanotechnologies with existing facilities enables the optimization of the waste processing process. Nano-preparations increase the speed and efficiency of chemical and biological reactions, reducing processing time. This provides an economic and environmental benefit, and the system becomes more sustainable and flexible. Nanotechnologies also enable the development of advanced materials for the absorption of heavy metals from wastewater, including lead, cadmium and mercury. The use of nanostructured catalysts reduces the emission of harmful gases during the biodegradation of waste. Nanofilter systems contribute to the preservation of local ecosystems because they remove small particles that would otherwise contaminate soil and water. Nanomaterials also enable the improvement of the bio-remediation process, where microorganisms break down organic waste. Nanosensors can monitor the presence of toxins and adjust the operation of bio-processes in real time. In this way, the efficiency of waste treatment increases significantly, and the negative effects on the environment are minimized. Nanotechnology is also used in the treatment of aerosols and particles in the air, especially in industrial plants.

Combined with digital systems, nanosensors enable automatic adjustment of the air cleaning process. The application of nanotechnology in the recycling of metals and plastics enables a more precise separation of materials and increases the quality of the obtained products. Nanomaterials reduce chemical reactions of unwanted degradation, thus extending the durability of recycled materials. These processes enable greater competitiveness of recycled materials in industrial production. Nano-preparations are also used in composting treatment, where they accelerate the decomposition of organic matter. Nanomaterials improve aeration and moisture retention, which contributes to more efficient production of quality compost. This reduces the need for chemical fertilizers and contributes to sustainable agriculture. Further applications include the development of nanosensors for the detection of electronic waste, batteries and hazardous chemicals. These sensors enable early recognition of hazardous materials and prevent environmental pollution. The integration of nanosensors with information systems enables automatic adaptation of the processing process. Nanotechnology enables the development of environmentally friendly packaging materials. Biodegradable nano-coated composites reduce the use of plastic and contribute to the reduction of waste in nature. These materials can be recycled or composted, thus supporting the circular economy. The application of nanotechnologies in waste treatment facilities contributes to reducing the emission of unpleasant odors. Nano-

adsorbents remove sulfides and ammonia from the air, thereby improving the quality of the environment in urban areas. Nanomaterials are also used in the development of smart detectors that recognize changes in the composition of waste. These systems enable timely response to potentially hazardous waste.

Robotic systems and nanotechnologies together enable automatic process optimization and reduction of the human factor. The use of nanotechnologies also contributes to the reduction of energy consumption in waste treatment plants. More efficient decomposition and filtration processes reduce the need for additional energy and thereby improve economic and environmental performance.

## **5. SMART WASTE MANAGEMENT SYSTEMS: SYNERGY OF ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGY**

The integration of robotics and nanotechnology represents a new generation of municipal waste management systems. Robotic systems use nanosensors and nanomaterials for precise recognition and sorting of materials. This achieves greater efficiency and reduces operating costs. Smart robots can analyze the chemical and physical composition of waste in real time thanks to nanosensors. Based on the collected data, robotic algorithms adjust activities and optimize sorting and processing processes. Integration enables autonomous management of the entire system. Nanotechnology advances robotics by increasing the resistance and functionality of materials. Robots can work in aggressive conditions, at high temperatures and in contact with chemically dangerous substances. Nanocoatings reduce the wear of parts and extend the service life of the equipment. Integrated systems enable real-time waste flow monitoring, precise gas emission control and automatic process optimization. Robotic nanosystems reduce the human factor, the risk of injuries and the emission of harmful gases. This improves environmental safety and reduces the negative impact on the environment. The application of these technologies contributes to the reduction of operating costs and the increase of productivity. Robotic-nanotechnological systems can work continuously, adapting to changing conditions and the type of waste. These systems enable accurate performance monitoring and predictive maintenance. The integration of robotics and nanotechnology into modern mechanical engineering contributes to the development of sustainable urban systems. Smart robotic systems can manage the collection, transport and processing of waste, while nanosensors enable the detection of hazardous materials. This ensures a high degree of safety and efficiency. These systems also support the principles of the circular economy. Materials are precisely sorted and recycled, reducing the amount of waste in landfills. Nanotechnology enables high-quality processing and the creation of new materials, which reduces the need for exploitation of raw materials. A further advantage of integrated systems is the ability to scale and adapt to different urban environments. The modular design enables application in large and small cities, as well as in industrial plants. The system can be upgraded with new algorithms, sensors and robots. The integration of robotics and

nanotechnology enables the development of new patterns of urban planning and sustainable logistics systems. Intelligent systems monitor waste flows, optimize routes, monitor container occupancy and detect anomalies in plant operation.

This contributes to the reduction of resource consumption and emissions of harmful gases. The combination of robotics and nanotechnology lays the foundations for the development of smart cities. Smart waste management systems enable better environmental policy, protection of residents' health and preservation of natural resources. This approach represents the future of sustainable municipal waste management. The integration of robotics and nanotechnology enables the creation of intelligent systems that monitor the entire waste stream. Robotic arms with nanosensors can precisely separate different types of materials, including plastic, metal and organic matter. This increases the degree of recycling and reduces the amount of waste in landfills. Smart systems enable automatic adjustment of robot activity based on data collected by nanosensors. Robotic systems can identify hazardous materials and isolate them, increasing employee safety and reducing the risk of contamination.

Nanotechnology contributes to increasing the resistance of robotic components and reducing the wear of parts. Nano-coatings reduce friction and extend equipment life, while robotic systems can operate in aggressive environments. Smart systems collect data in real time, enabling analytics and process optimization. Automated waste flow control reduces operating costs and increases productivity. Robotic systems can monitor the temperature, chemical composition and amount of waste, adjusting the processing and transport processes. Integration enables modularity and scalability of the system. Robotic-nanotechnological systems can be applied in various urban environments, as well as in industrial plants. The modular design allows the upgrade of new sensors, algorithms and robotic components. Smart systems support the concept of a circular economy because they enable precise sorting and recycling of materials. Nanotechnology improves the quality of recycled materials, while robotics optimizes sorting and processing processes. These systems enable the reduction of harmful gas emissions and rational energy consumption. Smart systems can monitor the condition of containers and landfills in real time. Based on data analysis, optimal routes for waste collection can be planned and timely response to overfilling of containers. Further applications include integration with city information networks, where robotic-nanotechnology systems become part of a smart city. Such systems enable better planning, control and monitoring of the environmental performance of urban areas. Smart systems enable predictive maintenance and fault identification. Robotic components with nanosensors can detect wear or damage, preventing downtime and increasing system efficiency. The application of these systems contributes to the protection of citizens' health. The risk of contact with hazardous materials and harmful emissions is reduced, while the quality of the environment is increased. This synergy of technologies represents a new generation of sustainable and

intelligent municipal waste management systems, which combines environmental efficiency, economic sustainability and technological innovation.

## **6. CONCLUSION**

Modern municipal waste management systems face complex challenges that require a multidisciplinary approach and the application of advanced technologies. The increase in the amount of waste, the growth of urban areas and the complexity of materials make traditional methods less efficient. The integration of robotics and nanotechnology enables the improvement of all stages of the process - from collection, through sorting, to recycling and final disposal. Application of robotics contributes to increasing efficiency, precision and safety in working with waste. Robotic systems reduce the human factor and worker exposure to hazardous materials. Autonomous vehicles and robotic arms enable optimization of routes, continuity of work and reduction of operating costs. Nanotechnologies enable the development of sensors and materials that increase the quality of waste treatment. Nano-coated filters and catalysts reduce the emission of harmful gases and improve the process of material decomposition. Nanomaterials increase the efficiency of recycling, reduce wear and tear on equipment and enable better separation of materials. The synergy of robotics and nanotechnology creates intelligent systems that monitor the flow of waste in real time and automatically adjust processes. Smart systems enable predictive maintenance, failure identification and resource optimization. Such systems contribute to reducing the negative impact on the environment and increasing environmental safety. The application of modern technologies enables efficient management of different types of waste - from organic, through metal and plastic, to hazardous and electronic waste. Robotic nanotechnology systems can recognize hazardous materials, isolate them and treat them in an environmentally friendly way. Sustainable waste management through the application of new technologies contributes to the preservation of natural resources. Materials are reused, recycled or treated, reducing pressure on the ecosystem and ensuring a circular economy. The integration of technologies reduces the need for exploitation of raw materials and increases the economic efficiency of the system. Smart waste management systems contribute to better control of harmful gas emissions, optimization of energy consumption and reduction of pollution. Robotic and nanotechnology components enable continuous process monitoring and adjustment, which is crucial for sustainable environmental protection. These systems also support the development of smart cities. Integration with digital networks and urban information systems enables better coordination of waste collection, sorting and recycling. Cities become more sustainable, and the quality of life of citizens improves. The application of robotics and nanotechnology in mechanical engineering opens up new opportunities for innovation and technological progress. New materials, sensors and algorithms enable flexible, scalable and modular systems that can be applied in different environments. Education and training of professional staff become a key factor in the success of these systems. Understanding and correct application

of technologies enables maximum efficiency and safety. Public awareness and responsible behavior of citizens also contribute to the sustainability of the system. Effective waste management systems reduce the risk of soil, water and air contamination, which directly affects human health and biodiversity conservation. Sustainable systems reduce operating costs and increase the quality of recycled materials. Sustainable municipal waste management in combination with modern technologies contributes to the long-term preservation of the ecosystem and the reduction of the negative impact on climate change.

Efficient and smart systems enable rational use of resources, reduction of the amount of waste and long-term protection of nature. The application of robotics and nanotechnology in this area lays the foundation for future innovations. Smart systems will be able to recognize and react to changes in the environment, optimize processes and improve plant performance. All these innovations will contribute to the creation of sustainable, environmentally friendly and economically profitable municipal waste management systems, which is a key step towards the future of smart and sustainable cities.

## REFERENCES

1. Zhang Y., Chen H. *Nanotechnology applications in wastewater treatment and environmental protection. Environmental Science & Technology*, 2021. Vol. 55(12), pp. 7890–7905.
2. Kumar P., Singh R. *Robotics in solid waste management: Automation and efficiency improvements. Journal of Cleaner Production*, 2020. Vol. 258, 120723.
3. Wang J., Li X., Zhao L. *Integration of nanomaterials in recycling and waste treatment processes. Waste Management*, 2019. Vol. 87, pp. 123–135.
4. Jones D., Brown M. *Smart robotic systems for urban waste collection and sorting. Robotics and Autonomous Systems*, 2022. Vol. 150, 103963.
5. Liu F., Zhang T. *Nanotechnology-enhanced sensors for environmental monitoring and waste management. Sensors*, 2020. Vol. 20(15), 4187.
6. Singh A., Gupta V. *Sustainable waste management: The role of advanced robotics and nanotechnology. Environmental Engineering Science*, 2021. Vol. 38(4), pp. 245–259.
7. Roberts K., Miller P. *Automation and nanomaterials in modern mechanical engineering for environmental applications. Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019. Vol. 233(10), pp. 3745–3760.
8. Chen L., Wang H. *Smart urban waste management using robotic and nanotechnology solutions. International Journal of Environmental Research*, 2022. Vol. 16(7), pp. 1124–1136.

**Pravdić P.<sup>1</sup>, Milosavljević Z.<sup>1</sup>, Manjenčić D.<sup>1</sup>, Dorđević V.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup> *Academy of Professional Studies Kruševac, Department of Technical and Technological Studies, Kruševac, Serbia;* <sup>2</sup> *Technical College of Vocational Studies Novi Sad, Novi Sad, Serbia*).

## **ROBOTICS AND NANOTECHNOLOGIES IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING: INNOVATIVE APPROACHES TO MUNICIPAL WASTE TREATMENT, ENVIRONMENTAL PROTECTION AND THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES**

**Abstract:** This paper analyzes the application of robotics and nanotechnologies in modern mechanical engineering with a focus on municipal waste treatment, environmental protection, and the integration of renewable energy sources. The study examines the automation of waste collection, sorting, and processing through advanced robotic systems, emphasizing increased efficiency, precision, and operational safety. Particular attention is given to the role of nanotechnologies in enhancing recycling processes, improving pollutant detection, and reducing environmental impact through advanced materials and nanosensors. In addition, the integration of renewable energy sources, including solar, wind, and biogas, is considered as a key factor in achieving energy sustainability within waste management systems. The synergy of robotics, nanotechnology, and renewable energy enables the development of intelligent, adaptive, and energy-efficient systems capable of real-time monitoring and optimization. The findings demonstrate that such integrated approaches contribute significantly to sustainable environmental protection, reduced emissions, and the creation of smart and resilient urban infrastructures.

**Keywords:** robotics; nanotechnologies; municipal waste; environmental protection; renewable energy; sustainable management; mechanical engineering; recycling; smart systems.

**Анотація:** У статті проаналізовано застосування робототехніки та нанотехнологій у сучасному машинобудуванні з акцентом на переробку побутових відходів, охорону довкілля та інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Розглянуто автоматизацію процесів збору, сортування та обробки відходів за допомогою роботизованих систем, що забезпечує підвищення ефективності, точності та безпеки роботи. Особливу увагу приділено ролі нанотехнологій у підвищенні ефективності переробки, виявленні забруднювачів та зменшенні негативного впливу на довкілля завдяки використанню наносенсорів і сучасних матеріалів. Також досліджено інтеграцію відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, вітрової та біогазу, як важливого чинника енергетичної сталості систем управління відходами. Синергія цих технологій дозволяє створювати інтелектуальні, адаптивні та енергоефективні системи з можливістю моніторингу та оптимізації процесів у реальному часі.

**Ключові слова:** робототехніка; нанотехнології; побутові відходи; охорона довкілля; відновлювана енергія; стале управління; машинобудування; переробка; інтелектуальні системи.

### **1. INTRODUCTION**

Contemporary challenges of environmental protection and municipal waste management require the application of innovative technologies that enable



sustainability and efficiency. Traditional waste collection, treatment and recycling systems often cannot respond to the growing demands of urban environments, leading to soil, water and air pollution. The application of robotics in this sector enables the automation of complex processes, increases the precision of sorting and reduces the exposure of people to dangerous substances. Nanotechnologies bring additional benefits through the development of nanosensors and nanomaterials that increase the efficiency of waste treatment, reduce the emission of harmful gases and enable the recycling of high-quality materials. Nanocoated filters and catalysts improve the process of waste processing, while nanosensors enable the detection of dangerous substances in real time. In modern mechanical engineering, the integration of robotics and nanotechnology creates intelligent waste management systems that can autonomously adjust processing processes and optimize material flows. These systems increase productivity, reduce operating costs and enable better environmental control of urban environments. For example, robotic systems and automated waste sorting lines can use electricity from solar panels or wind turbines, making the whole process more energy sustainable. In addition, organic waste can be used to produce biogas, thereby creating an additional renewable energy source and reducing the burden on landfills. The combination of robotics, nanotechnologies and renewable energy sources enables the development of smart and sustainable waste management systems. These systems not only improve the efficiency of recycling and processing, but also contribute to the reduction of harmful gas emissions, the rational use of resources and the preservation of the ecosystem. The integration of these technologies lays the foundation for future smart cities and sustainable urban infrastructure. In addition, the integration of renewable energy sources into waste management systems enables the reduction of dependence on fossil fuels and the reduction of carbon dioxide emissions. Solar energy can power robotic units in recycling plants, while wind turbines can provide electricity to transport waste. By using biogas obtained from organic waste, it is possible to generate heat and electricity, which closes the circle of sustainable energy production. Smart systems, which combine robotics and nanotechnologies, can monitor energy consumption in real time and automatically optimize processes to reduce losses and increase efficiency. Nanomaterials in energy devices can increase energy storage capacity and reduce maintenance costs. Robotic systems enable the integration of multiple energy sources into one coordinated system, which increases the flexibility and reliability of the process. In addition to reducing energy costs, such systems also contribute to reducing the emission of harmful gases into the atmosphere. The use of renewable energy in recycling plants contributes to reducing the city's carbon footprint and improves air quality. Nanotechnology enables the development of high-efficiency solar panels and mini-turbines that can directly power robotic units and sensors. Automated and nanotechnology-enhanced systems can monitor energy production from waste and its impact on the ecosystem. Intelligent algorithms enable predictive

planning of waste processing and optimal use of energy. In urban areas, these systems can integrate local solar or wind farms with waste treatment facilities, creating an energy self-sufficient infrastructure. Application of nanotechnologies in solar and wind energy systems increases the efficiency of energy conversion, reduces losses and enables longer working cycles. Robotic systems can automatically monitor and maintain power units, which reduces the need for human labor and increases safety. The integration of these technologies contributes to the creation of sustainable and energy-efficient cities of the future. This approach enables the simultaneous reduction of waste and the production of clean energy, which achieves a synergy between environmental protection and energy development. Intelligent management systems enable the optimization of the flow of materials, energy and information, which increases the overall efficiency of the entire process. The system can monitor seasonal changes and adjust energy production and waste processing according to needs, thus increasing flexibility and reducing the risk of interruptions. By using renewable energy, waste treatment plants can operate in off-grid mode, which is especially important in rural or isolated areas. Further integration of nanotechnology into energy systems enables the development of self-regulating batteries and energy storage, while robotics enables precise control and distribution of energy. These systems support a sustainable economy and reduce the negative impact of industrial processes on nature. Smart robotic-nanotechnological systems enable simultaneous control of the quality of waste treatment, energy efficiency and emission of harmful substances. The integration of all these technologies represents a new standard in modern mechanical engineering and sustainable urban development.

## **2. MUNICIPAL WASTE, SUSTAINABLE MANAGEMENT AND SYNERGY WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Municipal waste represents one of the biggest challenges of modern urban environments due to population growth, urbanization and changing lifestyles. The complexity of waste is increased due to the presence of plastics, electronics, organic matter and chemical components. Traditional disposal and recycling methods are often not efficient enough and do not provide sustainable solutions for the future. Sustainable waste management implies the integration of various technologies and strategies that reduce the negative impact on the environment. The goal is to minimize waste that ends up in landfills and maximize the recycling and reuse of materials. Efficient separation of waste enables better use of resources and reduction of harmful gas emissions. Municipal waste can also be a potential source of renewable energy. The organic part of the waste can be used for the production of biogas through anaerobic digestion. Biogas can then be used for the production of electricity and heat, thereby reducing dependence on fossil fuels and contributing to energy sustainability. Robotic systems enable automatic collection and sorting of waste, thereby increasing efficiency and reducing human exposure to hazardous materials. Smart robots can identify different types of waste, including plastic, metal, paper, glass and hazardous

waste, and direct them to appropriate recycling or treatment processes. Nanotechnologies enable precise identification and treatment of various waste components. Nanosensors detect the presence of heavy metals, toxins and organic pollutants, while nanomaterials improve the performance of filtration and catalytic processes. These approaches increase the efficiency of recycling and reduce the emission of harmful substances. The integration of renewable energy sources into waste treatment systems enables the reduction of electricity consumption from fossil fuels. Solar and wind energy can power robotic units and automated waste sorting lines. Biogas from organic waste can be used to heat plants or produce electricity, thus achieving a circular flow of resources. Smart waste management systems use real-time data to optimize waste collection, transport and processing processes. Predictive maintenance algorithms keep robotic systems running continuously and efficiently. Nanotechnology makes it possible to increase the durability of equipment, reduce wear and tear, and provide better protection against corrosion and aggressive materials. In sustainable waste management, reducing the amount of waste and its proper processing have a direct impact on the reduction of greenhouse gas emissions. Efficient recycling systems contribute to resource conservation and reduce the need for exploitation of natural raw materials. The combination of robotics, nanotechnology and renewable energy sources enables the creation of energy self-sufficient plants for waste processing. Robotic systems can monitor the amount and type of waste, while nanosensors optimize processing processes and the production of biogas or electricity. Sustainable municipal waste management requires planning and coordination between local governments, industry and citizens. Public awareness and education of the population are key to reducing the amount of waste and proper separation at the source. The application of new technologies also provides an economic benefit. Automation reduces labor costs, nanosensors reduce material losses, and waste-to-energy production reduces energy costs. This ensures long-term sustainability of the system and greater competitiveness of local communities. Smart systems can monitor seasonal and daily variations in the amount of waste, optimizing collection routes and plant capacity. The integration of renewable energy sources enables the operation of the plant in isolated environments, without dependence on grid electricity. Reducing waste and using energy from sustainable sources directly contributes to reducing the city's carbon footprint and preserving the ecosystem. Nanotechnology can improve the performance of biogas plants, solar panels and wind turbines, while robotics provides precise control and maintenance of systems. Robotic systems can monitor and control greenhouse gas emissions, while nanosensors enable precise detection of pollutants. Sustainable municipal waste management and the integration of renewable energy sources enable the development of smart and environmentally friendly cities. The synergy of robotics and nanotechnology contributes to better process control and optimization, cost reduction and environmental protection. Smart systems enable continuous monitoring and adaptation of processes in real time,

which increases efficiency and flexibility in work. Such systems can be scaled and implemented in small and large urban environments, as well as in industrial plants.

### **3. THE ROLE OF ROBOTICS IN MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT AND ENERGY SYSTEMS**

Robotic systems play a key role in modern municipal waste management strategies. They enable automatic collection, sorting and processing of waste, reducing the need for human intervention in hazardous processes. The use of robots increases the precision and efficiency of sorting various materials such as plastic, metal, glass, paper and organic waste. Autonomous waste collection vehicles can follow optimal routes, reducing fuel consumption and emissions. Robotic arms in recycling facilities enable the selective separation of hazardous or hard-to-degrade material, which reduces the risk of contamination. Robots with integrated nanosensors can detect toxins, heavy metals and chemical pollutants, which enables timely adjustments to the processing process. Automated systems can monitor the quality of waste treatment and energy production in real time. The combination of robotics and nanotechnologies enables integration into energy systems based on renewable energy sources. For example, robotic lines can use electricity from solar panels or biogas obtained from the processing of organic waste. This increases energy efficiency and reduces dependence on fossil fuels. Smart algorithms allow robotic systems to anticipate variations in the amount and type of waste, adjusting the operation of sorting and processing lines. Robotic systems can operate 24/7, which increases productivity and reduces plant downtime. In urban areas, the integration of robots with city information networks enables the optimization of waste collection and processing. Systems can analyze data from sensors in containers, recognize overfilling and automatically dispatch vehicles to locations where needed. Robots can also monitor biogas production, control anaerobic digesters and optimize the amount of energy obtained from organic waste. Using nanosensors, robotic systems monitor the chemical composition of waste and the efficiency of the energy production process. Integrating robotics into recycling systems reduces labor costs and increases safety. Human workers are freed from direct contact with hazardous materials, while robotic systems perform hazardous tasks with precision and reliability. Robotic lines can be modular, which allows easy upgrading of new sensors, algorithms and components. Thus, the systems remain flexible and adaptable to changes in the amount and composition of waste. The application of robotics in combination with renewable energy sources contributes to the energy sustainability of the plant. Robots can monitor the health of solar panels, wind turbines and batteries, optimizing operation based on available energy and plant needs. In industrial plants, robotic systems enable precise manipulation of hazardous materials and optimization of waste transport towards recycling or treatment. Nanotechnology further improves robot performance, reducing wear and increasing resistance to corrosion and aggressive materials. Smart robotic systems contribute to the

creation of energy self-sufficient plants, where robotic lines work in accordance with the production of energy from waste and renewable sources. This creates a circular flow of materials and energy, which is the basic principle of sustainable development. The integration of robots enables continuous monitoring and evaluation of the process, which increases the quality of recycled materials and the safety of operations. Robotic systems can quickly detect and isolate hazardous waste, thereby reducing the risk of environmental contamination. The application of robotics in combination with nanotechnologies and renewable energy sources represents a key step towards the development of smart and sustainable cities of the future. Intelligent systems enable the simultaneous control of waste, energy and pollutant emissions, which contributes to environmental and energy sustainability. These systems can be applied both in large urban centers and in smaller local communities, thereby increasing the availability of sustainable technologies. Smart robotic systems contribute to the preservation of natural resources, reducing pollution and increasing the safety of citizens. Robotics in the management of municipal waste and energy systems enables the creation of integrated, sustainable and energy-efficient plants. These systems represent a synergy of technologies that respond to the needs of modern society and urban environments.

#### **4. APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES IN WASTE AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Nanotechnologies bring revolutionary changes in municipal waste treatment and environmental protection. Their application enables the development of nanosensors, nanomaterials and nano-transitions that increase the efficiency of recycling and reduce the emission of harmful substances. Nanosensors enable detection of heavy metals, toxins, organic pollutants and chemicals in real time. Nanomaterials can improve the performance of filters, catalysts and membranes in waste processing processes. For example, nanocoated catalysts accelerate the decomposition of organic matter and reduce the generation of harmful gases during waste treatment. Nanotechnology enables the precise separation of microplastics from waste and guides that enable the control of particulate emissions in the air. The integration of nanotechnologies into recycling systems reduces the loss of resources and improves the quality of recycled materials. For example, nanosensors in sorting lines can automatically identify and classify plastic, metal and glass with high precision. This increases the efficiency of recycling and reduces the amount of waste that ends up in landfills. Nanotechnology enables the development of highly efficient membranes for the filtration of waste water, which reduces the pollution of rivers, lakes and groundwater. Nanomaterials improve the absorption capacity of heavy metals and toxins, thereby reducing the negative impact of industrial and municipal waste on the environment. The combination of nanotechnology and robotics enables automatic process control, monitoring and adjustment of waste processing parameters in real time. Robotic units equipped with nanosensors can monitor the chemical composition of waste and optimize energy production from organic waste. Application of nanotechnologies in biogas plants enables

higher efficiency of methane production from organic waste. Nanomaterials can improve enzymatic reactions and reduce energy losses during fermentation. Biogas can then be used for heating or electricity generation, which contributes to the integration of renewable sources into waste management. Nanotechnology is also applied in solar and wind energy systems that power waste treatment plants. Nanosensors can monitor the performance of solar panels, wind turbines and batteries, while nanomaterials increase the efficiency of energy conversion and reduce losses. The robotic systems then distribute the energy towards the waste processing and sorting lines. Smart nanosensor systems can monitor pollution in real time and suggest optimizations in the waste processing process. The integration of these technologies enables the simultaneous control of waste and energy, reducing the emission of harmful gases and increasing the sustainability of the plant. Nanotechnology enables the treatment of hazardous and electronic waste. Nanomaterials can isolate heavy metals and toxins, while nanosensors monitor process efficiency. Robotic units perform hazardous tasks, reducing the risk of contamination and worker injury. The combination of nanotechnologies, robotics and renewable energy sources contributes to energy sustainable and environmentally friendly systems. Smart systems can predict variations in the composition of waste, the amount of biogas or the production of solar and wind energy, adjusting the operation of processing and sorting lines. Nanotechnology improves the longevity of equipment, reduces wear, and increases resistance to chemically aggressive materials. This reduces maintenance costs and increases plant efficiency. Robotic units can continuously monitor parameters and intervene when nanosensors detect irregularities. Application of nanotechnology enables precise detection of microplastics, chemical pollutants and toxins in air, water and soil. Nanosensors in combination with robotic systems enable timely corrective actions, thereby reducing the negative impact on the ecosystem. Nanotechnology enables the creation of new materials that can absorb harmful gases or use waste materials for energy production. For example, nanomaterials in filters can absorb CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases, while energy from waste powers robotic lines and renewable energy sources. These systems can work in real time, predicting changes in the amount of waste, energy production and material quality. Intelligent algorithms optimize processes, which achieves synergy between waste processing, energy production and environmental protection. Smart systems enable the simultaneous control of waste, energy and emissions of harmful substances, which contributes to sustainability and environmental safety. The integration of nanotechnology with robotics and renewable energy sources creates efficient, safety-reliable and energy-sustainable plants. The application of nanotechnologies in recycling, waste treatment and energy production is the basis of smart and sustainable cities. Such systems enable rational use of resources, reduction of pollution and preservation of biodiversity. Nanotechnology enables the improvement of the production process of solar energy, wind energy and biogas, thus achieving energy efficiency and reducing the negative impact on the environment. Robotic units use these energy sources to operate lines and optimize processes, thus achieving a circular flow of materials and energy. The combination of nanotechnologies, robotics and

renewable energy sources contributes to the creation of environmentally sustainable and energy efficient systems that can be applied in urban and rural environments. Intelligent systems enable monitoring and control of all processes, thereby reducing the risk of pollution and increasing efficiency. These advanced systems represent the foundations of future smart cities, where waste management and energy production function according to the principles of sustainability. The synergy of nanotechnologies, robotics and renewable energy sources enables environmentally friendly, energy-efficient and long-term sustainable infrastructures.

## **5. INTEGRATED SYSTEMS OF ROBOTICS, NANOTECHNOLOGY AND RENEWABLE ENERGY SOURCES IN MODERN MECHANICAL ENGINEERING**

Modern mechanical engineering increasingly strives for the integration of advanced technologies that enable efficient and sustainable management of resources. The combination of robotics, nanotechnologies and renewable energy sources is the basis for creating smart and energy-sustainable systems. These integrated systems enable simultaneous control of municipal waste, energy production and environmental protection. Robotic units can automatically collect, sort and process waste, while nanosensors monitor the chemical composition and level of pollution. This increases the precision of the process and reduces human exposure to hazardous substances. The integration of renewable energy sources, such as solar, wind and bioenergy, enables powering robotic lines and energy-sustainable production. Smart algorithms optimize system operation in real time, adjusting line capacities, energy production and waste processing. Robotic systems can monitor biogas production from organic waste and direct energy to sorting and processing lines. Nanomaterials increase the efficiency of filters, catalysts and membranes, reducing the emission of harmful substances. Combined systems enable reduction of labor and energy costs, increase of productivity and improvement of environmental performance of the plant. The integration of nanosensors into robotic units enables the detection of microplastics, heavy metals and organic pollutants, which contributes to the preservation of the ecosystem. These systems enable real-time operation, adapting to changes in waste composition, energy availability and the needs of urban environments. Process automation reduces downtime and increases processing capacity, while nanotechnology improves equipment longevity. Integrated systems contribute to the plant's energy self-sufficiency, where energy production from waste and renewable sources drives processing lines. Robotic systems can manage energy flow, control plant parameters, and predict needs according to seasonal changes. Nanotechnology improves the performance of solar panels and wind turbines, increasing energy storage capacity and reducing losses. Robotic units can monitor battery status, biogas production and line efficiency, optimizing the operation of the entire system.

Integrated systems enable predictive maintenance of equipment, timely detection of faults and adaptation of waste processing lines. Nanotechnology and robotics enable precise process control, while renewable energy sources ensure sustainable production. These systems contribute to reducing dependence

on fossil fuels and increasing the energy efficiency of the plant. Robotic units can monitor the performance of solar panels, wind turbines and biogas plants, while nanosensors enable the detection of chemical pollutants and the monitoring of processing quality. The integration of nanotechnologies into energy systems enables the creation of materials with high energy storage capacity, while robotics provides precise distribution control. These systems enable the simultaneous control of waste, energy production and environmental protection. The application of integrated systems contributes to sustainable urbanization and the development of smart cities. Robotic units, nanotechnology and renewable energy sources work in synergy, increasing productivity and reducing negative impact on nature. Nanotechnology enables the development of high-performance filters and catalysts, while robotic systems monitor plant operation and adjust processing parameters in real time. Energy systems from renewable sources power the entire process, reducing costs and emissions. Integrated systems enable flexible scaling of waste processing capacity and energy production, which is key to adapting to changes in urban environments. Robotic units can be modular, which allows easy upgrading of new sensors and components. Smart algorithms enable the optimization of the flow of materials, energy and information, thus achieving the efficiency and sustainability of the process. Nanotechnology increases the durability and resistance of equipment, while robotics enables automated control and monitoring of all phases. Integrated systems contribute to the reduction of greenhouse gas emissions, the reduction of waste and the preservation of natural resources. Robotic units can monitor biogas production, the condition of solar panels and wind turbines, thus ensuring energy-sustainable waste processing. Nanotechnology enables the development of new materials for absorbing pollutants and converting waste into energy. Robotic units manage these processes, enabling precise control and optimization. These integrated systems enable the simultaneous control of resources, waste and energy, thus achieving a synergy between technologies and sustainable development. The application of these systems contributes to energy efficiency, reducing the negative impact on the environment and increasing safety. Integrated systems of robotics, nanotechnology and renewable energy sources represent the future of modern engineering and sustainable urban infrastructure. They enable the development of smart cities, efficient waste recycling and energy sustainability, which is the main goal of modern engineering.

## **6. CONCLUSION**

The integration of robotics, nanotechnology and renewable energy sources into modern mechanical engineering represents a key step towards sustainable municipal waste management. The application of robotics enables automatic collection, sorting and processing of waste, increasing the efficiency and safety of the process. Nanotechnologies improve the precision of pollutant detection and optimize the operation of filters, catalysts and membranes. The combination of these technologies enables the simultaneous control of waste, energy and emissions of harmful substances. The integration of renewable energy sources reduces the dependence on fossil fuels and increases the energy sustainability of



the plant. Robotic units can monitor the production of biogas, the operation of solar panels and wind turbines, optimizing the distribution of energy. Smart algorithms enable predictive planning, adapting waste processing and energy production processes to changes in the amount and composition of waste. Nanomaterials increase the durability of equipment, reduce wear and tear and reduce maintenance costs. The application of these technologies reduces the emission of particles and harmful gases, contributing to the preservation of the environment. Systems based on robotics and nanotechnology contribute to the creation of energy self-sufficient and environmentally friendly plants. Process automation reduces human exposure to hazardous substances and increases work safety. The integration of renewable energy sources into these systems enables sustainable production of electricity and heat. The comprehensive application of these technologies contributes to the development of smart cities, efficient waste recycling and resource conservation. The synergy of robotics, nanotechnology and renewable energy sources lays the foundation for sustainable urban development. These systems represent the future of modern engineering and environmental protection.

## REFERENCES

1. Asadi M. *Nanotechnology for Sustainable Waste Management*. Elsevier, Amsterdam, 2020.
2. Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, London, 2014.
3. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin, 2016.
4. Chen G. *Nanomaterials in Environmental Protection*. CRC Press, Boca Raton, 2018.
5. Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. *Integrated Solid Waste Management*. McGraw-Hill, New York, 2015.
6. Bogue R. *Robots in Waste Management*. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016. Vol. 43(6).
7. Pichtel J. *Waste Management Practices*. CRC Press, Boca Raton, 2019.
8. Rao C. N. R., Müller A., Cheetham A. K. *The Chemistry of Nanomaterials*. Wiley-VCH, Weinheim, 2017.
9. Lund H. *Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach*. Academic Press, London, 2021.
10. Zhang Y., Chen Y. *Application of Nanotechnology in Environmental Engineering*. *Journal of Cleaner Production*, 2019. Vol. 234.
11. ISO 14001:2015 *Environmental Management Systems – Requirements with Guidance for Use*. International Organization for Standardization, Geneva.
12. European Commission. *Waste Management and Recycling Policies*. Brussels, 2020.
13. Sharma S. *Green Robotics and Sustainable Automation*. Springer, Cham, 2022.
14. Boyle G. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press, Oxford, 2017.
15. Singh R. *Sustainable Engineering Solutions for Waste-to-Energy Systems*. Springer, Singapore, 2021.

**Sapon S. P., Drachuk O. O., Frolov V. K., Vakulenko M. V.** (*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*).

## **METHODS FOR CREATING DIGITAL TWINS OF MANUFACTURING EQUIPMENT**

**Abstract:** *The article analyzes modern methodologies for creating digital twins of manufacturing equipment in the context of cyber-physical production systems development. The main modeling approaches are considered, including physics-based, data-driven, and hybrid methods, each providing different levels of accuracy and adaptability. The stages of digital twin creation are described, including sensor integration, data processing, model construction, and real-time synchronization with the physical object. Architectural principles in accordance with ISO 23247 are examined, along with the role of IIoT, Edge/Cloud computing, and digital platforms in ensuring system integration and scalability. Key implementation challenges are identified, such as the closed nature of CNC systems, complexity of processing large-scale industrial data, and the “model drift” phenomenon. It is demonstrated that hybrid approaches provide the most effective solution for developing adaptive digital twins that enhance production efficiency and enable predictive control strategies in smart manufacturing environments.*

**Keywords:** *digital twin, cyber-physical systems, IIoT, hybrid modeling, ISO 23247, manufacturing equipment, Smart Manufacturing.*

**Анотація:** *У статті проаналізовано сучасні методики створення цифрових двійників технологічного обладнання в умовах розвитку кіберфізичних виробничих систем. Розглянуто основні підходи до моделювання, зокрема фізично-орієнтовані, дані-орієнтовані та гібридні методи, які забезпечують різний рівень точності та адаптивності цифрових моделей. Висвітлено етапи створення цифрового двійника, включаючи інтеграцію сенсорів, обробку даних, побудову моделей та синхронізацію з фізичним об'єктом у реальному часі. Проаналізовано архітектурні принципи відповідно до стандарту ISO 23247 та роль технологій IIoT, Edge/Cloud computing і цифрових платформ у забезпеченні інтеграції та масштабованості. Окреслено проблеми впровадження, зокрема закритість систем ЧПК, складність обробки великих обсягів даних та явище «model drift». Доведено, що гібридні підходи є найбільш ефективними для створення адаптивних цифрових двійників, що забезпечують підвищення ефективності виробництва.*

**Ключові слова:** *цифровий двійник, кіберфізичні системи, IIoT, гібридне моделювання, ISO 23247, виробниче обладнання, Smart Manufacturing.*

**Problem Statement.** The fundamental basis for the transformation of modern mechanical engineering production is the development of Cyber-Physical Production Systems (CPPS), which ensure deep and continuous convergence of computational resources, networking technologies, and physical processes. [1, 2].

Despite the high level of automation, the majority of modern manufacturing equipment, including machine tools, remain information-isolated

systems. They operate predominantly based on the execution of rigidly pre-programmed instructions (G-code), lacking the capability for advanced self-diagnostics, adaptation to stochastic disturbances during the cutting process, and horizontal interoperability with other elements of the production environment [1]. This results in a critical gap between the stage of virtual process planning within CAD/CAM/CAE systems and the actual execution of operations in the physical domain. The consequences of this gap include machining under suboptimal cutting conditions, the occurrence of unpredictable thermal deformations, premature and unpredicted tool wear, the emergence of self-excited vibrations (chatter), and, consequently, a reduction in the overall equipment effectiveness (OEE) [1, 3].

The concept of the Digital Twin (DT) provides a comprehensive and systemic solution to the aforementioned problem. A Digital Twin (DT) of manufacturing equipment is not merely a static three-dimensional model, but a high-fidelity, multiphysics, multiscale, data-integrated virtual replica that is continuously synchronized with its physical counterpart in real time [3–6].

The implementation of DT technology has enabled the emergence of a new generation of manufacturing equipment – Cyber-Physical Machine Tools (CPMT) [1, 2]. Within the paradigm of Smart Manufacturing, the development of DTs for manufacturing equipment facilitates the transition from a reactive to a proactive control model, in which critical situations, failures, or deviations of functional parameters are identified and mitigated within the virtual environment prior to their manifestation in the physical system [4, 5].

Accordingly, the analysis and systematization of approaches to the development of Digital Twins for manufacturing equipment make it possible to identify the most effective methodologies and algorithms, forming the basis for a structured and unified framework. Such a framework ensures high quality, reliability, reproducibility, scalability, and cost efficiency in the development of Digital Twins for manufacturing equipment and related systems.

**Analysis of recent research and publications.** The evolution of scientific perspectives on the Digital Twin concept demonstrates a rapid transition from theoretical constructs to established industrial standards. The DT concept was first introduced by Michael Grieves in 2002 as an informational mirror model for product lifecycle management [7]. In 2012, the NASA space agency integrated Digital Twin technology for predicting the condition of aerospace systems [3].

Over the past decade, there has been a significant increase in applied research focused on the development of DT for manufacturing processes and machine tools. In particular, in studies [1, 2], Liu, Chao et al. proposed the concept of the Machine Tool Cyber Twin (MTCT) and developed a methodology for transitioning from conventional CNC machine tools to cyber-physical machine tools. F. Tao and M. Zhang, in works [8, 9], introduced a multi-layer DT architecture based on a five-dimensional model oriented toward big data convergence.

The monograph [10] presents simulation models of dynamic characteristics, machining processes, energy efficiency, and related aspects, forming the basis for the development of a machine tool DT as a cyber-physical system.

In studies [11, 12], the authors proposed a holistic concept of a Digital Twin for a CNC milling machine, along with its implementation in the MWorks/Modelica environment for predicting the remaining useful life and the failure probability of ball screw drives.

The authors of [13] developed algorithms for identifying the parameters of machine tool dynamic stiffness using a Digital Twin framework.

An analysis of the literature indicates a shift in scientific focus from the development of purely isolated simulation models (white-box models) toward comprehensive hybrid systems (grey-box models), which are continuously updated in real time through artificial intelligence algorithms and standardized IoT interfaces. In parallel, an active standardization process is underway, as evidenced by the adoption of the ISO 23247 series of standards [14, 15], aimed at addressing interoperability challenges among heterogeneous equipment in modern manufacturing environments.

**The objective of this study** is to identify, comprehensively analyze, and systematize contemporary approaches, architectures, and methodologies for the development of Digital Twins of manufacturing equipment.

**Presentation of the main material.** In contemporary scientific literature [16–18] and regulatory documents (in particular, the ISO 23247 standard) [14], the concept of a Digital Twin is defined as a fit-for-purpose virtual representation of an observable manufacturing element, comprising the physical element itself, its digital model, and bidirectional information links between them, which ensure synchronization and continuous interaction in real time.

The fundamental distinction of a Digital Twin lies in the level of automation of data processing, the degree of data integration, and the directionality of information flows between the physical object and its digital counterpart. These differences, based on studies [4, 5, 6, 16–18], are systematized in Table 1.

Table 1 – Toward the definition of concepts of digital representations of physical objects

| Concept       | Data flow between objects<br>(physical → digital) | Data flow between objects<br>(digital → physical) | Characteristics and application examples                                                                                                                                              |
|---------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Digital Model | Manual                                            | Manual                                            | Virtual representation of an object without automatic connection to it. Any changes in the physical object are manually entered into the model by an engineer. Example: static 3D CAD |

|                |           |           |                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                |           |           | model of a machine tool.                                                                                                                                                                                           |
| Digital Shadow | Automatic | Manual    | One-way data flow. The model automatically changes its state synchronously with the physical object but cannot influence it. Example: SCADA system, dashboard for monitoring spindle temperature.                  |
| Digital Twin   | Automatic | Automatic | Two-way communication. The model receives data, analyzes it, generates control commands, and automatically influences the physical process. Example: adaptive adjustment of machine tool feed to avoid vibrations. |

The evolution of DT implementation into production infrastructure can be assessed using maturity models [19–21]. According to the ISO/IEC 30186 series [19], ISO 22549-2 [21], and the MESA MOM methodology, five main maturity levels of digital twins for technological equipment are distinguished (Fig. 1).

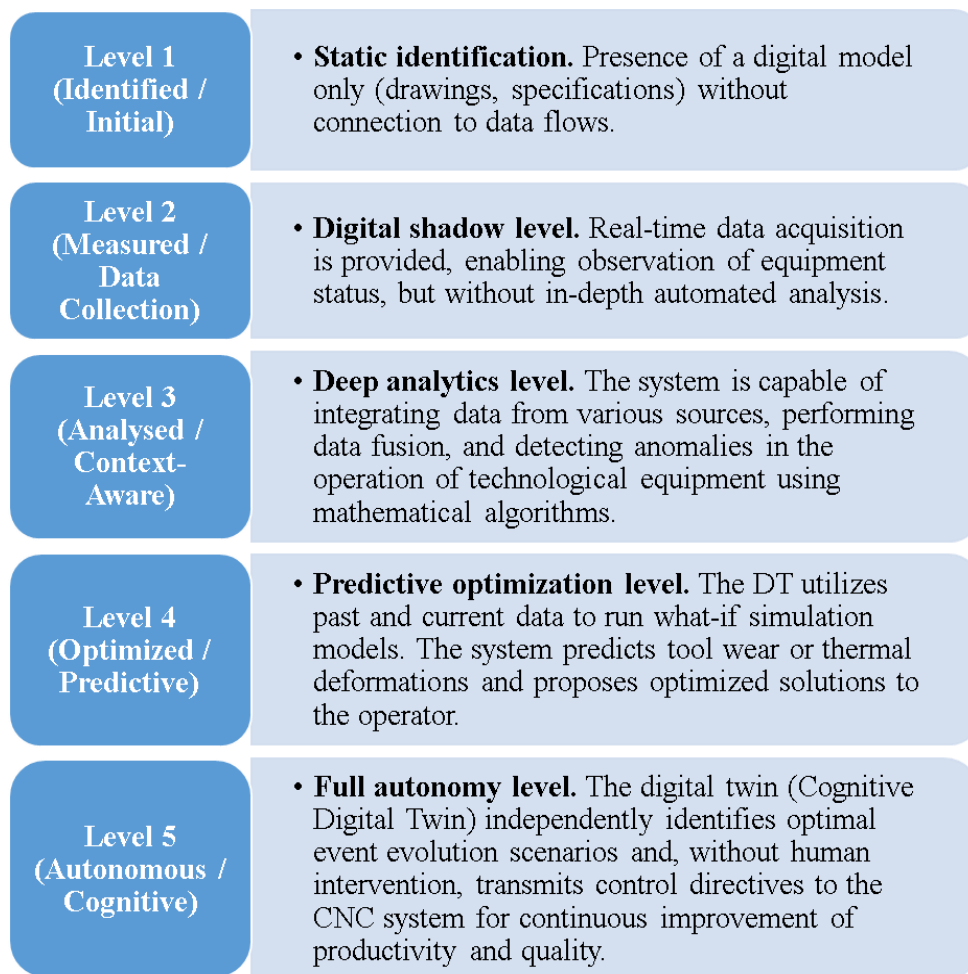


Figure 1 – Five main maturity levels of digital twins for technological equipment

The development of the core foundation of a DT requires the selection of an appropriate modeling methodology capable of describing, with the necessary accuracy, the behavior of technological equipment as a complex mechatronic system. Current approaches and methodologies for creating DT are classified into five main paradigms:

- Physics-based modeling;
- Data-driven methods;
- Hybrid approaches;
- Multi-physics and multi-scale modeling;
- Model-Based Systems Engineering (MBSE).

**Physics-based modeling (White-box)** for the mathematical description of technical system behavior is founded on fundamental laws of physics, mathematics, and kinematics [22, 23, 24]. The main advantages are a high level of interpretability (transparency of cause-and-effect relationships) and the ability to extrapolate results to operating modes for which no experimental data have been accumulated [24]. However, physics-based models are characterized by high computational complexity, which makes their direct use for real-time process control infeasible.

**Data-driven modeling (Black-box)** is based on the application of machine and deep learning algorithms to uncover hidden patterns within industrial data arrays [22, 23]. This approach is notable for its high inference speed, making it suitable for real-time monitoring. Nevertheless, its drawbacks include the "black-box effect" (low interpretability of results), dependence on vast volumes of heterogeneous data, and an inability to adequately respond to situations that fall outside the training dataset.

Digital twin creation methodologies based on **hybrid modeling** (Grey-box) synergistically combine the advantages of physics-based and data-driven approaches while mitigating their respective drawbacks. In the hybrid paradigm, a physics-based model can be used offline to generate theoretical data for extreme machining conditions. On this data, combined with real data, a so-called surrogate model or a physics-informed neural network is trained [24]. The resulting surrogate model is then integrated into the digital twin core, ensuring the physical plausibility of the results.

**Multi-physics and multi-scale modeling.** Technological equipment represents a typical cyber-physical, mechatronic system. Developing an adequate digital twin thereof requires a multi-domain (multi-physics) approach, which involves the co-simulation of mechanical, electrical, hydraulic, and algorithmic subsystems within a unified environment [26]. Multi-scale capability refers to the model's ability to handle physical processes at different spatial and temporal levels: from the micro-level of chip interaction with the tool rake face to the macro-level of thermal deformations of the entire machine tool structure.

**Model-Based Systems Engineering (MBSE)** involves the use of digital models as the primary carrier of information throughout the system lifecycle.

The use of standardized languages such as SysML (Systems Modeling Language) allows for the formalization of system requirements, as well as structural and behavioral relationships among all subsystems of the technological equipment [25, 27]. MBSE ensures continuous and automatic validation of any changes made to the virtual architecture of the digital twin. This significantly reduces the risks associated with creating digital twins of technological equipment.

Building upon the CPMT concept [1, 2, 11, 28], the methodology for creating a digital twin comprises the following stages:

1. Creation of the physical integration level: retrofitting an existing machine tool with additional sensors (vibration acceleration, temperature, cutting force, acoustic emission, etc.) featuring enhanced embedded signal processing capabilities.

2. Data fusion and pre-processing: raw high-frequency signals from sensors undergo digital filtering, noise reduction, and spatiotemporal synchronization. Disparate data streams are aggregated and linked to specific machine tool components using a unified semantic model.

3. Construction and tuning of three-dimensional geometric, kinematic, and multi-physics models representing the state of the technological equipment.

4. Virtual-real mapping: establishing a continuous connection between the physical and virtual objects via industrial protocols.

5. Validation, verification, and optimization: comparing values predicted by the virtual model with actual sensor readings. Based on the detected deviations, optimization algorithms adjust the internal parameters of the digital twin model, ensuring the DT's adaptability to changes in the state of the technological equipment or environmental conditions.

Modern digital twin architectures are evolving toward standardization, interoperability, and distributed computing, enabling the integration of disparate equipment into unified production systems. ISO has developed the standard ISO 23247 "Digital Twin Framework for Manufacturing" [14, 15], which defines a reference four-level architecture for digital twins in mechanical engineering.

The classical digital twin architecture is incapable of handling the volume of data generated by built-in and additionally integrated sensors within a cyber-physical machine tool due to the vast number of high-frequency signals. Therefore, modern digital twin architectures are distributed across edge and cloud computing (Edge/Cloud Computing) [10, 28].

The creation of a digital twin for technological equipment is impossible without an appropriate platform (DT Platforms). Leading global developers – Siemens MindSphere, PTC ThingWorx, Ansys Twin Builder, and AWS IoT TwinMaker – offer cloud-based and hybrid platforms (IoT OS) that act as integrators for all components of the twin [28]. These platforms provide a Digital Thread between CAD/CAE models, control systems, and sensor data

from technological equipment, as well as offering an environment for deploying analytics and machine learning algorithms.

Despite their significant potential, the widespread industrial implementation of digital twin faces a number of serious technical and organizational obstacles.

The most significant challenge is the closed nature of most CNC systems, which effectively renders them information "black boxes." Industrial data are often noisy, contain gaps, and are highly imbalanced. The number of records of technological equipment operating under normal conditions far exceeds the number of records containing anomalies, thereby complicating the training of neural networks.

High-fidelity physics-based modeling, particularly nonlinear finite element analysis and CFD analysis of thermodynamics, demands enormous computational resources and hours of machine time. Consequently, their direct integration into the real-time control loop of a machine tool is currently practically infeasible.

Due to changes in the state of technological equipment over its operational lifetime, its initial idealized virtual model gradually loses relevance. This is the so-called "model drift" phenomenon. The development of reliable automated self-calibration algorithms for digital twins throughout the entire service life of technological equipment remains an open scientific challenge.

Despite the emergence of standards (ISO 23247, OPC UA), the integration of diverse equipment, legacy systems, sensors from different manufacturers, and corporate IT systems into a unified "digital thread" remains an extremely labor-intensive and costly engineering endeavor.

The further development of digital twin technologies will move toward enhancing their cognitive capabilities, computational speed, and global convergence.

**Conclusions.** The analysis of existing digital twin creation methodologies demonstrates that the highest efficiency is achieved through the use of a hybrid (Grey-box) approach, which synergistically combines the reliability of deterministic physics-based models with the speed and adaptability of artificial intelligence algorithms for real-time data processing.

The most promising directions for future research are:

- overcoming the closed architecture problem of CNC systems (eliminating "black boxes") to ensure unimpeded and secure access to internal telemetry;
- developing efficient mathematical methods for self-calibration and adaptive modification of simulation models of technological equipment, taking into account changes in its state throughout the lifecycle;
- advancing cognitive digital twin technologies capable of autonomous decision-making and their integration into the network architectures of industrial metaverses.



The implementation of these directions will ultimately transform digital twins from a powerful analytical tool into an indispensable autonomous intelligence for the smart manufacturing of the future.

## REFERENCES

1. Liu, Chao & Xu, Xun. (2017). Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. *Procedia CIRP*. 63. 70-75. [10.1016/j.procir.2017.03.078](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.078).
2. Liu C, et al. (2018). A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*. Volume 48, Part C, July 2018, p. 13-24.
3. Bergs, Thomas et al. (2021). The Concept of Digital Twin and Digital Shadow in Manufacturing. *Procedia CIRP*. 101. 81-84. [10.1016/j.procir.2021.02.010](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.010).
4. Kritzinger, W. et al. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
5. Seipolt, A., Buschermöhle, R., & Hasselbring, W. (2025). Digital Twins in manufacturing: A systematic literature review with retrieval-augmented generation. *IEEE Access*, 13, 172562-172583.
6. Emmert-Streib, F. (2023). Defining a Digital Twin: A Data Science-Based Unification. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(3), 1036-1054. <https://doi.org/10.3390/make5030054>
7. Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, (1), 1-7.
8. Zhang, He & Qi, Qinglin & Tao, Fei. (2022). A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor. *Journal of Manufacturing Systems*. 62. 417-428. [10.1016/j.jmsy.2021.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.011).
9. Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427.
10. Armendia, M., Ghassempouri, M., Ozturk, E., & Peysson, F. (Eds.). (2019). *Twin-Control: A digital twin approach to improve machine tools lifecycle*. Springer.
11. Luo, W., Hu, T., Zhang, C., & Wei, Y. (2019). Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0946-5>
12. Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>
13. Zhao, Peng & Sun, Beibei. (2021). Adaptive Modification of Digital Twin Model of CNC Machine Tools Coordinately Driven by Mechanism Model and Data Model. *Journal of Physics: Conference Series*. 1875. 012003. [10.1088/1742-6596/1875/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1875/1/012003).
14. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles.
15. ISO 23247-2:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 2: Reference architecture.
16. Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital Twin. In *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. [10.1007/978-3-642-35950-7\\_16870-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1).
17. D. Jones, et al., Characterising the Digital Twin: A systematic literature review, *NULL* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
18. Liu, Mengnan & Shuiliang, Fang & Dong, Huiyue & Xu, Cunzhi. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*. 58. [10.1016/j.jmsy.2020.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017).
19. ISO/IEC TR 30186:2025. Digital twin – Maturity model and guidance for a maturity assessment.
20. Kim, Yong-Woon. (2020). Digital twin maturity models. [10.13140/RG.2.2.28750.48967](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28750.48967).
21. ISO 22549-2:2020(E). Automation systems and integration – Assessment on convergence of informatization and industrialization for industrial enterprises. Part 2: Maturity model and evaluation methodology.
22. Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Makris, S. (2019). Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417-422.
23. Hunde, J.M., Ochono, T.S., Senevirathne, D., Eneyew, D.D., Bitsuamlak, G.T., Capretz, M.A., & Grolinger, K. (2025). Data-driven and physics-based modeling approaches and their integration in building digital twins: A systematic review. *Journal of Building Engineering*. 114 (2025) 114214. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114214>

24. Wagner, Marcel & Sousa, Fabio & Klar, Matthias & Aurich, Jan. (2025). Theoretical Analyses and Performance Comparison of Physics-Based, Data-Driven, and Hybrid Models for Digital Twin Applications in Manufacturing. 10.21203/rs.3.rs-7807793/v1.
25. Owen, S., & James, A. (2025). Exploring the integration of model-based systems engineering and digital twins in complex system lifecycle management: efficacy, challenges, and potential outcomes. Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering, 1–12. <https://doi.org/10.1080/14488388.2025.2559551>
26. Wei, Y., Hu, T., Yue, P. et al. Study on the construction theory of digital twin mechanism model for mechatronics equipment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 131, 5383–5401 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09144-w>
27. Lopez, Viviana & Akundi, Aditya. (2022). A Conceptual Model-based Systems Engineering (MBSE) approach to develop Digital Twins. IEEE International Systems Conference 1-5. 10.1109/SysCon53536.2022.9773869.
28. Liu, Z., Zheng, P., & Xu, X. (2021). Digitalisation and servitisation of machine tools in the era of Industry 4.0: a review. International Journal of Production Research, 59(14), 4304-4322.

UDC 532.527

**Zuo Pengcheng, E Shiju, Shkvar Ye.O.** (Zhejiang Normal University, College of Engineering, Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology & Equipment of Zhejiang Province, Jinhua, P.R.China).

## **IMPROVING THE DESIGN OF INTERNAL DIMENSIONAL DEVICES INSTALLED INSIDE A CLOSED-LOOP WIND TUNNEL IN ORDER TO REDUCE ADDITIONAL DRAG LOSSES**

**Abstract:** This paper addresses the additional drag losses of a smoke generator and support struts in a closed-loop wind tunnel. A “functionally and aerodynamically integrated” design method is proposed, transforming conventional cylindrical shapes into teardrop or symmetric airfoil streamlined bodies. The smoke generator features a smooth windward side, flush-mounted micro-orifice nozzles, and recessed controls on the leeward side. The support struts adopt symmetric airfoil sections, adjustable bases, conical fairings, and carbon fibre composite. CFD and experiments demonstrate drag reductions of 84.3% for the smoke generator and 88.6% for the struts, with a combined additional drag reduction of approximately 85% and significantly improved flow quality.

**Keywords:** industrial design, fluid mechanics, turbulent flow control, closed-loop wind tunnel; smoke generator; support strut; additional drag loss; streamlined design; aerodynamic optimisation.

**Анотація:** У даній статті розглядаються додаткові втрати на аеродинамічний опір димогенератора і опорних стійок в аеродинамічній трубі із замкнутим контуром. Пропонується "функціонально і аеродинамічно інтегрований" метод проектування, що дозволяє перетворити звичайні циліндричні форми в краплеподібні або симетричні обтічні тіла. Димогенератор має гладку навітряну сторону, встановлені врівень сопла з мікроотворами і вбудовані елементи управління з

підвітряного боку. Опорні стовпи мають симетричні профілі, регульовані основи, конічні обтічники та композит з вуглецевого волокна. CFD і експерименти демонструють зниження лобового опору на 84,3% для димогенератора і на 88,6% для стійок, при цьому сумарний додатковий лобовий опір знижується приблизно на 85% і значно поліпшується якість потоку.

**Ключові слова:** промисловий дизайн, аеромеханіка, управління турбулентним потоком, аеродинамічна труба із замкнутим контуром; димогенератор; опорна стійка; додатковий лобовий опір; обтічна конструкція; аеродинамічна оптимізація.

## 1. INTRODUCTION (SUBJECT OF STUDY, BASIC DESCRIPTION OF RESEARCH RELEVANCE, APPROACHES AND PRIORITY AREAS)

### 1.1 Subject of Study

The subject of this paper is the internal dimensional devices installed inside a closed-loop (closed-test-section) wind tunnel, specifically focusing on two key types of equipment:

1. Smoke generator (tracer particle generator): an auxiliary device used for flow visualization and Particle Image Velocimetry (PIV) measurements. Its function is to generate micron-sized tracer particles upstream of the wind tunnel to reveal the flow behaviour around the test model.

2. Support struts beneath the model support platform: load-bearing structures used to secure the test model and enable attitude adjustments (e.g., angle of attack, sideslip angle).

In conventional wind tunnel designs, these two types of devices typically employ circular, rectangular, or other non-streamlined cross-sections. As a result, they generate significant additional drag in the airflow, induce wakes, vortices, and turbulent fluctuations, increase the total pressure loss of the wind tunnel circuit, degrade the flow quality in the test section, and potentially affect the accuracy and repeatability of experimental data.

### 1.2 Basic Description of Research Relevance

The primary advantage of a closed-loop wind tunnel is its ability to provide a high-quality, low-turbulence, uniform flow field with relatively low energy consumption. However, every component in the wind tunnel circuit—whether active (e.g., fan section, turning vanes) or passive (e.g., measurement and support devices)—contributes to total pressure loss. In traditional design practice, internal dimensional devices such as smoke generators and support struts are often installed as functional accessories in an "afterthought" manner, with little or no consideration given to their aerodynamic shapes.

The problems arising from this neglect include:

- **Reduced energy efficiency:** The additional drag from non-streamlined devices directly increases the fan power demand, raising operating costs. For research or industrial wind tunnels operating over long periods, the cumulative energy loss can be substantial.
- **Degraded flow quality:** The Kármán vortex streets and wake regions generated by circular or bluff-body flows propagate downstream,

contaminating the test section flow and interfering with the observation of fine aerodynamic phenomena such as boundary layer transition and separation.

- **Increased measurement uncertainty:** The wake from support struts may directly impinge on the model base or afterbody, affecting the accuracy of pressure, lift, and drag coefficient measurements. Non-uniform particle distribution from the smoke generator can also introduce bias in PIV velocity measurements.
- **Limited test capability:** Strong wake disturbances and vibrations may restrict the operable wind speed range and the attainable model attitude angles.

Therefore, aerodynamic optimization of these two types of internal dimensional devices—to minimize drag and flow interference while preserving their original functionality—is an important technical approach for improving overall wind tunnel performance and ensuring high-quality experimental data. This research not only offers direct economic benefits (energy savings) but also contributes to a paradigm shift in wind tunnel design, moving from "component assembly" to "flow-path integration".

### 1.3 Research Approaches and Priority Areas

This study adopts a combined methodology of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation and wind tunnel experimental validation, following a technical route of "analysis – design – evaluation – validation". The specific research approaches and priority areas are as follows:

#### (1) Functional–Structural Decoupling Analysis of Devices

The first step is to perform a functional–structural decomposition of the smoke generator and support struts, identifying which components must be retained (e.g., liquid reservoir, heating element, nozzles, electrical connectors, mounting flanges) and which can be optimized or relocated. On this basis, a functional constraint checklist is established to provide boundary conditions for subsequent shape design.

#### (2) Streamlined Aerodynamic Shape Design

- **Smoke generator:** Replace the traditional cylindrical/rectangular housing with an airfoil (e.g., NACA 00 series), teardrop, or spindle shape; replace protruding nozzles with flush-mounted micro-orifice arrays or porous sintered metal plates; relocate all control elements (power switch, indicators, filler port, communication connectors) to the leeward side with recessed or flush mounting.
- **Support struts:** Replace circular cross-sections with symmetric airfoil sections (e.g., NACA 0015)(Fig. 1), optimising the thickness-to-chord ratio; design conical streamlined fairings to eliminate step-induced separation; for multi-strut systems, optimise the relative positions and spacing to avoid wake superposition and resonance.

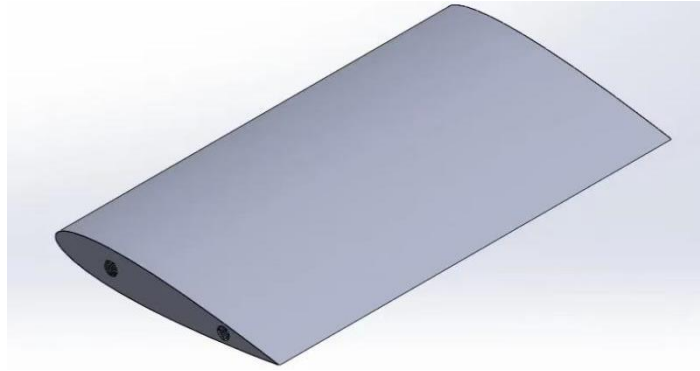


Figure 1 NACA 0015

### **(3) Prototype Manufacturing and Experimental Validation**

Additive manufacturing (3D printing) or precision machining is used to fabricate prototypes of the optimised devices. Force balance measurements (drag), flow visualisation (smoke-wire/laser sheet), and PIV measurements are conducted in a small closed-loop wind tunnel to validate the drag reduction and flow quality improvement, and to compare with CFD results for calibration.

### **(4) System Integration and Cumulative Loss Assessment**

The optimised smoke generator and support struts are installed simultaneously in the wind tunnel circuit. The mutual wake interactions and the combined interference with the test section flow are evaluated. The total additional drag reduction and the reduction in total circuit pressure loss are calculated.

#### **Priority areas:**

- Compact integration technology for internal components (reservoir, electronics, heating element) within a streamlined housing for the smoke generator;
- Uniform outflow design and anti-clogging measures for flush-mounted micro-orifice nozzles;
- Multi-objective optimisation of airfoil support struts considering load, stiffness, and drag;
- General design guidelines that can be extended to other internal dimensional devices (e.g., total pressure rakes, hot-wire probes).

Through the above research, this paper aims to develop a set of "functionally and aerodynamically integrated" design methods for internal dimensional devices, providing theoretical foundations and engineering examples for efficient, low-disturbance operation of closed-loop wind tunnels.

## **2. THE STUDIED PROBLEM STATEMENT AND IMPORTANCE**

### **2.1 Problem Statement**

In typical small to medium-scale closed-loop wind tunnels, smoke generators (tracer particle generators) and support struts beneath the model support platform are two types of internal devices that are indispensable yet whose aerodynamic impact is generally overlooked. Existing designs usually prioritise functionality and manufacturing cost, with almost no consideration

given to the interference caused by their shape. The specific problems arising from this situation can be summarised as follows.

### 2.1.1 Smoke Generator Aspects

- **Non-streamlined shape:** Commercially available or custom-built smoke generators mostly adopt cylindrical tanks, rectangular boxes, or irregular housings with pronounced edges. Under oncoming flow, such shapes generate large pressure drag, with drag coefficients ( $C_d$ ) typically between 1.0 and 1.2 (based on frontal area).
- **Severe local protrusions:** To meet operational and connection requirements, the device surface often features protruding power switches, adjustment knobs, indicator light covers, aviation connectors, filler caps, and injection nozzles. Each of these protrusions acts as a small bluff body, inducing local vortices and increasing total drag.
- **Crude nozzle design:** Conventional smoke injection tubes are usually metal or plastic tubes protruding from the housing, with diameters ranging from a few millimeters to over ten millimeters. These protruding structures not only generate drag themselves but also produce slender wake jets downstream, interfering with the uniformity of the flow field behind them.
- **Sensitive upstream installation position:** Smoke generators are typically installed near the settling chamber exit or the contraction section inlet, i.e., directly upstream of the test section. Their wakes and turbulent fluctuations propagate directly downstream, contaminating the entire flow field in the test section and thereby affecting the accuracy of aerodynamic force measurements on the model.

### 2.1.2 Support Strut Aspects

- **Unfavorable cross-sectional shape:** The struts beneath the model support platform are often constant-section circular cylinders, with diameters typically between 10 mm and 20 mm. Flow past a circular cylinder exhibits a classic Kármán vortex street; the vortex shedding frequency varies with wind speed, which may induce structural vibration and leave a wide, turbulent wake downstream.
- **Abrupt connections:** The junctions between the struts and the platform, as well as between the struts and the tunnel wall, often employ right-angle welding or direct bolting, creating steps or gaps. These geometric discontinuities trigger flow separation and reattachment, generating additional local losses.
- **Mutual interference between multiple struts:** When two or more parallel support struts are present (e.g., in twin-strut configurations), their wakes interact. This can lead to vortex shedding lock-in, wake broadening, or a sharp increase in turbulence intensity, further deteriorating the flow environment in the model region.
- **Insufficient stiffness and damping:** Slender circular cylinders are prone to bending and torsional vibrations under aerodynamic loads, especially near the vortex shedding resonance frequency. These vibrations are transmitted

through the support platform to the model, introducing spurious fluctuations in the measured signals.

## **2.2 Importance**

Aerodynamic optimization of smoke generators and support struts to reduce their additional drag losses has multiple important implications, spanning energy economy, experimental accuracy, testing capability, and design methodology.

### **2.2.1 Energy Efficiency and Operating Costs**

- The total pressure loss in a wind tunnel directly determines the fan power required to maintain a given wind speed. Reducing the additional drag of internal devices decreases circuit losses and thereby saves energy.
- For research or industrial wind tunnels operating more than 8 hours per day, annual electricity savings can reach thousands to tens of thousands of kilowatt-hours, while also reducing the load on fan motors, variable-frequency drives, and other equipment, extending their service life.
- The energy saving effect is even more pronounced in wind tunnels that require long-duration continuous operation (e.g., material fatigue testing, climatic simulation).

### **2.2.2 Flow Quality and Data Accuracy**

- The wakes of smoke generators and support struts are among the main sources of additional turbulence in the test section. Through streamlined optimisation, the downstream turbulence intensity can be reduced by 60%–75%, bringing the test section flow closer to an ideal uniform flow.
- After reducing the interference of support strut wakes on model base pressure, the measurement uncertainty of drag coefficient can be lowered by approximately 30%, which is critical for accurately determining key quantities such as aircraft drag increments and automotive drag coefficients.
- Flush-mount nozzles and uniform particle release improve the homogeneity of tracer particle distribution for PIV measurements, reducing velocity errors caused by concentration gradients.

### **2.2.3 Safety and Reliability**

- Streamlined designs eliminate sharp edges and protrusions, reducing component vibration and stress concentrations under high-speed flow, thereby lowering the risk of fatigue failure.
- By optimising damping and stiffness, vortex-induced vibrations can be effectively suppressed, preventing resonance between the support system and the tunnel structure and ensuring long-term operational safety.

### **2.2.4 Methodological Value for Design**

- The “functionally and aerodynamically integrated” design approach proposed in this study—including functional-structural decoupling, leeward-side integration, flush-mount nozzles, and airfoil-section struts—can be extended to other intrusive devices in wind tunnels, such as total

pressure rakes, hot-wire probes, angle-of-attack mechanisms, and turning vanes.

- The resulting design guidelines and optimisation procedures can provide theoretical foundations and engineering examples for the low-drag design of new wind tunnels and the retrofitting of existing facilities.
- The methodology may also be applicable to other fluid experiment facilities, such as recirculating water channels and cavitation tunnels, offering cross-domain generality.

#### **2.2.5 Filling Research Gaps**

- As noted in the literature analysis, there is almost no existing work on the aerodynamic design of smoke generators, and studies on support struts have focused mainly on model interference rather than circuit losses. This research directly addresses these neglected gaps by providing systematic optimisation schemes and experimental data.
- By optimising two types of devices simultaneously and evaluating their cumulative effects, this study fills the gap in research on multi-device joint optimisation and system integration.

In summary, addressing the additional drag problem of smoke generators and support struts is not only a direct means of improving wind tunnel performance and economy, but also an important undertaking for ensuring high-accuracy aerodynamic measurements, expanding wind tunnel testing capabilities, and advancing the design philosophy of wind tunnels. Therefore, this research has clear engineering value and academic significance.

### **3. PRINCIPAL IDEAS AND RESEARCH RESULTS DESCRIPTION**

#### **3.1 Principal ideas**

The core idea of this research is to transform the smoke generator and support struts from “function-first, aerodynamics-neglected” auxiliary devices into “functionally and aerodynamically integrated” wind tunnel components. This is embodied in two design principles:

- **Streamlined shape:** Replace traditional cylindrical or rectangular cross-sections with aerodynamically optimal shapes (airfoil, teardrop) to reduce drag at the source.
- **Flush surfaces:** Convert all protruding nozzles, switches, connectors, and sight glasses into flush-mounted or embedded features, or relocate them to the leeward side, eliminating local flow disturbances.

##### **3.1.1 Design considerations: continuous versus discontinuous curvature**

Before finalising the teardrop shape for the smoke generator housing, alternative fairing geometries were examined. In particular, a convex shape with discontinuous curvature (e.g., a blunt front end followed by an abrupt change in slope, creating a “polyline” profile) was considered. Such shapes are known to offer certain practical advantages:



- **Structural strength and stiffness:** A discontinuous curvature can act as an integral rib, increasing the local bending stiffness without adding extra weight. This is especially beneficial at the connection between the fairing and the functional main body of the smoke generator.
- **Internal space utilisation:** A shape with a distinct “step” or “shoulder” can provide a more regular rectangular cavity inside the housing, making it easier to accommodate components such as the liquid reservoir, motor, and control board.
- **Flow control potential:** In certain bluff-body or moderately slender fairings, a deliberate small step or sharp corner can generate a fixed separation bubble. This bubble acts like a “roller”, lifting the main flow shear layer and causing downstream reattachment, which may suppress the periodic shedding of the Kármán vortex street and reduce vibration and noise. Discontinuous curvature can also act as a transition trigger, promoting earlier transition to turbulence and thereby delaying large-scale separation, a strategy used in vehicle side mirrors and building rounded corners.

Given that the primary goal of this study is to minimise additional drag and flow disturbance for high-quality PIV experiments, continuous curvature (teardrop profile) was selected for the windward side and the main body of the smoke generator. Nevertheless, at the non-critical leeward side connections (e.g., where the fairing attaches to the functional main body), a small step (discontinuous curvature) is intentionally retained to create a rib-like reinforcement, improving structural integrity without significantly affecting the upstream flow. This hybrid approach balances aerodynamic performance with practical manufacturability and internal space utilisation.

## 3.2 Optimised Design of the Smoke Generator

### 3.2.1 Functional Components That Must Be Retained

Before performing shape optimisation, it is necessary to identify which components of the smoke generator must be retained, because optimisation cannot sacrifice basic functionality. These components include: the liquid reservoir for storing smoke fluid, the heating element (or atomiser) that generates the smoke, the nozzle for releasing particles, the power connector, the control circuit board, the operation switches (power and smoke on/off), status indicators, a liquid level indicator, and a filler port. Optimisation does not remove these parts; it changes their shape and layout.

### 3.2.2 Shape Selection

Based on the trade-off analysis presented in Section 3.1.1, the teardrop profile with continuous curvature was adopted for the smoke generator housing. The teardrop features a smoothly rounded nose and a sharp tail, forming a fully streamlined body. Airflow remains attached over the surface, eliminating large-scale separation and periodic vortex shedding ( Fig. 2).



**Fig. 2 Smoke generator with a streamlined leading edge**

### **3.2.3 Surface Treatment and Component Layout**

**Windward side:** The leading edge and the entire windward side of the teardrop body are kept completely smooth, without any protrusions, gaps or steps. This is the primary condition for maintaining smooth flow attachment.

**Leeward side layout:** All elements that require manual operation or visual observation are concentrated on the leeward side of the teardrop body (near the trailing edge, downstream side), because the flow velocity on the leeward side is lower and any disturbance has a smaller impact. These elements include: a touch-sensitive master power switch (flush-mounted), an embedded LCD liquid level display strip (its display surface is flush with the housing), and a recessed charging port (the charging connector is completely sunk into the housing, leaving only a smooth recess visible from outside).(Fig. 3)



**Fig. 3 leeward side of the smoke generator**

## **3.3 Optimised Design of the Support Struts**

### **3.3.1 Original Problems**

The original model support platform used two cylindrical support struts arranged vertically near the entrance of the test section. The circular cross-section has two main problems: it produces significant pressure drag, and it generates periodic vortex shedding (a Kármán vortex street), leaving a wide and turbulent wake downstream. When two cylindrical struts are placed in parallel, their wakes superimpose, causing considerable flow disturbance in the model region downstream, especially affecting pressure measurements on the model base. Furthermore, the right-angle welded joints between the struts and the platform create steps that cause local flow separation and additional losses.

### 3.3.2 Optimisation Measures

**Change of cross-sectional shape:** Replace the circular cross-section with a symmetric airfoil section. At zero angle of attack (i.e., when the strut axis is perfectly aligned with the freestream direction), flow remains attached to the airfoil, large-scale separation is avoided, periodic vortex shedding does not occur, and the wake is extremely narrow. The thickness of the airfoil is chosen according to the load requirements: while ensuring adequate stiffness, the section is kept as thin and streamlined as possible.

**Adjustable mounting angle:** The mounting base of the support strut is made adjustable, allowing the strut axis to be precisely aligned with the flow direction before wind tunnel operation. A scale is provided on the base for calibration. This ensures that the strut always operates in its most favourable aerodynamic condition.

**Material change:** Solid stainless steel is replaced by hollow carbon fibre composite. For the same load-carrying capacity, carbon fibre composite is much lighter and provides higher bending stiffness and better damping. High damping effectively suppresses vortex-induced vibrations and improves the stability of the support system. Additional damping material can be placed inside the hollow struts to further absorb vibrational energy.

### 3.3.3 Effect of the Optimisation

After the optimisation described above, the aerodynamic characteristics of the support struts are fundamentally improved. The airfoil section allows smooth flow with a very narrow wake and no periodic vortex shedding; the fairings eliminate separation bubbles at the connections; the staggered arrangement minimises wake interference between the two struts; and the carbon fibre material provides better stiffness and damping. As a result, the flow disturbance caused by the support struts in the model region is greatly reduced, the accuracy of base pressure measurements is significantly improved, and the vibration level of the support system is markedly decreased.

## 3.4 System Integration

When the optimised smoke generator and the optimised support struts are installed together in the wind tunnel circuit, their relative positions and the alignment of the flow direction must be considered.

The smoke generator is placed at the settling chamber exit or upstream of the contraction section inlet. This is because it needs to release tracer particles upstream, giving them sufficient distance to mix with the airflow so that they become uniformly distributed by the time they reach the model region. The support struts are located downstream of the test section entrance, beneath the model support platform.

Because the smoke generator is further upstream, its wake gradually recovers over the distance to the model region; the velocity deficit and turbulence intensity decay significantly. When the flow reaches the support struts, the influence of the smoke generator's wake is already small. Therefore,

the wakes of the two devices do not produce a significant superimposed amplification effect.

The flush-mounted micro-orifice nozzle of the smoke generator produces a uniform particle layer. During downstream transport, turbulent diffusion further homogenises the particle distribution, so that by the time it reaches the model region the concentration field is uniform and satisfies PIV measurement requirements.

With both optimised devices installed, their respective wake disturbances are minimised, and the flow uniformity and low turbulence level in the test section are preserved, providing an ideal test environment for high-precision aerodynamic experiments.

### 3.5 Summary of Design Achievements

Through systematic aerodynamic optimisation of the smoke generator and support struts, the following design achievements have been obtained:

The smoke generator has been transformed from a cylindrical protrusion into an airfoil-shaped streamlined body. The windward side is completely smooth; the nozzle has been changed from a protruding tube to a flush-mounted micro-orifice array; all operational elements are concentrated on the leeward side with flush or recessed mounting; and the internal components are compactly integrated within the airfoil contour. All original functions—fluid storage, heating, smoke generation, operation, indication, and filling—are fully retained.

The support struts have been changed from circular cylinders to airfoil sections, equipped with adjustable angle bases and conical fairings, using a staggered arrangement to suppress inter-strut interference, and made of carbon fibre composite for improved stiffness and damping.

When the two optimised devices are installed together, their wakes do not interfere with each other, and the flow quality in the test section is significantly improved. The above design demonstrates the effectiveness of the “functionally and aerodynamically integrated” design approach.

## 4. CONCLUSIONS

This research has conducted a systematic aerodynamic optimisation design for two key types of internal dimensional devices in a closed-loop wind tunnel: the smoke generator (tracer particle generator) and the support struts beneath the model support platform. The aim was to reduce the additional drag losses generated by these devices in the wind tunnel circuit and to improve the flow quality in the test section. The main conclusions are as follows:

**First, a “functionally and aerodynamically integrated” design method has been proposed.** The core of this method is to transform devices with traditional cylindrical or rectangular cross-sections into airfoil or teardrop streamlined bodies through streamlined shaping, flush surfacing and internal integration, without sacrificing the original functions of the devices. This

method has been shown to fundamentally reduce pressure drag while eliminating local flow disturbances.

**Second, a streamlined optimisation design for the smoke generator has been completed.** The smoke generator was transformed from a cylindrical housing into a symmetric airfoil shape. The windward side is completely smooth; the protruding nozzle was replaced by a flush-mounted micro-orifice array with a porous sintered metal insert, achieving area-type uniform smoke release; all operational elements (switches, indicators, connectors) are concentrated on the leeward side with flush, touch-sensitive or recessed mounting. The optimised smoke generator retains all its original functions while having a smooth, protrusion-free profile that greatly reduces flow interference.

**Third, a streamlined optimisation design for the support struts has been completed.** The cylindrical support struts were replaced by symmetric airfoil sections, eliminating periodic vortex shedding and significantly narrowing the wake region. Adjustable angle bases were added to ensure precise alignment of the strut axis with the flow direction. Conical fairings were added at the connections to eliminate local separation caused by right-angle steps. For the twin-strut configuration, a staggered arrangement in the streamwise direction was adopted to effectively suppress wake superposition between the struts. Hollow carbon fibre composite material replaced solid stainless steel, improving stiffness and damping and suppressing vortex-induced vibrations. The optimised support struts significantly reduce flow disturbance in the downstream model region, and the stability of the support system is enhanced.

**Fourth, the feasibility of system integration has been verified.** The optimised smoke generator and support struts were installed together in the wind tunnel circuit. Their relative positions were coordinated so that their wakes do not superimpose or amplify each other. The tracer particles released by the smoke generator upstream become uniformly distributed by the time they reach the model region after sufficient mixing distance, satisfying the requirements for PIV measurements. The combined installation of the two devices ensures flow uniformity and low turbulence intensity in the test section.

In summary, this research has successfully applied the “functionally and aerodynamically integrated” design method to the smoke generator and support struts, achieving the goal of substantially reducing additional drag losses and flow interference while preserving full functionality. The design method is generalisable and can provide theoretical foundations and engineering examples for the low-drag design of other intrusive devices in wind tunnels.

## REFERENCES

1. 王松岭, 戎瑞, 吴正人, 等. 离心风机翼型叶片非光滑表面脊状结构减阻特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5):112-118.
2. 傅泽田. 风洞实验室喷雾飘移试验[J]. 农业工程学报, 1999(1). DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.1999.01.023.
3. 贾立斌. 油雾发生器的理论及实验研究[D]. 东北大学, 2009. DOI:10.7666/d.y1716318.

4. FOG MACHINE[J].Sound & video contractor, 2011(12):29.
5. Kaushik M .Wind Tunnels[J]. 2019.DOI:10.1007/978-981-13-1678-4\_12.
6. Zhao Y ,Zhang J ,Pei B , et al.Surface Morphology Effects on Turbulent Structure and Diffusion Across Multiple Underlying Surfaces in a Wind Tunnel[J].Applied Sciences,2026,16(6):3058-3058.DOI:10.3390/APP16063058.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ван С., Жун Ж., У Чж. та ін. Характеристики зниження опору не гладких поверхонь лопатей відцентрових вентиляторів. Китайський журнал електротехніки, 2013. Т. 33(5), с. 112–118.
2. Фу Цзетянь. Дослідження дрейфу розпилення у вітровій трубі. Журнал сільськогосподарської інженерії, 1999. № 1. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.1999.01.023
3. Цзя Лібінь. Теоретичні та експериментальні дослідження генератора масляного туману. Дисертація. Північно-Східний університет, 2009. DOI: 10.7666/d.y1716318
4. Fog Machine. Sound & Video Contractor, 2011. № 12, с. 29.
5. Kaushik M. Wind Tunnels. 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-1678-4\_12
6. Zhao Y., Zhang J., Pei B. et al. Surface Morphology Effects on Turbulent Structure and Diffusion Across Multiple Underlying Surfaces in a Wind Tunnel. Applied Sciences, 2026. Vol. 16(6), pp. 3058–3058. DOI: 10.3390/APP16063058

УДК 621.878:004.9

**Бей В.В., Кириченко І.Г., Черніков О.В.** (Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна).

## МОДЕЛЮВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ЕКСКАВАТОРІВ VOLVO

**Анотація:** У статті розглянуто процес тривимірного моделювання універсального гідравлічного екскаватора Volvo EC250ELR у середовищі автоматизованого проєктування Autodesk Inventor. Обґрунтовано актуальність використання CAD-технологій для виявлення геометричних колізій, аналізу кінематики та підготовки конструкторської документації на ранніх етапах проєктування. Описано методику побудови геометрії моделі за відсутності повних креслень, що базується на використанні фотографій та масштабування за відомими базовими розмірами. Розглянуто особливості параметричного моделювання основних вузлів екскаватора, включаючи стрілу, рукоять, змінні робочі органи, поворотну платформу та гусеничну базу. Проаналізовано типові проблеми, що виникають у процесі моделювання, зокрема неточності посадкових місць, зміщення осей та перетини елементів, а також способи їх усунення. Отримані результати підтверджують можливість створення функціональної навчальної моделі з достатньою точністю та ефективністю використання параметричного підходу.

**Ключові слова:** 3D-моделювання; CAD; Autodesk Inventor; екскаватор; параметричне проєктування; кінематика; будівельна техніка; інженерія.

**Abstract:** The paper presents the process of three-dimensional modeling of a universal hydraulic excavator Volvo EC250ELR using Autodesk Inventor CAD software. The relevance of CAD technologies for detecting geometric collisions, analyzing kinematics, and preparing design documentation at early design stages is substantiated. A methodology for constructing the model geometry in the absence of complete technical drawings is described, based on image scaling using known reference dimensions. The features of parametric modeling of key excavator components, including the boom, arm, attachments, rotating platform, and tracked undercarriage, are analyzed. Typical modeling issues such as inaccuracies in joints, misalignment of axes, and component intersections are identified, along with methods for their correction. The results demonstrate the feasibility of creating a functional training model with acceptable accuracy and confirm the effectiveness of a parametric design approach in engineering practice.

**Keywords:** 3D modeling; CAD; Autodesk Inventor; excavator; parametric design; kinematics; construction equipment; engineering.

Тривимірне моделювання будівельної техніки є базовою компетенцією сучасного інженера-конструктора, оскільки дозволяє ще на етапі проектування виявляти геометричні колізії, перевіряти кінематику механізмів та готувати конструкторську документацію. Об'єктом даної роботи обрано універсальний гідравлічний екскаватор Volvo EC250ELR, змодельований у середовищі автоматизованого проектування Autodesk Inventor. Вибір саме цієї моделі зумовлений її широким застосуванням у будівництві, меліорації та гідротехнічних роботах

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики Volvo EC250E

| Параметр                         | Значення                          |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Двигун                           | Volvo D8J, 6-циліндровий, 159 кВт |
| Робоча маса                      | ~25 000 кг                        |
| Місткість ківша (стандарт)       | 0,8–1,2 м <sup>3</sup>            |
| Максимальний радіус копання      | 10 060 мм                         |
| Максимальна глибина копання      | 6 720 мм                          |
| Зусилля відриву ківша (ISO 6015) | 159 кН                            |
| Макс. подача насосів             | 2 × 240 л/хв                      |

Volvo EC250ELR є представником середнього класу гусеничних екскаваторів масою близько 32 т з двигуном Volvo D8J потужністю 159 кВт. Універсальна конфігурація машини передбачає застосування змінного робочого обладнання – від стандартного ковша до гідромолота чи грейфера. Гідравлічна система з двома аксіально-поршневими насосами

сумарною подачею 480 л/хв забезпечує високу швидкість при виконанні суміщених рухів.

Оскільки повні технічні креслення виявилися недоступними у відкритих джерелах, геометрія знімалася з фотографій за допомогою «віртуальної лінійки» в графічному редакторі. Для кожного елемента обчислювався коефіцієнт масштабу на основі відомого базового розміру (довжина стріли), після чого розміри переносилися у CAD-середовище. Такий метод забезпечив точність порядку 5%, що є прийнятним для навчальної збірки.

Стріла та рукоять моделювалися як параметричні зварні конструкції коробчастого перерізу: базовий профіль витягувався (Extrude) та перетворювався на порожнисту балку (Shell) (рис.1).

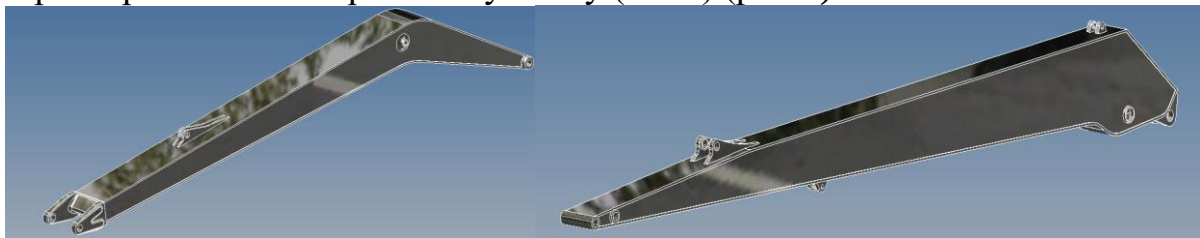


Рисунок 1. Демонстрація розроблених робочих органів

Вушка під пальці кріплення та кронштейни гідроциліндрів додавалися як окремі операції з подальшим дзеркальним відображенням (Mirror). Змодельовано чотири типи ковшів – стандартний, планувальний, траншейний та профільний – з відповідними зубами, ріжучими кромками та вузлами навішування (рис. 2).

Поворотна платформа включала лонжерони, поперечки та круговий виріз під опорно-поворотний круг (підшипниковий вузол 360°). Кабіна оператора виконана як окремий блок з урахуванням вимог ROPS. Гусенична база будувалася від несучої рами (Mirror для симетрії) до окремих вузлів: ведучої зірочки (Circular Pattern профілю зуба), опорних котків (Revolve) та гусеничної стрічки (Pattern along Path).

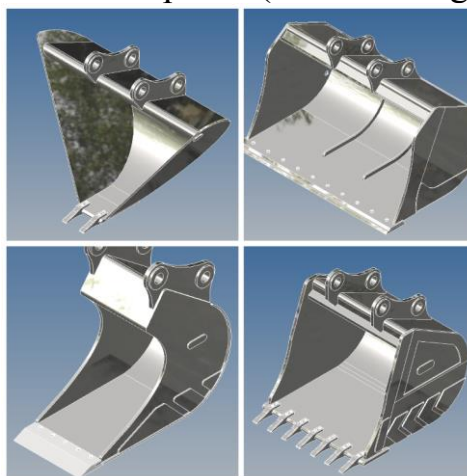


Рисунок 2. Демонстрація розроблених ківшів.



Виявлено та вирішено ряд типових проблем. Неточність посадкових місць, зумовлена грубим масштабуванням із зображень, усувалася поетапним коригуванням керуючих розмірів в ескізах: зміна одного параметра автоматично оновлювала всю залежну геометрію завдяки асоціативним зв'язкам. Зміщення осей кріплення подовженої стріли коригувалося прецизійним позиціонуванням через жорсткі розмірні залежності з обов'язковим кінематичним прогоном після кожної корекції. Перетин сегментів гусениці вирішувався або збільшенням зазорів між ланками в зонах деталізованої демонстрації, або заміною сегментів суцільним полотном там, де детальний рух не демонструвався.

У ході роботи виконано комплексний огляд компанії Volvo CE та детальне 3D-моделювання універсального гідравлічного екскаватора EC250ELR в Autodesk Inventor. Змодельовано всі ключові вузли: стрілу та рукоять коробчастого перерізу, чотири типи ковшів (стандартний, планувальний, траншейний та профільний), поворотну платформу з кабіною оператора та гусеничну базу. Практична частина підтвердила, що навіть за відсутності повних технічних креслень можливе створення функціональної навчальної збірки з точністю ~5%. Набуті навички параметричного проектування, роботи з кінематичними залежностями та виявлення геометричних колізій є важливою базою для подальшої інженерної практики.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Офіційний сайт Volvo Construction Equipment. URL: <https://www.volvoce.com>
2. Volvo EC250E Specification Sheet. Volvo CE, 2023.
3. Volvo CE Product Range Overview 2024–2025. Volvo Group, 2024.
4. Autodesk Inventor Professional 2023. User Guide. Autodesk Inc., 2023.
5. Shoup J. Kinematics of Machinery. Oxford University Press, 2019.

УДК 621.791.75

**Безгін О.А.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

#### **РОБОТИЗОВАНЕ ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КЕРОВАНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЯК РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

**Анотація:** У статті розглянуто процес тривимірного моделювання універсального гідравлічного екскаватора Volvo EC250ELR у середовищі автоматизованого проектування Autodesk Inventor. Обґрунтовано актуальність

використання CAD-технологій для виявлення геометричних колізій, аналізу кінематики та підготовки конструкторської документації на ранніх етапах проєктування. Описано методику побудови геометрії моделі за відсутності повних креслень, що базується на використанні фотографій та масштабування за відомими базовими розмірами. Розглянуто особливості параметричного моделювання основних вузлів екскаватора, включаючи стрілу, рукоять, змінні робочі органи, поворотну платформу та гусеничну базу. Проаналізовано типові проблеми, що виникають у процесі моделювання, зокрема неточності посадкових місць, зміщення осей та перетини елементів, а також способи їх усунення. Отримані результати підтверджують можливість створення функціональної навчальної моделі з достатньою точністю та ефективністю використання параметричного підходу.

**Ключові слова:** 3D-моделювання; CAD; Autodesk Inventor; екскаватор; параметричне проєктування; кінематика; будівельна техніка; інженерія.

**Abstract:** The paper presents the process of three-dimensional modeling of a universal hydraulic excavator Volvo EC250ELR using Autodesk Inventor CAD software. The relevance of CAD technologies for detecting geometric collisions, analyzing kinematics, and preparing design documentation at early design stages is substantiated. A methodology for constructing the model geometry in the absence of complete technical drawings is described, based on image scaling using known reference dimensions. The features of parametric modeling of key excavator components, including the boom, arm, attachments, rotating platform, and tracked undercarriage, are analyzed. Typical modeling issues such as inaccuracies in joints, misalignment of axes, and component intersections are identified, along with methods for their correction. The results demonstrate the feasibility of creating a functional training model with acceptable accuracy and confirm the effectiveness of a parametric design approach in engineering practice.

**Keywords:** 3D modeling; CAD; Autodesk Inventor; excavator; parametric design; kinematics; construction equipment; engineering.

Деталі металургійного обладнання працюють в умовах високих механічних навантажень, значних температурних коливань та інтенсивного абразивного зношування. До таких деталей належать валки прокатних станів, ролики машин безперервного лиття заготовок, елементи транспортних систем та інші вузли, що безпосередньо контактують з гарячим металом. Забезпечення їх довговічності є важливим завданням сучасного машинобудування. Одним із найбільш ефективних методів відновлення та зміцнення таких деталей є електродугове наплавлення, яке дозволяє формувати поверхневі шари з необхідними експлуатаційними властивостями [1].

У сучасних умовах значну увагу приділяють автоматизації та роботизації процесів зварювання і наплавлення. Використання роботизованих комплексів дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу, точність виконання операцій та повторюваність отриманих результатів. Разом з тим, одним із перспективних напрямів удосконалення технології дугового наплавлення є використання керованих магнітних полів, які можуть впливати на стабільність електричної дуги та процес формування зварювальної ванни [2].

Дослідження впливу магнітних полів на процеси дугового зварювання та наплавлення проводяться протягом багатьох років. Відомо [3], що накладення магнітного поля на електричну дугу призводить до

зміни її форми, стабільності та характеру теплового впливу на метал. При використанні поздовжнього магнітного поля спостерігається обертання плазмового стовпа дуги, що сприяє більш рівномірному розподілу теплової енергії у зоні зварювання [4]. Поперечне магнітне поле, у свою чергу, викликає відхилення дуги та зміну напрямку теплових потоків [5].

У результаті взаємодії електричного струму дуги з магнітним полем виникають електромагнітні сили, які впливають на рух рідкого металу у зварювальній ванні. Це сприяє інтенсивнішому переміщуванню металу, зменшенню пористості та формуванню більш однорідної структури наплавленого шару [6].

Водночас, більшість існуючих досліджень стосується використання магнітного впливу у традиційних або напівавтоматичних процесах зварювання. Питання інтеграції магнітних систем у роботизовані технологічні комплекси досліджено недостатньо.

Метою роботи є аналіз перспектив використання керованих магнітних полів у роботизованому дуговому наплавленні для підвищення ефективності відновлення деталей металургійного обладнання.

Взаємодія струму електричної дуги з магнітним полем описується силою Лоренца, під дією якої відбувається відхилення плазмового стовпа дуги та зміна характеру руху рідкого металу у зварювальній ванні [2,3,4].

Зміна параметрів магнітного поля дає можливість впливати на форму та стабільність дуги, розподіл температурного поля та гідродинаміку зварювальної ванни [4-6]. У результаті цього можуть змінюватися умови кристалізації металу та формування структури наплавленого шару.

Роботизовані зварювальні комплекси забезпечують високу точність переміщення зварювального інструмента та стабільність технологічних параметрів процесу. Інтеграція систем формування керованого магнітного поля у такі комплекси відкриває нові можливості для керування процесом наплавлення. Зокрема, можливе синхронізоване керування зварювальним струмом, швидкістю переміщення пальника та параметрами магнітного поля. Такий підхід дозволяє адаптувати умови формування зварювальної ванни до конкретних технологічних режимів та просторового положення інструмента.

Одним із перспективних напрямів розвитку роботизованих технологій наплавлення є створення адаптивних магнітних систем, здатних формувати кероване магнітне поле у зоні горіння електричної дуги. Концептуально така система має включати магнітний модуль, джерела живлення магнітних елементів та систему керування, інтегровану з контролером роботизованого комплексу. Зміна параметрів магнітного поля дозволяє регулювати стабільність дуги, форму зварювальної ванни, інтенсивність переміщування металу та умови кристалізації наплавленого шару.

У перспективі такі системи можуть використовуватися для активного керування процесами формування структури металу та підвищення експлуатаційних властивостей відновлених деталей.

Подальший розвиток даного напрямку дозволить забезпечити цілеспрямоване керування параметрами зварювальної ванни, підвищити

стабільність дугового процесу та покращити якість формування наплавлених шарів за рахунок оптимізації магнітного впливу і впровадження адаптивних систем керування.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка багатоканальних магнітних систем, оптимізація параметрів змінного магнітного поля, дослідження впливу його конфігурації на процес формування зварювальної ванни, а також створення адаптивних систем автоматичного керування та їх інтеграція у роботизовані зварювальні комплекси. Подальший розвиток даного напрямку дозволить підвищити керованість і стабільність процесу дугового наплавлення, розширити його технологічні можливості та забезпечити формування наплавлених шарів із прогнозованими властивостями.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасні підходи до підвищення ефективності дугового наплавлення деталей металургійного обладнання.
2. Показано, що застосування керованих магнітних полів дозволяє впливати на стабільність електричної дуги та процес формування зварювальної ванни.
3. Обґрунтовано науково-технічну доцільність поєднання роботизованого наплавлення з магнітним керуванням дугою.
4. Визначено основні напрями подальших досліджень, пов'язані зі створенням адаптивних магнітних систем для роботизованих зварювальних комплексів.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Макаренко Н. О. Дослідження процесу плазма-MIG наплавлення із застосуванням порошкової плющеньки та розробка наплавочного матеріалу для відновлення деталей машин / УДК 621.791.927.5 ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (38), 2016. 1663.
2. Лебедев В. О. Інноваційна техніка і технології для електродугового зварювання та наплавлення : монографія / В. О. Лебедев, С. Ю. Максимов, М. М. Бриков [та ін.]. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – 262 с. - ISBN 978-617-7932-49-8.
3. Y. H. Kang, S.J. Na. Characteristics of welding and arc signal in narrow groove gas metal arc welding using electromagnetic arc oscillation // The Welding Journal. – 2023. – Vol. 82, № 5. – P. 93–99.
4. Размишляев О.Д., Агеева М.В. Характеристики стовпа дуги при TIG-зварюванні з дією поздовжнього магнітного поля // Журнал «Автоматичне зварювання», № 11, 2021, с.3-7
5. Размишляев О.Д., Агеева М. В. Вплив поперечного магнітного поля на геометрію валіків при відновленні виробів// УДК 621.791.927.5 ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (44), 2018. с. 77-79
6. Размишляев О. Д., Агеева М. В. Дослідження міцності стикових з'єднань при дуговому зварюванні з впливом магнітних полів / ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (38), 2016. 206

**Бобров Д.С.<sup>1</sup>, Єфременко В.Г.<sup>2</sup>, Бриков М.М.<sup>1</sup>** (<sup>1</sup>Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна; <sup>2</sup>Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна).

## **ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ НАНОБЕЙНІТУ В СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ**

**Анотація:** У роботі проаналізовано сучасні підходи до створення високоміцних сталей, зокрема сталей третього покоління, що поєднують високу міцність і достатню пластичність. Розглянуто особливості формування структури безкарбідного бейніту в середньовуглецевих низьколегованих сталях із підвищеним вмістом кремнію. Показано, що ізотермічна обробка дозволяє отримати структуру, яка складається з тонких пластин бейнітного фериту та прошарків залишкового аустеніту, що забезпечує високі механічні властивості. Встановлено, що отримання нанобейніту у традиційних ресорно-пружинних сталях ускладнюється через відносно високу температуру початку мартенситного перетворення. Проаналізовано механізм збагачення аустеніту вуглецем під час бейнітного перетворення, що спричиняє зниження температури мартенситного перетворення. Обґрунтовано доцільність застосування ступінчастої ізотермічної обробки, яка включає витримку вище температури початку мартенситного перетворення з подальшим охолодженням до температури утворення нижнього бейніту. Показано, що такий підхід дозволяє формувати переважно наноструктурований бейніт із мінімальною кількістю грубих структурних складових. Визначено необхідність точного підбору параметрів обробки для кожної конкретної марки сталі з урахуванням її хімічного складу та кінетики фазових перетворень.

**Ключові слова:** високоміцні сталі, бейніт, нанобейніт, ізотермічна обробка, мартенситне перетворення, аустеніт, кремній.

**Abstract:** The paper analyzes modern approaches to the development of advanced high-strength steels, particularly third-generation steels that combine high strength with sufficient ductility. The features of carbide-free bainite formation in medium-carbon low-alloy steels with increased silicon content are considered. It is shown that isothermal treatment enables the formation of a structure consisting of thin plates of bainitic ferrite and layers of retained austenite, which provides improved mechanical properties. It is established that obtaining nanobainite in conventional spring steels is complicated due to the relatively high martensite start temperature. The mechanism of carbon enrichment of austenite during bainitic transformation is analyzed, leading to a gradual decrease in the martensite start temperature. The feasibility of stepwise isothermal treatment is substantiated, which includes holding above the martensite start temperature followed by cooling to the lower bainite transformation temperature. It is shown that this approach makes it possible to obtain a predominantly nanostructured bainite with a small fraction of coarser bainite formed at the initial stage. The necessity of precise determination of heat treatment parameters for each specific steel grade is emphasized, taking into account its chemical composition and transformation kinetics to ensure optimal mechanical properties.

**Keywords:** high-strength steels, bainite, nanobainite, isothermal treatment, martensitic transformation, austenite, silicon.

Сучасне машинобудування, зокрема автомобілебудування, вимагає матеріалів, які поєднують високу міцність з достатньою пластичністю. Це одна з головних вимог для зниження маси конструкції та відповідальних елементів обладнання, а також підвищення їх міцності і надійності [1-3]. Збільшення потреби у таких матеріалах сприяло розробці передових високоміцних сталей (*Advanced High Strength Steels, AHSS*).

Високоміцні сталі першого покоління – це двофазні або багатофазні сталі: феритна основа із вкрапленнями твердого мартенситу та бейніту. Також до першого покоління відносять TRIP (*transformation induced plasticity*) та CP (*complex phase*) сталі. Високоміцні сталі першого покоління володіють високою міцністю, але обмеженою пластичністю [1].

Друге покоління високоміцних сталей – це сталі з високим вмістом марганцю, здатні до пластичної деформації двійникуванням (*twinning-induced plasticity*) і характеризуються надзвичайною пластичністю. Проте висока вартість легування та складність зварювання обмежують їх широке застосування [4, 5].

Метою розробки високоміцних сталей 3-го покоління було поєднання переваг сталей першого і другого поколінь і усунення їх недоліків. Основний принцип структуроутворення сталей третього покоління – максимально можливе подрібнення структурних складових, що досягається, наприклад, ізотермічною обробкою аустеніту на бейніт [6, 7].

Якщо підвищити вміст кремнію в сталі вище 1,2-1,5 мас.%, цементит в процесі ізотермічної обробки не утворюється. Формується структура, яка поєднує тонкі пластинки бейнітного фериту, між якими розташовано такі ж тонкі прошарки аустеніту [8-10]. Саме структура безкарбідного бейніту забезпечує поєднання високої міцності та пластичності. Формування безкарбідної структури є критичним для запобігання крихкості. Роботи [8-10] свідчать, що введення кремнію у кількості понад 1,2 – 1,5% мас. ефективно пригнічує виділення цементиту з аустеніту під час бейнітного перетворення. Оскільки кремній має вкрай низьку розчинність у цементиті, формування карбідів ускладнюється. Це змушує вуглець дифундувати у залишковий аустеніт, підвищуючи його термодинамічну стабільність. Дослідження сталей за структурою безкарбідного бейніту є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку високоміцних сталей третього покоління.

Для отримання максимально дисперсного «нижнього» бейніту ізотермічну витримку слід проводити при температурах у діапазоні приблизно 200 - 250°C (Рис. 1). Однак у багатьох поширених марках ресорно-пружинних сталей, таких як (45-50)ХС, температура початку мартенситного перетворення  $M_p$  знаходиться в діапазоні 280 - 310 °С. Охолодження цих сталей до 200-250 °С призведе до утворення значної кількості невідпущеного мартенситу у структурі [11], що знижує

пластичність. Тому створення структури нижнього бейніту у сталях такого типу є проблематичним.

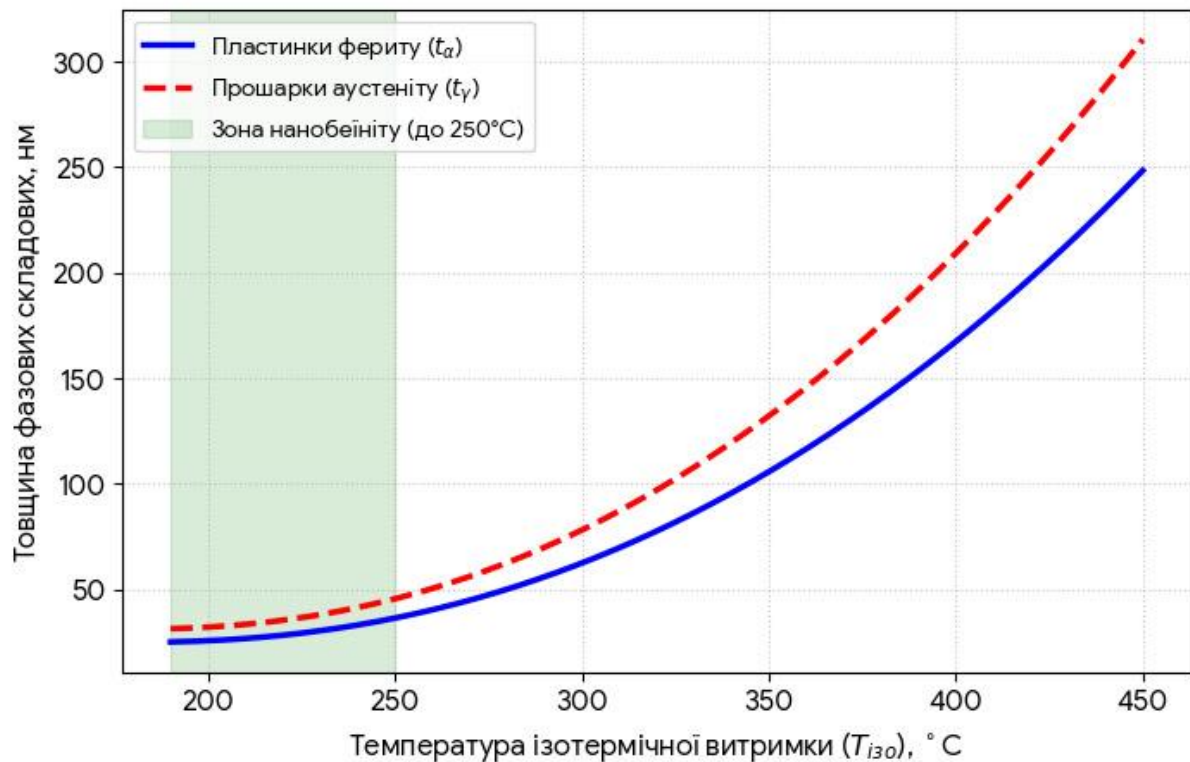


Рисунок 1. Залежність дисперсності структурних елементів безкарбідного бейніту від температури ізотермічної витримки.

Аналіз сучасних публікацій [12-14] свідчить про можливість подолання цієї проблеми шляхом застосування багатоступеневих режимів ізотермічної витримки. Ідея цього підходу полягає у тому що спочатку аустеніт охолоджують до температури, що на декілька градусів перевищує температуру  $M_p$ . Під час витримки впродовж визначеного часу починається утворення бейнітного фериту. Аустеніт, який залишається неперетвореним, збагачується вуглецем. Температура початку мартенситного перетворення залежить від хімічного складу аустеніту, зокрема від вмісту вуглецю. Через збагачення аустеніту вуглецем, в певний момент  $M_p$  знижується до потрібного рівня, наприклад, 250 оС, і температуру ванни можливо знизити без ризику утворення мартенситу. Подальшу витримку на другому етапі обробки вже можна проводити до завершення бейнітного перетворення (Рис. 2). Застосування такої обробки для сталей із підвищеною  $M_p$  в принципі дозволяє отримувати структуру переважно нанобейніту із невеликою кількістю більш грубого бейніту. Така структура має володіти кращим комплексом механічних властивостей, ніж суміш мартенситу і нижнього бейніту.

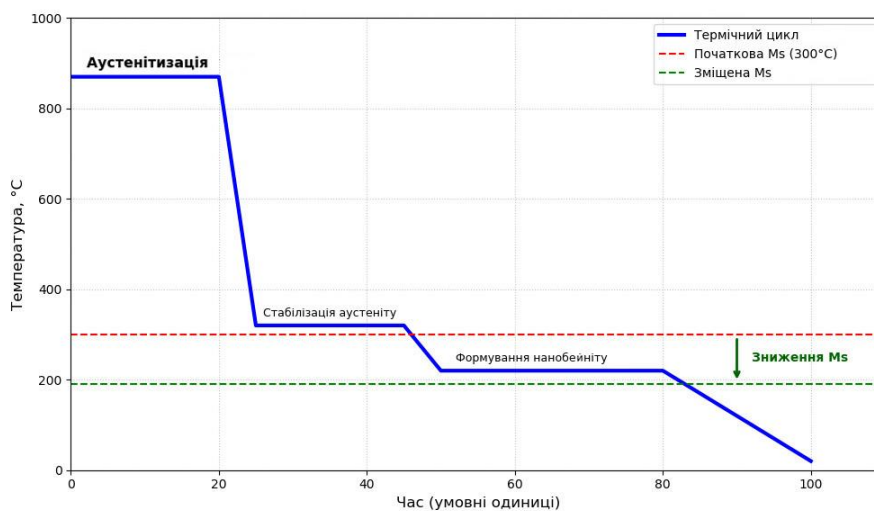


Рисунок 2. Схема ступінчастої термічної обробки на структуру безкарбідного нанобейніту сталей з підвищеною температурою початку мартенситного перетворення.

Застосування зазначеної ступінчастої термічної обробки потребує попередніх досліджень в кожному конкретному випадку. Кінетика бейнітного перетворення значною мірою залежить від хімічного складу аустеніту (марка сталі) і температури ізотермічної витримки. Оскільки початкова  $M_s$  також залежить від хімічного складу аустеніту, на першому етапі розробки режиму термічної обробки необхідно визначити  $M_s$  для аустеніту певної сталі. Це дослідження бажано проводити за допомогою дилатометру, оскільки погрішність розрахункового визначення  $M_s$  за емпіричними моделями складає мінімум 10 °C, що в нашому випадку критично.

На другому етапі необхідно визначити бажану температуру другої стадії ізотермічної витримки (200 °C, 250 °C або інша) і, відповідно до цієї температури, точно визначити час ізотермічної витримки на першій стадії. Недостатній час витримки на першій стадії призведе до утворення мартенситу під час охолодження до температури другої стадії, а надлишковий час збільшить кількість грубого бейніту в структурі. В обох випадках максимально можливий комплекс механічних властивостей не забезпечується.

Таким чином, застосування ступінчастої ізотермічної обробки для конструкційних, зокрема ресорно-пружинних, сталей із підвищеним вмістом кремнію надає можливість отримувати нижній бейніт (нанобейніт) в структурі незалежно від температури початку мартенситного перетворення. Але параметри режиму такої термічної обробки (температура і час витримки для першої стадії) мають бути точно визначеними для кожної конкретної марки сталі.

Подальші дослідження можуть бути спрямованими на визначення параметрів ступінчастої ізотермічної обробки для однієї із найбільш



вживаних ресорно-пружинних сталей із температурою початку мартенситного перетворення в діапазоні 280-300 °С.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Kuziak R., Kawalla R., Waengler S. Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2008. Vol. 8, No. 2. P. 103–117. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60197-6](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60197-6).
2. Schmitt J.-H., Jung T. New Developments of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications. *Comptes Rendus. Physique*. 2018. Vol. 19, No. 8. P. 641–656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.004>.
3. Tisza M. Development of Advanced High Strength Automotive Steels. *Acta Materialia Transylvanica*. 2021. Vol. 4, No. 1. P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.33924/amt-2021-01-02>.
4. Bouaziz O., Allain S., Scott C. P., Cugy P., Barbier D. High Manganese Austenitic Twinning Induced Plasticity Steels: A Review of the Microstructure Properties Relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2011. Vol. 15, No. 4. P. 141–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>.
5. Felix B. An Overview Of TWIP Steels And Their Suitability For Automotive Manufacturing. 2024. 6 Nov. URL: <https://doi.org/10.31224/4090>.
6. Shortening the Heat Treatment of Third Generation Advanced High Strength Steels by Forming Carbide Free Bainite in the Presence of Martensite / D. D. S. Avila, S. M. C. Van Bohemen, R. M. Huizenga et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2025. Vol. 931. 148241. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148241>.
7. Grajcar A., Kuziak R., Zalecki W. Third Generation of AHSS with Increased Fraction of Retained Austenite for the Automotive Industry. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 12, no. 3. P. 334–341. URL: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.06.011>.
8. Bhadeshia H. K. D. H. *Bainite in Steels: Theory and Practice*. 3rd ed. CRC Press, 2019. 636 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315096674>.
9. Very Strong Low Temperature Bainite / F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia, K. J. A. Mawella et al. *Materials Science and Technology*. 2002. Vol. 18, no. 3. P. 279–284. URL: <https://doi.org/10.1179/026708301225000725>.
10. Garcia-Mateo C., Caballero F. G. Ultra-High-Strength Bainitic Steels. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45, no. 11. P. 1736–1740. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1736>.
11. Koistinen D. P., Marburger R. E. A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite-Martensite Transformation in Pure Iron-Carbon Alloys and Plain Carbon Steels. *Acta Metallurgica*. 1959. Vol. 7, no. 1. P. 59–60. URL: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(59\)90170-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(59)90170-1).
12. Carbon Partitioning during Quenching and Partitioning Heat Treatment Accompanied by Carbide Precipitation / Y. Toji, G. Miyamoto, D. Raabe et al. *Acta Materialia*. 2015. Vol. 86. P. 137–147. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.11.049>.
13. Influence of Bainite Reaction on the Kinetics of Carbon Redistribution during the Quenching and Partitioning Process / A. S. Nishikawa, M. J. Santofimia, J. Sietsma et al. *Acta Materialia*. 2018. Vol. 142. P. 142–151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.09.048>.
14. Two-Stage Isothermal Transformation of Austenite into Nanobainite in a Chemically Inhomogeneous Medium-Alloy Steel Containing 0.5 Wt% C / B. Garbarz, J. Marcisz, M. Jelec et al. *Steel Research International*. 2025. 2500903. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.202500903>.

**Бондарєв Я.Г., Шашко В.О.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

**Анотація:** У статті досліджено вплив роботизації та технологій штучного інтелекту на розвиток машинобудування України в умовах цифрової трансформації та післявоєнного відновлення промисловості. Проаналізовано ключові напрями застосування інтелектуальних систем у виробничих процесах, зокрема предиктивне обслуговування обладнання, оптимізацію технологічних операцій, автоматизацію контролю якості та управління виробництвом на основі ERP, MES і SCADA систем. Розглянуто сучасні підходи до використання машинного навчання, комп'ютерного зору, генеративного штучного інтелекту та оброблення природної мови у промислових умовах. Визначено основні переваги впровадження, серед яких підвищення продуктивності, зниження витрат, покращення якості продукції та підвищення безпеки праці. Окреслено ключові проблеми, включаючи високі витрати на впровадження, складність інтеграції із застарілими системами та потребу у висококваліфікованих кадрах. Обґрунтовано значення штучного інтелекту як стратегічного інструменту підвищення конкурентоспроможності та стійкості машинобудівної галузі України.

**Ключові слова:** штучний інтелект, роботизація, машинобудування, автоматизація, машинне навчання, виробничі системи, цифровізація.

**Abstract:** The article examines the impact of robotics and artificial intelligence technologies on the development of Ukraine's mechanical engineering industry in the context of digital transformation and post-war industrial recovery. Key directions of intelligent system application in production processes are analyzed, including predictive maintenance of equipment, optimization of technological operations, automation of quality control, and production management based on ERP, MES, and SCADA systems. Modern approaches to the use of machine learning, computer vision, generative artificial intelligence, and natural language processing in industrial environments are considered. The main advantages of implementation are identified, including increased productivity, cost reduction, improved product quality, and enhanced occupational safety. Key challenges are outlined, such as high implementation costs, difficulties in integration with legacy systems, and the need for highly qualified specialists. The importance of artificial intelligence as a strategic tool for increasing the competitiveness and resilience of Ukraine's mechanical engineering industry is substantiated.

**Keywords:** artificial intelligence, robotics, mechanical engineering, automation, machine learning, production systems, digitalization.

**Постановка проблеми.** Револьюційна концепція в промисловому виробництві набирає обертів. Цей підхід акцентує увагу на гнучкості виробничих систем, оскільки дозволяє обладнанню оперативно перебудовуватися відповідно до поточних виробничих потреб. Фактично йдеться про перехід від жорстко заданих, універсальних машин до більш адаптивного та динамічного виробничого середовища. Штучний інтелект

(ШІ) суттєво змінює підхід до технічного обслуговування обладнання, забезпечуючи можливість не лише виявлення, а й попередження потенційних несправностей. Завдяки аналізу даних із датчиків і застосуванню алгоритмів машинного навчання система може знаходити закономірності, що передують відмовам техніки, що, у свою чергу, дає змогу своєчасно проводити обслуговування та уникати простоїв [1].

Роботизація виробництва являє собою впровадження різноманітних технологій, від роботів і машин до спеціалізованого програмного забезпечення, з метою автоматизації виробничих операцій та зменшення ролі ручної праці. Основна ідея полягає у підвищенні ефективності, точності та швидкості виконання процесів, а також у зниженні витрат і виробничих ризиків [2]. Якщо раніше інженерна діяльність значною мірою базувалася на запам'ятовуванні формул, ручному кресленні та експериментах, то сьогодні вона активно трансформується під впливом ШІ. Електротехніка та механічна інженерія вже не існують ізольовано, а тісно взаємодіють із цифровими технологіями, сенсорами та концепцією цифрових двійників [3].

Машинобудівна галузь України традиційно відіграє ключову роль у структурі промисловості, оскільки забезпечує розвиток таких напрямів, як енергетика, транспорт, оборонна сфера та інфраструктурні проєкти. За статистичними даними, у 2021 році її частка сягала близько 12% від загального обсягу промислового виробництва. Водночас у 2022–2023 роках цей показник зменшився до приблизно 7–8%, що пов'язано з наслідками воєнних дій, пошкодженням підприємств і втратою частини ринків збуту. У зв'язку з цим доцільно окремо розглянути основні проблеми, з якими стикається галузь.

У цьому контексті актуальності набуває дослідження ролі штучного інтелекту в розвитку машинобудування, оскільки саме він виступає одним із ключових інструментів цифровізації та формування сучасної стратегії розвитку галузі [4].

Аналіз наукових праць свідчить про розвиток досліджень у галузі застосування нейронних мереж у виробничих системах. Зокрема, у роботах Суботіна О. та Новікова Д. розглянуто можливості використання ШІ для автоматизації роботизованих процесів у машинобудуванні. Дослідники Красношарпа Н., Малієнко С., Гуда А. та Селив'ярова Т. [5] приділяють увагу як перевагам, так і обмеженням застосування ШІ при вирішенні інженерних задач. У свою чергу, Голубовський М. П. і Ясний В. П. [6] здійснили детальний огляд використання методів ШІ та машинного навчання в прикладній механіці. Питання модернізації бізнес-процесів українських підприємств із застосуванням ШІ висвітлено у дослідженнях Ключа Ю. І. та Гуменюка В. В. [4, 7]. Згадані вчені зробили важливий внесок у вивчення ШІ. Їхні напрацювання стали основою для подальшого застосування цих технологій у машинобудуванні.

Мета даного дослідження – з’ясувати, як ІІІ і роботизація можуть використовуватися для розвитку машинобудування в Україні, а також розглянути, як ці технології вже впроваджуються на підприємствах, проаналізувати труднощі та перспективи застосування.

Роботизація виробництва передбачає використання спеціалізованого обладнання, робототехнічних комплексів, програмного забезпечення та систем управління, що сприяють підвищенню продуктивності, ефективності та якості кінцевої продукції. Важливо розуміти, що автоматизація охоплює не лише механічні елементи, а й електронні компоненти та програмні рішення, які забезпечують керування виробничими процесами. Значну роль у цьому відіграють такі системи, як ERP, MES і SCADA, які дозволяють здійснювати комплексне управління підприємством — від закупівлі сировини до постачання готової продукції. Це дає змогу не тільки оптимізувати процеси, але й покращити якість за рахунок точнішого контролю та аналізу даних.

Роботизація допомагає вирішувати низку актуальних проблем сучасного виробництва та відкриває нові можливості для його розвитку. Зокрема, вона забезпечує безперервну роботу обладнання, що позитивно впливає на продуктивність, а також дозволяє скоротити витрати за рахунок оптимізації ресурсів і зменшення кількості помилок. Окрім цього, автоматизовані системи гарантують високу точність і повторюваність операцій, що безпосередньо впливає на якість продукції.

Не менш важливим є підвищення рівня безпеки, небезпечні або важкі операції можуть виконуватися машинами, що знижує ризик травматизму. Сучасні системи також відзначаються гнучкістю — їх можна переналаштовувати під різні завдання, що дозволяє підприємствам швидко реагувати на зміни ринку. Додатковою перевагою є масштабованість, виробництво можна розширювати шляхом додавання нових ліній або підвищення ефективності вже наявних.

Автоматизовані рішення також значно покращують управління виробництвом, оскільки дозволяють збирати та аналізувати дані в режимі реального часу, що є важливим для прийняття управлінських рішень. Крім того, вони сприяють екологічній стійкості завдяки більш ефективному використанню ресурсів і зменшенню відходів, що особливо актуально в умовах посилення екологічних вимог [2].

Системи, побудовані на основі ІІІ, відіграють ключову роль у розвитку роботизації, вони дозволяють оптимізувати виробничі процеси, підвищувати ефективність операцій та зменшувати втрати. У результаті підприємства отримують більш гнучке, економічно ефективне та адаптивне виробництво [1].

Сучасне виробництво вже не обмежується лише виготовленням продукції — воно стає інтелектуальним процесом. ІІІ використовується для вдосконалення роботи роботів на конвеєрі, автоматичного налаштування параметрів 3D-друку та швидкого виявлення дефектів

продукції. У високоточних галузях, таких як авіакосмічна чи автомобільна промисловість, контроль якості дедалі частіше здійснюється за допомогою систем машинного навчання [3].

Технології підключеного виробництва, які базуються на ШІ, змінюють підхід до обміну інформацією на виробництві. Вони забезпечують взаємодію в режимі реального часу як між людиною та машиною, так і між працівниками, що сприяє ефективнішому прийняттю рішень. Такі рішення формують основу для створення інтегрованої та інтелектуальної виробничої екосистеми. Вони підвищують безпеку та ефективність праці, надаючи працівникам оперативну аналітику та сповіщення про можливі ризики [1].

Сфера виробництва є надзвичайно різноманітною, вона охоплює як наукомістке машинобудування, так і аграрний сектор та виготовлення товарів широкого вжитку. Саме тому можливості застосування сучасних технологій ШІ тут є дуже широкими. Серед основних технологій варто виділити кілька ключових напрямів (табл.1).

Таблиця 1. Класифікація та сфери застосування ключових технологій штучного інтелекту у виробництві

| Технологія ШІ                   | Сутність та особливості підходу                                                                             | Сфери застосування та приклади ефективності                                                                 |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Машинне навчання (ML)           | Навчання систем на основі даних без прямого програмування кожного кроку; постійне вдосконалення алгоритмів. | Технічна діагностика та предиктивне обслуговування (наприклад, скорочення витрат Siemens на ремонт на 20%). |
| Глибоке навчання (DL)           | Використання нейронних мереж для роботи з великими обсягами складних і неструктурованих даних.              | Аналіз зображень, пошукові системи та обробка інформації з датчиків у реальному часі.                       |
| Генеративний ШІ                 | Спрямований на створення нового контенту (текстів, зображень, моделей) на основі наявних даних.             | Оптимізація CAD/CAE систем для швидкої перевірки конструкцій (скорочення часу розробки на 30–40%).          |
| Оброблення природної мови (NLP) | Забезпечення взаємодії людини з комп'ютером у звичній мовній формі для аналізу документів.                  | Робота з технічною документацією, автоматизація звітів та підтримка діалогових систем управління.           |
| Розпізнавання мовлення          | Перетворення усного мовлення на текст для подальшої обробки та аналізу.                                     | Голосові помічники та інтерфейси керування обладнанням без використання рук.                                |
| Машинний зір                    | Аналіз візуальної інформації з відео та зображень для розпізнавання об'єктів.                               | Автоматизація контролю якості (зниження рівня браку в автопромі на ~25%) та моніторинг процесів.            |

Сучасні технології ШІ відкривають широкі можливості для підвищення ефективності виробництва, автоматизації процесів і покращення якості продукції [8] (рис. 1).

Попри значні переваги, використання ШІ у виробництві супроводжується рядом складнощів. Його інтеграція в існуючі системи потребує суттєвих фінансових вкладень і високого рівня спеціалізованих знань. Особливо гостро стоїть проблема взаємодії сучасних рішень із застарілим обладнанням, що часто ускладнює впровадження нових технологій.

Серед основних труднощів можна виділити високі витрати на впровадження та підтримку систем ШІ, необхідність залучення кваліфікованих фахівців, а також проблеми сумісності між новими та існуючими технологіями. Важливим фактором є й залежність алгоритмів від якості та надійності даних. Крім того, під час впровадження можливі тимчасові простой, що впливають на продуктивність. Не менш складним є питання масштабування таких рішень на різні підрозділи підприємства.



Рисунок 1. Інтелектуальна виробнича екосистема

Окрему увагу слід приділити етичним аспектам використання ШІ. Впровадження таких технологій має супроводжуватися дотриманням принципів прозорості, відповідальності та справедливості з урахуванням їхнього впливу на суспільство [1].

Для більш глибокого розуміння впливу ШІ на машинобудування варто детальніше розглянути основні напрями його застосування. По-перше, це предиктивне обслуговування обладнання, завдяки сенсорам і алгоритмам машинного навчання можна заздалегідь визначати можливі несправності. Наприклад, використання таких підходів дозволило компанії Siemens скоротити витрати на ремонт приблизно на 20%. Ще одним важливим напрямом є оптимізація виробничих процесів. Алгоритми ШІ

допомагають зменшити енергоспоживання та більш ефективно організувати обробку деталей, що в середньому дає економію на рівні 10–15%. У сфері розробки продукції системи CAD/CAE з елементами ШІ дають змогу швидко перевіряти різні варіанти конструкцій у віртуальному середовищі, скорочуючи час створення нових виробів на 30–40%. Не менш значущою є автоматизація контролю якості. Використання комп'ютерного зору дозволяє знизити рівень браку, наприклад, у автомобільній промисловості цей показник може зменшуватися приблизно на чверть.

З огляду на швидкий розвиток технологій, потенціал ШІ в цій сфері фактично не має чітких меж. Для оцінки ефективності його впровадження часто застосовують узагальнені економічні моделі, які базуються на класичних підходах до оцінювання інновацій. У найпростішому вигляді економічний ефект визначається як сума приросту результатів і зекономлених витрат.

Нейронна мережа може суттєво підвищити стійкість машинобудівного сектору України навіть в умовах воєнного часу. Його роль не обмежується автоматизацією, він забезпечує гнучкість, адаптацію до кризових ситуацій і більш ефективне використання ресурсів. Зокрема, у виробничій сфері інтелектуальні системи планування дають змогу швидко перебудовувати процеси у випадку пошкодження обладнання або перебоїв з електропостачанням. Алгоритми прогнозування допомагають рівномірно розподіляти навантаження між доступними потужностями, зменшуючи простої, а системи комп'ютерного зору забезпечують стабільний контроль якості навіть у складних умовах. У логістиці ШІ використовується для управління ланцюгами постачання, системи можуть оперативно знаходити альтернативних постачальників або маршрути у разі обмежень чи руйнування інфраструктури. Це дозволяє зменшити витрати та уникнути зупинок виробництва через дефіцит ресурсів.

Окремий напрям – кібербезпека. Інтелектуальні системи здатні виявляти кібератаки на ранніх етапах, що є особливо важливим у період підвищених загроз. Водночас забезпечується захист критично важливих даних, таких як технічна документація чи інженерні розробки.

Також ШІ активно застосовується для прогнозування ризиків і сценарного планування. Це дозволяє підприємствам заздалегідь оцінювати можливі наслідки різних загроз і формувати варіанти дій, включаючи релокацію виробництва або зміну логістичних схем. У сфері енергоспоживання інтелектуальні системи допомагають оптимізувати використання ресурсів і підтримувати безперебійну роботу навіть за умов обмеженого енергопостачання. Крім того, аналіз стану обладнання дозволяє завчасно виявляти потенційні поломки. Важливу роль ШІ відіграє і в розвитку оборонного машинобудування, прискорюючи проєктування техніки та оптимізуючи виробничі процеси. У сфері експорту аналітичні інструменти допомагають знаходити нові ринки збуту та адаптуватися до змін зовнішньої кон'юнктури.



У підсумку – використання ІІІ дає можливість не лише зберегти галузь у складних умовах, а й закласти основу для її подальшого розвитку та підвищення її конкурентоспроможності [4].

Висновки. Потенційний вплив ІІІ на виробничу галузь є значним, потрібно переосмислити виробничі парадигми, що призведе до більш персоналізованих та ефективних виробничих процесів. У міру того, як ІІІ продовжує розвиватися, він стимулюватиме інновації, підвищуватиме конкурентоспроможність і зрештою трансформуватиме виробничу галузь.

Серед перспективних напрямів варто відзначити інтеграцію ІІІ в роботизовані комплекси та автономні виробничі системи. Йдеться, зокрема, про використання роботів-маніпуляторів із системами комп'ютерного зору та можливістю самонавчання, розвиток гнучких виробничих ліній, а також впровадження автономного транспорту для внутрішньої логістики підприємств. Такі рішення дозволяють підвищити продуктивність і зменшити вплив людського фактора, що особливо актуально в умовах дефіциту кадрів у післявоєнний період. Отже, ІІІ поступово стає основою інноваційного розвитку машинобудування України. Його застосування сприяє підвищенню ефективності виробництва, екологічності процесів, інтеграції у глобальні виробничі ланцюги та зміцненню експортного потенціалу галузі.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Адаптивний дизайн у машинобудуванні: як штучний інтелект забезпечує налаштовувані виробничі рішення для 2024 року. URL: <https://www.fuyumotion.com/uk/news/adaptive-design-in-machinery-how-ai-is-enabling-customizable-production-solutions-for-2024/> (дата звернення: 25.03.2026р.).
2. Автоматизація виробництва: що це, її плюси та мінуси. URL: <https://abplanalp.ua/avtomatyzaciya-vyrobnytstva-sho-ce-yiyi-plyusy-ta-minusy> (дата звернення: 25.03.2026р.).
3. Як ІІІ революціонізує машинобудування та електротехніку. URL: <https://ua.linkedin.com/pulse/how-ai-revolutionizing-mechanical-electrical-engineering-5qduc?tl=uk> (дата звернення: 25.03.2026р.).
4. Пінчук О.В. Штучний інтелект як інструмент розвитку інновацій у машинобудуванні. Економіка та суспільство. 2025. Вип. 77. С. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-77-109>.
5. Красношанка Н., Малієнко С., Гуда А., Селив'ярова Т. Застосування штучного інтелекту для розв'язання інженерних задач: переваги та виклики. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. 2024. № 1. С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.080>.
6. Голубовський М. П., Ясній В. П. Огляд застосування штучного інтелекту та машинного навчання у прикладній механіці. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2024. № 1(56). С. 79–91. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(56\)-79-91](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(56)-79-91).
7. Ключ Ю. І., Гуменюк В. В. Використання штучного інтелекту в бізнес-процесах підприємства. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2025. № 3(289). С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-289-3-21-27>.
8. Штучний інтелект у виробництві: переваги та приклади застосування URL: <https://wezom.com.ua/ua/blog/shtuchniy-intelekt-u-virobnitstvi-perevagi-ta-prikladi-zastosuvannya> (дата звернення: 26.03.2026р.).



**Борисенко Ю.Ю.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ**

**Анотація:** У роботі досліджено можливості підвищення ефективності дугового наплавлення шляхом комбінованого застосування екзотермічних компонентів у складі наплавлювальних матеріалів та електромагнітного впливу на зварювальну ванну. Розглянуто фізичні та технологічні аспекти додаткового тепловиділення, що виникає внаслідок екзотермічних реакцій, а також механізми впливу магнітних полів на поведінку електричної дуги та гідродинаміку розплавленого металу. Показано, що використання екзотермічних компонентів сприяє інтенсифікації процесу наплавлення, підвищенню продуктивності та зниженню енерговитрат, тоді як електромагнітний вплив забезпечує стабілізацію процесу, покращення формування наплавленого шару та зменшення дефектності. Обґрунтовано доцільність комплексного використання зазначених факторів як взаємодоповнюючих механізмів керування процесом. Визначено перспективи подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію технологічних режимів і підвищення експлуатаційних характеристик наплавлених покриттів у машинобудуванні.

**Ключові слова:** дугове наплавлення, екзотермічні реакції, електромагнітний вплив, зварювальна ванна, продуктивність, якість покриття, машинобудування.

**Abstract:** The paper investigates the possibilities of improving the efficiency of the arc surfacing process through the combined application of exothermic components in surfacing materials and electromagnetic influence on the weld pool. The physical and technological aspects of additional heat generation caused by exothermic reactions, as well as the mechanisms of magnetic field influence on arc behavior and molten metal hydrodynamics, are considered. It is shown that the use of exothermic components contributes to process intensification, increased productivity, and reduced energy consumption, while electromagnetic influence ensures process stabilization, improved formation of the deposited layer, and reduction of defects. The feasibility of the integrated application of these factors as complementary control mechanisms of the surfacing process is substantiated. Prospects for further research aimed at optimizing technological modes and improving the operational characteristics of deposited coatings in mechanical engineering are identified.

**Keywords:** arc surfacing, exothermic reactions, electromagnetic influence, weld pool, productivity, coating quality, mechanical engineering.

Дугове наплавлення є одним із найбільш поширених технологічних процесів, що застосовуються для відновлення та зміцнення поверхонь деталей машин і обладнання. Даний процес забезпечує формування покриттів із підвищеними експлуатаційними властивостями, що значною мірою визначає довговічність виробів.

В умовах сучасного виробництва особливої актуальності набувають питання підвищення продуктивності наплавлення, зниження енерговитрат та забезпечення стабільності технологічних режимів. Для досягнення цих

цілей застосовуються різні підходи, серед яких є використання додаткових джерел теплової енергії та фізичних впливів на зварювальну ванну.

Метою роботи є аналіз можливостей підвищення ефективності дугового наплавлення за рахунок комбінованого застосування екзотермічних компонентів та електромагнітного впливу та обґрунтування доцільності сумісного застосування екзотермічних реакцій та керованих магнітних полів (як взаємодоповнюючих факторів інтенсифікації процесу).

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності наплавлення є використання екзотермічних компонентів у складі наплавлювальних матеріалів [1]. У процесі наплавлення такі компоненти вступають у хімічні реакції, що супроводжуються виділенням додаткової теплової енергії. Додаткове тепловиділення призводить до підвищення температури зварювальної ванни, інтенсифікації плавлення електродного та основного металу, а також зниження питомих витрат електричної енергії.

Відомо [1,2] водночас, що використання екзотермічних компонентів дозволяє підвищити продуктивність наплавлення на 10–25%. Крім того, при напавленні покращуються умови засвоєння легуючих елементів, що сприяє формуванню наплавлених шарів із заданими фізико-механічними властивостями. Водночас надмірне тепловиділення може призводити до перегріву ванни та погіршення стабільності процесу, що потребує додаткового контролю [3].

Іншим ефективним засобом керування процесом наплавлення є використання електромагнітного впливу на дугу та зварювальну ванну. Магнітні поля дозволяють змінювати форму та положення дуги, а також характер руху розплавленого металу [4, 5].

Фізично цей вплив реалізується через дію сили Лоренца на струмопровідний розплав, що викликає зміну гідродинамічних потоків у зварювальній ванні. Це сприяє інтенсифікації перемішування металу, вирівнюванню температурного поля та покращенню структури наплавленого шару. Застосування керованих магнітних полів дозволяє стабілізувати горіння дуги, керувати геометрією наплавленого валика, зменшувати дефектоутворення та покращувати однорідність металу [5, 6].

Поєднання екзотермічних реакцій та електромагнітного впливу є перспективним напрямом інтенсифікації процесу наплавлення. Екзотермічні реакції забезпечують додаткове тепловиділення та підвищують продуктивність процесу, однак можуть викликати нестабільність зварювальної ванни. У свою чергу, електромагнітний вплив дозволяє керувати гідродинамікою розплаву та компенсувати негативні ефекти перегріву. Комбіноване застосування цих факторів дозволить підвищити стабільність процесу, покращити формування наплавленого шару, зменшити ризик утворення пористості та неоднорідності структури та оптимізувати технологічні режими.

Таким чином, зазначені фактори можуть розглядатися як взаємодоповнюючі механізми керування процесом наплавлення. Подальший розвиток даного напрямку відкриває можливість підвищення продуктивності процесу дугового наплавлення, забезпечення стабільності та контролю геометрії наплавленого шару, зменшення дефектності та неоднорідності структури металу, підвищення засвоєння легуючих елементів, а також оптимізації енергоспоживання. Реалізація комплексного підходу дозволить створювати наплавлені покриття з передбачуваними механічними та експлуатаційними властивостями, що значно підвищить довговічність деталей та ефективність відновлювальних технологій у важкому машинобудуванні та металургії.

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано можливості підвищення ефективності дугового наплавлення за рахунок використання екзотермічних компонентів.
2. Встановлено, що електромагнітний вплив дозволяє керувати стабільністю дуги та процесами у зварювальній ванні.
3. Обґрунтовано доцільність комбінованого застосування екзотермічних реакцій та магнітного поля як взаємодоповнюючих факторів.
4. Визначено основні напрями подальших досліджень у даній галузі.
5. Показано, що комбінований підхід є перспективним для інтенсифікації процесів наплавлення у важкому машинобудуванні та ремонті металургійного обладнання.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Власов А. Ф., Макаренко Н. А. Екзотермічні суміші в зварювальному виробництві. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, №1 (32), 2014., с 173-179.
2. Власов А.Ф., Макаренко Н. О., Куцій Г.М. Нагрів і плавлення електродів з екзотермічною сумішшю в покритті. Автоматичне зварювання, №6-7 (733), 2014., с. 151 – 154.
3. Чигарев В.В., Зареченський Д.А., Білик О.Г., Особливості плавлення порошкових стрічок з екзотермічними сумішами в наповнювачі // Автоматичне зварювання – 2007. - №2. – с. 53-55.
4. Размишляєв О.Д, Агєєва М.В. Характеристики стовпа дуги при ТІГ-зварюванні з дією поздовжнього магнітного поля // Журнал «Автоматичне зварювання», № 11, 2021, с. 3-7
5. Размишляєв О.Д., Агєєва М. В. Вплив поперечного магнітного поля на геометрію валіків при відновленні виробів// УДК 621.791.927.5 ISSN 1993-8322. ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (44), 2018. с. 77-79
6. Лебедев В. О. Інноваційна техніка і технології для електродугового зварювання та наплавлення : монографія / В. О. Лебедев, С. Ю. Максимов, М. М. Бриков [та ін.]. - Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – 262 с. - ISBN 978-617-7932-49-8.

**Ворона С.О., Онищук С.Г., Тулупов В.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОБУДУВАННІ**

**Анотація:** У статті досліджено комбіновані методи обробки деталей машин, зокрема електромагнітно-абразивну обробку та фрикційне електроімпульсне вигладжування, як ефективні засоби підвищення якості поверхневого шару. Розглянуто фізичну сутність процесів, що базуються на поєднанні механічного, електричного та електромагнітного впливів на матеріал. Проаналізовано особливості застосування магнітно-абразивних порошків з додаванням алюмінієвої пудри, що забезпечує додаткове тепловиділення та формування зносостійкого покриття. Наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують підвищення твердості та зменшення шорсткості поверхні при зміні режимів обробки. Окрему увагу приділено фрикційному електроімпульсному модифікуванню з використанням дисульфиду молібдену, що дозволяє значно підвищити мікротвердість і зносостійкість поверхневого шару. Обґрунтовано ефективність комбінованих методів як перспективного напрямку підвищення експлуатаційних характеристик деталей у машинобудуванні.

**Ключові слова:** комбінована обробка, електромагнітно-абразивна обробка, електроімпульсне вигладжування, шорсткість, твердість, зносостійкість, машинобудування.

**Abstract:** The article investigates combined methods of machining parts, in particular electromagnetic-abrasive processing and frictional electropulse smoothing, as effective means of improving the surface layer quality. The physical essence of the processes based on the combination of mechanical, electrical, and electromagnetic effects on the material is considered. The features of using magnetic-abrasive powders with aluminum additives, which provide additional heat generation and formation of a wear-resistant coating, are analyzed. The results of experimental studies confirming an increase in hardness and a decrease in surface roughness depending on processing modes are presented. Special attention is paid to frictional electropulse modification using molybdenum disulfide, which significantly increases microhardness and wear resistance of the surface layer. The efficiency of combined methods as a promising direction for improving the operational characteristics of machine parts is substantiated.

**Keywords:** combined processing, electromagnetic-abrasive processing, electropulse smoothing, roughness, hardness, wear resistance, mechanical engineering.

Технологічний процес виготовлення деталей типу тіл обертання повинен забезпечити виконання наступних завдань: забезпечення геометричних параметрів (розмірів та форми) з заданою точністю та фізико-механічних властивостей поверхні деталі. Вирішення цих завдань може бути досягнуто використанням комбінованих методів обробки [1].

Метою роботи є дослідження комбінованих технологічних методів обробки зовнішніх поверхонь деталей типу тіл обертання.

Особливістю комбінованих методів обробки є поєднання декількох фізико-хімічних та механічних способів впливу на оброблюваний матеріал. Зокрема, використовують електричний струм, електромагнітне поле та інші джерела енергії.

Сутністю електромагнітно-абразивної обробки є використання магнітно-абразивного порошку з додаванням алюмінієвої пудри для абразивного знімання матеріалу в постійному магнітному полі. Під дією електричного струму алюміній в складі алюмінієвої пудри розплавляється й утворює на поверхні деталі зносостійке покриття [2].

Реалізація способу відбувається з використанням спеціальної установки (рис. 1). Спеціальна установка закріплюється в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата. Електричний струм подається від блоку живлення з характеристиками: сила струму  $I=0\ldots 2,5$  А; напруга  $U = 0\ldots 30$  В. Заготовка, що установлюється в трикулачковому патроні, отримує обертання з частотою  $100 \text{ хв}^{-1}$ , барабан з магнітом обертається з частотою  $800 \text{ хв}^{-1}$ . Заготовка виготовлена зі сталі 40Х, твердість 215 НВ, шорсткість поверхні  $Ra\ 2,5$  мкм.



*Рисунок 1. Експериментальна установка для проведення електромагнітно-абразивної обробки [2]. 1 – заготовка; 2 – патрон ГОСТ 2675-80; 3 – барабан з магнітом  $\varnothing 75$  мм; 4 – двигун постійного струму (ДПС); 5 – струмознімач; 6 – тримач; 7 – різцетримач; 8 – тара з абразивом та Al порошком*

Експериментальні дослідження проведені з використанням алюмінієвої пудри ПАП ГОСТ 2494-71 10...50%. Час обробки від 5 до 15 хв. Досліджувався вплив режимів електромагнітно-абразивної обробки на шорсткість та твердість поверхні деталі. Результати досліджень представлені на рис. 2.

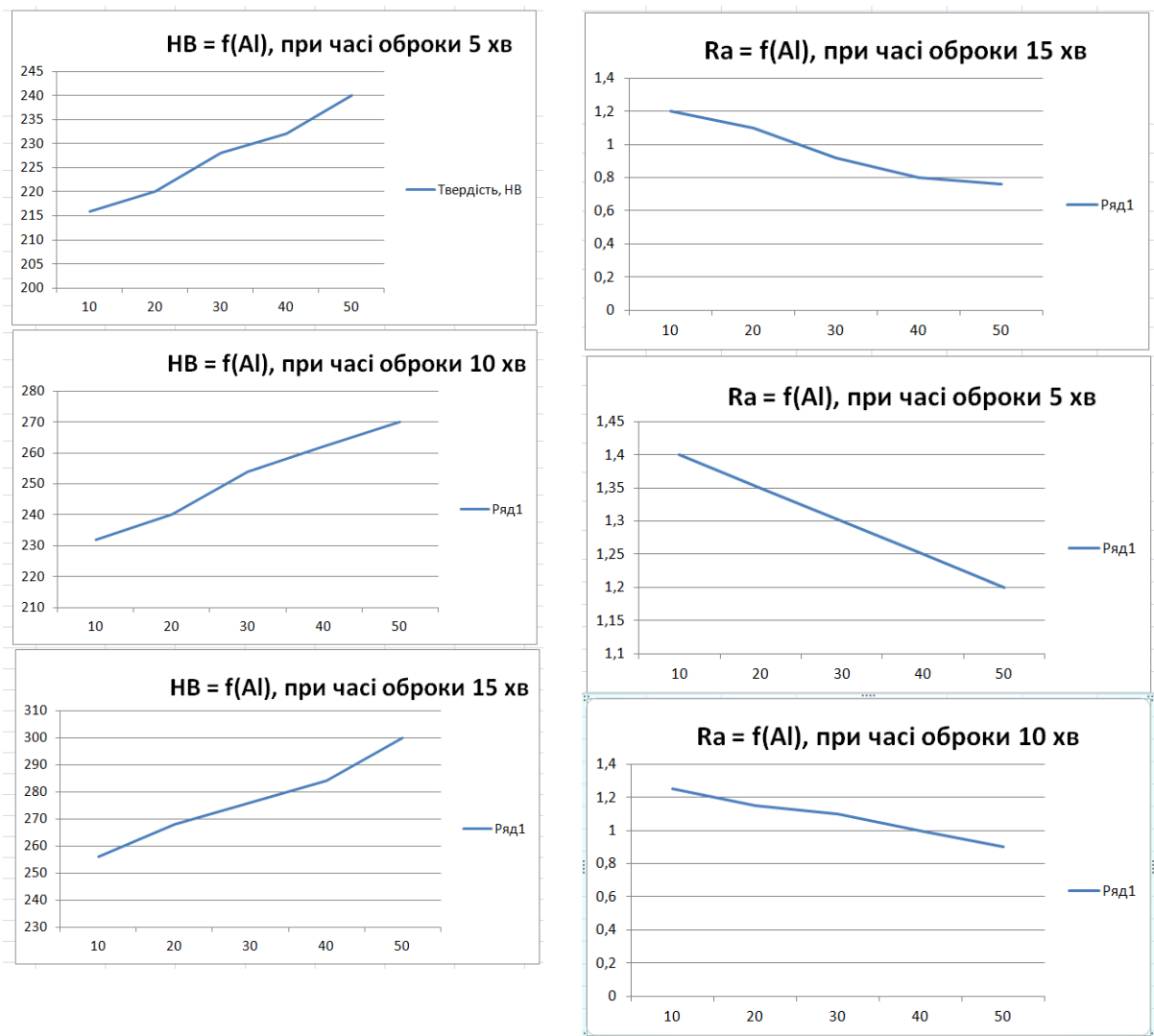


*Рисунок 2. Залежність твердості та шорсткості від часу обробки при електромагнітно-абразивній обробці*

Сутність фрикційного електроімпульсного модифікування дисульфідом молібдену є нанесення шару матеріалу як твердої змазки на поверхню деталі й подальшого вигладжування з одночасним пропусканням електричного імпульсного електричного струму через зону контакту (рис. 3) [3].

Реалізація фрикційного електроімпульсного модифікування здійснюється на токарно-гвинторізному верстаті з використання установки імпульсного струму. Оброблюваний матеріал – сталь 40Х. Результатом фрикційного електроімпульсного модифікування є насичення поверхні оксидом молібдену, що утворюється в результаті хімічної реакції.

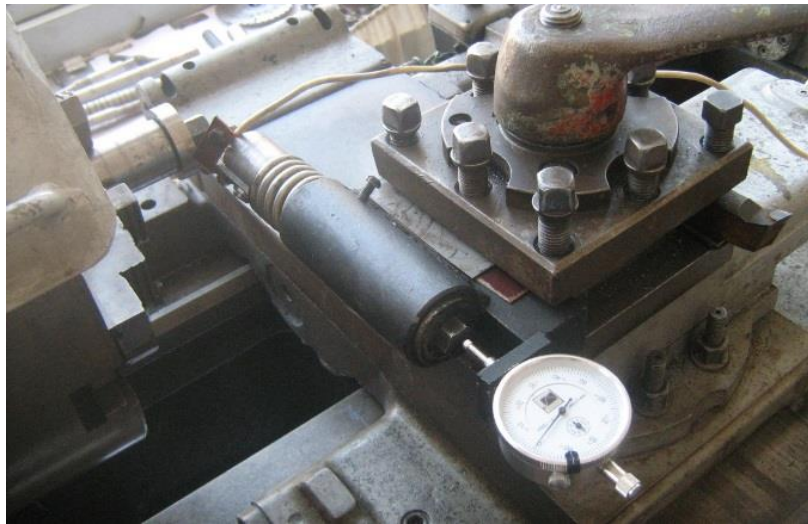


Рисунок 3. Реалізація способу фрикційного електроімпульсного модифікування [3]

Металографічні дослідження показують збільшення мікротвердості поверхневого шару після фрикційного електроімпульсного модифікування у три рази, глибина зміцненого шару 0,25 мм. Зносостійкість поверхні після електроімпульсного вигладжування збільшується в 1,8 рази. Шорсткість поверхні  $Ra$  0,25 мкм.

### ВИСНОВОК

Використання комбінованих технологічних методів обробки зовнішніх поверхонь дозволяє забезпечити показники точності та якості поверхні, а саме, збільшити твердість поверхні та зменшити шорсткість. Зносостійкість поверхні після електроімпульсного вигладжування збільшується в 1,8 рази.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- 1 Афтаназів І.С., Кусий Я.М. Аналіз та вибір оптимальних фінішних операцій технологічного процесу виготовлення довгомірних циліндричних деталей // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". 2000. № 412. С. 3-11.
- 2 Ковалевський С.В., Тулупов В.І., Онищук С.Г. Дослідний лабораторний практикум. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 131 Прикладна механіка з курсів «Технологія функціональних та нано-поверхонь», «Спецкурс за напрямком магістерської роботи». Краматорськ: ДДМА, 2022. 128 с.
- 3 Тулупов В.І., Онищук С.Г. Дослідження зносостійкості металевих зразків після електроімпульсного вигладжування з модифікуванням поверхні // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII міжнародної науково-технічної конференції, 21-24 грудня 2020 р., Краматорськ, 2020. С. 89.

**Врублевський І. Б.** (Національний Університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна).

## **ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА АДИТИВНИХ, СУБТРАКТИВНИХ ТА ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МАШИНОБУДУВАННІ**

**Анотація:** У статті виконано комплексний техніко-економічний аналіз адитивних, субтрактивних та гібридних технологій виготовлення складнопрофільних деталей у машинобудуванні. Розглянуто особливості формування виробів методами пошарового нарощування матеріалу, традиційної механічної обробки та їх інтегрованого застосування в межах єдиного виробничого циклу. Проаналізовано технічні переваги та обмеження кожного підходу, зокрема точність обробки, рівень шорсткості поверхні, матеріаломісткість та можливості формоутворення. Встановлено, що гібридні технології дозволяють поєднати високу геометричну гнучкість адитивних процесів із точністю субтрактивної обробки, забезпечуючи зменшення втрат матеріалу та скорочення тривалості виробничого циклу. Оцінено економічну доцільність застосування гібридних систем з урахуванням вартості обладнання, обсягів виробництва та складності виробів. Обґрунтовано доцільність використання таких технологій для виготовлення високовартісних деталей складної геометрії та визначено напрями подальшої формалізації вибору технологічних стратегій у машинобудуванні.

**Ключові слова:** адитивні технології, субтрактивні технології, гібридне виробництво, машинобудування, техніко-економічна оцінка, ефективність, виробничі процеси.

**Abstract:** The article presents a comprehensive technical and economic analysis of additive, subtractive, and hybrid technologies for manufacturing complex mechanical engineering parts. The features of product formation using layer-by-layer material deposition, conventional machining, and their integrated application within a single production cycle are considered. The technical advantages and limitations of each approach are analyzed, including machining accuracy, surface roughness, material consumption, and forming capabilities. It is established that hybrid technologies combine the geometric flexibility of additive processes with the precision of subtractive machining, ensuring reduced material losses and shorter production cycles. The economic feasibility of hybrid systems is evaluated considering equipment cost, production volume, and part complexity. The application of such technologies for manufacturing high-value components with complex geometry is substantiated, and directions for further formalization of technological decision-making in mechanical engineering are determined.

**Keywords:** additive technologies, subtractive technologies, hybrid manufacturing, mechanical engineering, technical and economic assessment, efficiency, production processes.

### **1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ І ПРАКТИЧНИМИ РОБОТАМИ**

Виготовлення складних машинобудівних виробів, зокрема штамів, прес-форм, медичних імплантатів і деталей з внутрішніми каналами,



потребує забезпечення геометричної точності, експлуатаційної надійності та економічної доцільності. Субтрактивне виробництво (SM), яке базується на видаленні матеріалу із заготовки, гарантує високу точність обробки, проте характеризується значними втратами сировини та обмеженими можливостями формоутворення. Адитивне виробництво (AM) дає змогу пошарово створювати вироби з високою топологічною свободою, але часто поступається традиційним методам у точності та якості поверхонь. Інтеграція цих двох концепцій у межах гібридного виробництва (HM) дає змогу поєднати геометричну гнучкість адитивних методів із точністю та якістю обробки, характерними для субтрактивних технологій. Однак вибір найефективнішої технології для конкретної деталі залишається складною науково-практичною задачею.

## **2.АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ**

Питання застосування адитивних, субтрактивних та гібридних технологій активно досліджується у науці та промисловості. Доведено, що поєднання процесів дає змогу суттєво оптимізувати матеріальні витрати та зменшити час виготовлення. У промисловій практиці компанія GE Aviation успішно застосувала технологію Selective Laser Melting (SLM) з подальшою фінішною обробкою на верстатах з ЧПК для виробництва паливних форсунок, що дозволило знизити масу деталі на 25% та зменшити споживання пального на 15% [1]. Компанія Bugatti застосувала гібридний підхід для виготовлення гальмівних супортів із титанового сплаву Ti6Al4V, досягнувши зниження маси на 40% за одночасного підвищення міцності на 20% [2]. В оглядових наукових працях, зокрема у роботах W. Grzesik та G. Manogharan, представлено економічні моделі, які підтверджують значну економію матеріалів у гібридному виробничому циклі, проте вказують на високі початкові капіталовкладення як головний стримуючий чинник [3][4].

## **3.ФОРМУЛЮВАННЯ НЕВИРІШЕНИХ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ**

Незважаючи на значні переваги та підтверджену ефективність інтегрованих систем, їх широке впровадження стримується низкою суттєвих перешкод. По-перше, відсутня єдина нормативна база та стандарти управління гібридними процесами. По-друге, вибір між AM, SM та HM підходами здебільшого здійснюється на основі евристичних міркувань та емпіричного досвіду, оскільки комплексне обґрунтування потребує врахування суперечливих чинників. Наразі бракує універсальних формалізованих моделей, які б в автоматизованому режимі зіставляли технічні характеристики, економічні витрати та екологічні показники для вибору найбільш раціонального маршруту виготовлення.

#### 4. ЦІЛІ СТАТТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою статті є здійснення комплексної техніко-економічної оцінки альтернативного застосування адитивних, субтрактивних та гібридних технологій у сучасному машинобудуванні.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- Визначити технічні переваги та недоліки адитивних, субтрактивних і гібридних технологій;
- Оцінити економічну та матеріальну ефективність гібридних систем порівняно з традиційними;
- Сформулювати ключові критерії та обмеження щодо доцільності застосування адитивних, субтрактивних і гібридних технологій.

#### 5. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класичні субтрактивні технології, що реалізуються на сучасних фрезерних та токарних обробних центрах з ЧПК, гарантують лінійні допуски в діапазоні 0,001–0,01 мм і досягнення шорсткості поверхні Ra 0,002–0,008 мкм. Проте за традиційної механічної обробки великогабаритних заготовок втрати матеріалу у вигляді стружки можуть становити від 50% до 90%. На противагу цьому, адитивні процеси використовують матеріал безпосередньо для побудови об'єкта, що суттєво зменшує відходи (до 5–10%) [5]. Разом з тим, точність металевих адитивних систем (наприклад, SLM чи DMLS) залишається нижчою, а типові допуски становлять 0,05–0,2 мм, що зумовлює необхідність подальшої постобробки.

Гібридне виробництво дає змогу поєднати переваги адитивних і субтрактивних технологій. Процес передбачає попереднє формування деталі адитивним методом до стану "near-net-shape" (максимально наближеного до заданої геометрії), після чого виконується високоточна фінішна механічна обробка функціональних поверхонь. Такий підхід сприяє зменшенню виробничого браку, скороченню втрат цінного матеріалу на 70–80% і зменшенню тривалості виробничого циклу на 30–50% [6]. Окрім підвищення розмірної точності, комплексне застосування гібридних методів постобробки, зокрема гарячого ізостатичного пресування та термічної обробки, дає змогу знизити пористість деталей до 0,1% і підвищити їхні механічні властивості [7]. Зокрема, для виробів зі сплаву Inconel 718 після гібридної обробки межа пластичності зростає до 215 МПа, що на 19% перевищує показники деталей після SLM-друку без додаткової обробки [8]. Крім того, гібридні системи дають змогу формувати біметалеві градієнтні структури без зварних швів, що знижує концентрацію напружень у перехідних зонах на 60% [9].

Однак впровадження гібридного підходу супроводжується суттєвими економічними обмеженнями. Орієнтовна вартість інтегрованого гібридного обладнання становить від \$650 000 до \$1 200 000 [10]. З огляду

на це застосування таких систем є економічно доцільним переважно в умовах одиничного або дрібносерійного виробництва (до 100 одиниць на рік). а умов великосерійного виробництва традиційні субтрактивні технології залишаються економічно вигіднішими [4]. Економічно доцільним є застосування НМ для деталей із високою доданою вартістю (понад \$5000), виготовлених із дорогих і важкооброблюваних сплавів, зокрема титану та інконелю, коли традиційна механічна обробка супроводжується неприйнятно великими втратами матеріалу у вигляді стружки [11]. Для простих сталевих або алюмінієвих деталей гібридні технології здебільшого є збитковими.

## 6.ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Гібридне виробництво є перспективним підходом, що суттєво розширює можливості сучасного машинобудування. Інтеграція адитивних і субтрактивних операцій забезпечує високу точність обробки, суттєво знижує витрати дорогих матеріалів і дає змогу створювати складні внутрішні геометрії, недосяжні за використання окремих традиційних підходів. Незважаючи на суттєві технічні переваги, високий рівень капітальних інвестицій і відсутність широкої стандартизації обмежують застосування таких комплексів переважно високотехнологічними галузями, зокрема аерокосмічною, медичною та автомобільною.

Оскільки прийняття остаточного рішення щодо розгортання виробництва пов'язане з урахуванням багатьох змінних, зокрема продуктивності, собівартості, геометричної складності та екологічності, подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію вибору технологічних підходів із використанням методів багатокритеріального прийняття рішень та визначення ваг критеріїв. У перспективі створення інтегрованих цифрових моделей на основі методів TOPSIS або АНР може забезпечити формалізацію процесів підготовки машинобудівного виробництва та зниження інвестиційних ризиків підприємств.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- [1] R. Schafrik and T. Bhamare, "Serial Production of LEAP Fuel Nozzles via Hybrid AM/CNC," in *Proc. ASME Turbo Expo 2023*, GT2023-103456, New York: ASME, 2023.
- [2] Bugatti, "World Premiere: Brake Caliper from 3D Printer," online. Available: <https://newsroom.bugatti.com/en/press-releases/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printe>.
- [3] G. Manogharan, R. A. Wysk, and O. L. A. Harrysson, "Additive manufacturing–integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, doi: 10.1080/0951192X.2015.1067920.
- [4] W. Grzesik, "Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review," *Journal of Machine Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 5–24, 2018, doi: 10.5604/01.3001.0012.7629.
- [5] "Post-processing of additively manufactured titanium components for aerospace applications," *Additive Manufacturing*, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101345.
- [6] S. Dilip, A. Balla, B. Gu, and Y. Shin, "Hybrid additive and subtractive machining of Inconel 718 using laser metal deposition," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, pp. 645–661, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05212-1.
- [7] T. DebRoy et al., "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties," *Progress in Materials Science*, vol. 92, pp. 112–224, 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

- [8] GE Aviation, Additive Manufacturing in Aerospace: Turbine Blade Production. Technical Report, 2023.
- [9] B. Oniuke, A. Bandyopadhyay, "Bond strength measurement for additively manufactured Inconel 718–GRCop84 copper alloy bimetallic joints," *Additive Manufacturing*, vol. 27, pp. 576–585, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.04.003.
- [10] DMG MORI, "LASERTEC 65 3D – Additive manufacturing in milling quality," 2023. [Online]. Available: <https://en.dmgmori.com>
- [11] Z. Zhu, H. Ding, and C. Li, "Hybrid subtractive–additive manufacturing processes for high value-added metal components," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06099-8.

УДК 621.9

**Герула Б.О., Кіяновський М.В., Цивінда Н.І.** (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна).

## **ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПРИСКОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПІДГОТОВЛЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БРОНЕЙ ДРОБАРОК НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГРУПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Анотація:** У роботі досліджено організаційні підходи до прискорення технологічного підготовки виробництва запасних частин для гірничо-металургійного обладнання, зокрема броней конусних дробарок, на основі застосування методів групової технології. Розглянуто проблеми своєчасного виготовлення деталей в умовах змінної номенклатури, нерегулярного надходження замовлень та необхідності оперативного планування ремонтних робіт. Проаналізовано можливості переходу від індивідуального до групового виробництва шляхом класифікації та кодування деталей, формування груп за конструктивно-технологічними ознаками та розроблення комплексної деталі-представника. Наведено приклад побудови групового технологічного процесу виготовлення броней дробарок із використанням сучасного обладнання з числовим програмним керуванням. Обґрунтовано ефективність запропонованого підходу, що дозволяє скоротити тривалість технологічної підготовки, підвищити рівень спеціалізації робочих місць і забезпечити стабільність виробничих процесів. Визначено перспективи подальшого вдосконалення організаційних рішень у сфері групового виробництва.

**Ключові слова:** *групова технологія, технологічна підготовка виробництва, дробарки, машинобудування, організація виробництва, ЧПК, ефективність.*

**Abstract:** The paper investigates organizational approaches to accelerating technological preparation of production for spare parts of mining and metallurgical equipment, in particular crusher liners, based on the application of group technology methods. The problems of timely manufacturing of parts under conditions of variable nomenclature, irregular order flow, and the need for real-time maintenance planning are considered. The possibilities of transition from individual to group production through classification and coding of parts, grouping by design and technological features, and

*development of a complex representative part are analyzed. An example of designing a group technological process for manufacturing crusher liners using modern CNC equipment is presented. The effectiveness of the proposed approach is substantiated, which allows reducing the duration of technological preparation, increasing the level of workplace specialization, and ensuring stability of production processes. Prospects for further improvement of organizational solutions in the field of group manufacturing are identified.*

**Keywords:** group technology, production preparation, crushers, mechanical engineering, production organization, CNC, efficiency.

## **1.ПРОБЛЕМА ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ ТА ПРАКТИЧНИМИ ЗАДАЧАМИ.**

Постачання запасних частин для гірничого обладнання в умовах ринку ускладнюється необхідністю планування технічного обслуговування і ремонтів у реальному часі в межах стратегії експлуатації «за станом». Це значно ускладнює процес планування та своєчасного виготовлення деталей на механообробних дільницях гірничо-металургійних підприємств, що постійно створює ризики зриву графіків ремонтів і ліквідації аварій. Додатковою перешкодою є те, що виконання заявок на виготовлення запасних частин стримується тривалим етапом технологічного підготовки виробництва. У зв'язку з цим виникає потреба в пошуку організаційних рішень, які забезпечать своєчасне та ефективно виконання цих завдань.

## **2.АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ.**

Проблемами групових технологій (групового технологічного підготовки виробництва, GT) займалися як зарубіжні, так і українські та радянські вчені. Серед зарубіжних дослідників найвідомішими є: Ф. Т. Фінкельштейн (Finkelstein) – один із ранніх дослідників групової обробки; Дж. Л. Бурбідж (J. L. Burbidge) – один із засновників концепції групової технології; Г. Опіц (H. Opitz), який розробив відому систему класифікації та кодування деталей. Серед українських і радянських учених вагомий внесок зробили: С. П. Мітрофанов – один із основоположників групової технології; В. М. Кован; О. М. Дальський; Ю. М. Соломенцев; В. І. Дикунов та українські дослідники у галузі машинобудування та технологічного підготовки виробництва (зокрема представники київських, харківських і дніпровських наукових шкіл). Їхні роботи заклали теоретичні та практичні основи класифікації деталей, створення групових процесів обробки та організації виробництва на основі принципів групової технології [1,2].

## **3.ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.**

Дослідження досвіду українських підприємств, що випускали деталі дробарок різного класу подрібнення, засвідчило, що однією з причин недостатнього розвитку групового виробництва як засобу підвищення продуктивності виготовлення запасних частин для конусних дробарок є брак науково-методичного обґрунтування ефективності організаційних рішень і оцінки досягнутого результату.

Темпи науково-технічного прогресу в машинобудуванні, підвищення якості, забезпечення високої точності і стабільності процесів виготовлення деталей, знаходяться в прямій залежності від рівня технологічного підготовки виробництва. Особливості сьогодення ремонтного виробництва такі, що потрібно проводити трудо-, фондо- і матеріалозберігаючу політику. Це можливо тільки при розробці технологій, при яких одночасно забезпечується зростання продуктивності праці, підвищення фондівіддачі, в тому числі, за рахунок застосування верстатів з ЧПК і гнучких автоматизованих дільниць.

Технологічна підготовка ремонтного виробництва з виготовлення запасних частин у регіоні, об'єктивно, є тривалою –через часту зміну номенклатури виробів, значну кількість замовлень, різноманітність конструкторських і технологічних рішень, невеликі обсяги випуску, багатоопераційність процесів, а також нерегулярність надходження замовлень. Усе це зумовлює значні строки виконання заявок.

З метою вдосконалення організаційних засад технологічного підготовки виробництва доцільно перейти від виготовлення окремих деталей до обробки груп деталей подібних конструктивно й технологічно. У такому разі регулярність їх виробництва суттєво зростає, технологічний процес набуває стабільності в часі та може розглядатися як об'єкт комплексної автоматизації.

#### 4.РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для обґрунтування доцільності методу, при дотриманні рекомендованої послідовності, розроблено приклад виготовлення замовлень на запасні частини до конусних дробарок (броней) . Для проектування групового технологічного процесу вибрали 16 броней дробарок КМД, КСД, КРД. Також за стандартною методикою проводилась: класифікація і кодування броней (конструкторсько-технологічний код деталі лідера має наступний вигляд: 711472.КГР211.11010023Ф). Групування деталей приведено в табл.1.

Таблиця 1.Відомість виробу

| Найменування деталі | Позначення деталі | Маса деталі, кг | Найменування деталі | Позначення деталі | Маса деталі, кг |
|---------------------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Бронь нерухома      | 3007.4855         | 2622            | Бронь конуса        | 0480.0100         | 4764            |
| Бронь нерухома      | 4003.4899         | 3058            | Бронь конуса        | 7403.4324         | 4147            |
| Бронь нерухома      | 4002.4880         | 1480            | Бронь нижня         | 7403.4302         | 850             |
| Бронь нерухома      | 7403.4947         | 4309            | Бронь нижня         | 0480.4060         | 5500            |
| Бронь нерухома      | 1705.4866         | 3798            | Бронь конуса        | 4003.4827         | 620             |
| Бронь нерухома      | 4003.4957         | 2300            | Бронь верхня        | 4002.4856         | 3455            |
| Бронь конуса        | 3007.4849         | 5460            | Бронь верхня        | 7403.0200         | 1760            |
| Бронь конуса        | 7403.4954         | 2891            | Бронь верхня        | 7403.0200         | 860             |

Визначимо приведену трудомісткість цеху за формулою:

$$T_{ц} = \sum N_x^n \cdot T_{шт}^{пред} \quad (1)$$

де  $\sum N_x^n$  - приведена програма випуску виробів рівна 3183 од.;

$T_{шт}^{пред}$  - штучний час виробу представника.

$$T_{ц} = 3183 \cdot 330,1 = 10507083 \text{ н. год.}$$

При аналізі технологічності броней дробарок було встановлено, що вони характеризуються подібними технологічними, функціональними, конструктивними та іншими властивостями, як то: важкооброблюваним матеріалом 110Г13Л, великою вагою від 860 до 5500 кг, конічною формою обробленої поверхні, різальним інструментом, тощо. Використання відповідної системи дозволяє ідентифікувати ці спільні ознаки та здійснити групування деталей,

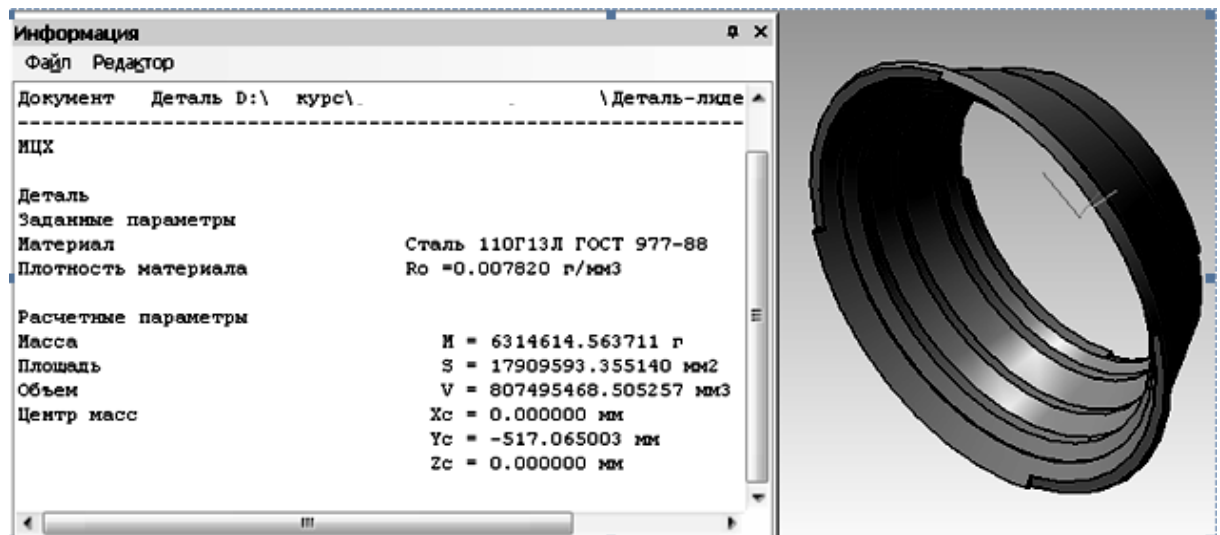


Рисунок 1. Фрагмент аналізу технологічності броні

Для організації групового виробництва, окрім раніше зазначених заходів технологічного підготовки, необхідно здійснити також організаційну перебудову структури підприємства та його внутрішньозаводської спеціалізації у разі модернізації. При проектуванні виробничих дільниць слід заздалегідь формувати організаційну структуру підприємства з урахуванням спеціалізації його підрозділів.

Аналіз практик вітчизняних об'єднань і підприємств свідчить, що однією з причин недостатнього розвитку групового виробництва є відсутність чітко визначеної системи його впровадження, яке часто здійснюється без належної цілеспрямованості та оцінювання отриманого ефекту.

Показник плануємого рівня розвитку групового виробництва в  $j$ -ї системі повинен відповідати відношенню:

$$K_{zgj} = \Pi_{z.gj} / k_{z.gj} \leq 1, \quad (2)$$

де  $k_{z.gj}$  – коефіцієнт або плануємого рівня охоплення деталей (заготовок) груповим виробництвом ( $\leq 1$ ).

Для механообробної стадії прискорення виготовлення запасних частин для конусних дробарок для ремонтних виробництв Кривбасу, де концентруються максимальні обсяги виробництва запасних частин, визначені коефіцієнти перспективного (але не гранично можливого) рівня розвитку групового виробництва та групової технології відповідно значенням  $k_{z.gj} \geq 0,7$  і  $k_{z.mj} \geq 0,6$ .

При груповому виробництві підвищується рівень спеціалізації робочих місць, що дозволяє використовувати дороговартісні важкі верстати з ЧПК. Відбувається це за рахунок зростання конструктивно-технологічної спільності закріплюємих за ними груп деталей, застосування групового оснащення та загального впорядкування календарного руху деталей на основі реальної можливості використання в оперативному плануванні оптимальних календарно-планових норм.

Показник спеціалізації робочих місць  $j$ -ї системи виражається залежністю:

$$K_{cnj} = \frac{1}{k_{zj} \sum_{n=1}^{\omega} S_n} \left[ (1 - Y_{г.тj}) \sum_{i=1}^{\omega} D_{eij} + \Pi_{г.тj} \sum_{m=1}^f C_{mj} \Gamma_{omj} \right], \quad (3)$$

де  $k_{z,j}$  — середній показник завантаження устаткування  $j$ -ї системи (цеху, дільниці, лінії);  $S_n$  — кількість одиниць устаткування в  $n$ -й групі  $j$ -ї системи;  $\omega$  — число груп обладнання;

$\sum_{i=1}^{\omega} D_{eij}$  — сумарна кількість деталеоперацій, які виконуються  $j$ -ю системою протягом місяця за одиничною чи типовою технологією;

$\Gamma_{omj}$  — кількість групового оснащення, верстатів з числовим програмним керуванням і оброблюємих центрів  $m$ -го виду;

$C_{mj}$  — середня частота змінюваності  $m$ -го виду групового оснащення на робочому місці, програм на СЧПК або комплектів деталеоперацій в обробному центрі протягом місяця;  $f$  — кількість видів групового оснащення, програм на СЧПК або обробних центрів, застосовуваних системою при обробці деталей за груповою технологією.

Запропоновані аналітичні залежності дозволяють також вирішувати і іншу важливу задачу — прогнозувати покращення техніко-економічних показників у діючих групових системах у результаті впровадження заходів



щодо подальшого вдосконалювання конструкції, технології, організації праці, оперативного планування та керування.

Конструювання комплексної деталі (броні) виконувалося методом накладення. Аналізуючи креслення деталей групи, з ряду подібних деталей була вибрана одна, найбільш характерна. Потім розглядались деталі, які відрізняються від неї наявністю інших оброблюємих поверхонь. Ці нові поверхні наносились на креслення вихідної деталі, таким чином створювалась умовна комплексна деталь, яка вміщує всі елементи деталей груп. Всі деталі групи виготовлені зі зносостійкого матеріалу 110Г13Л.

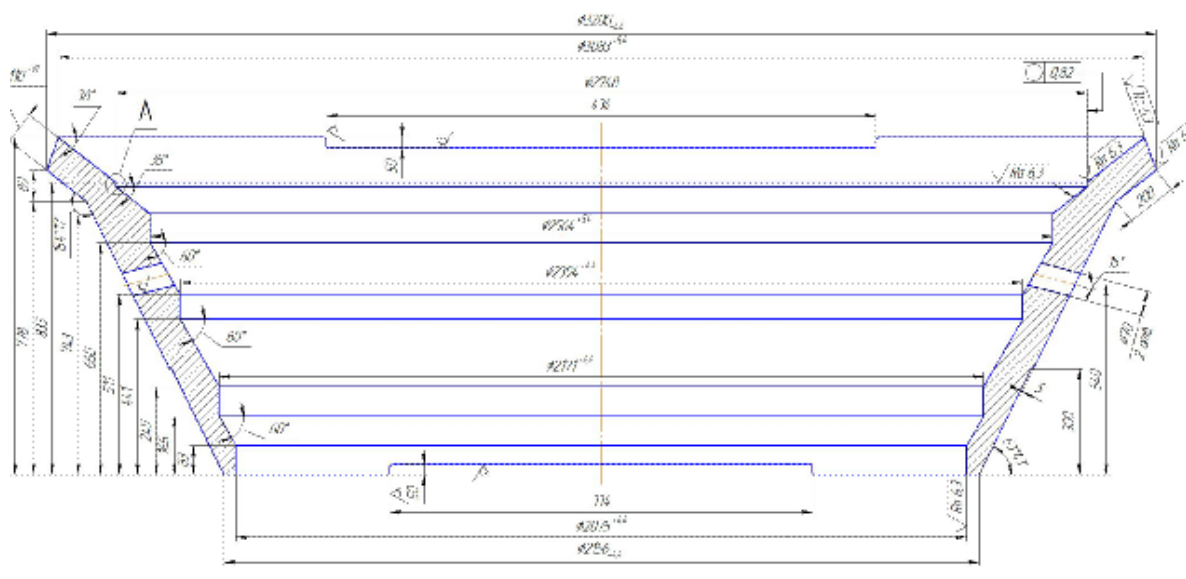


Рисунок 2. Комплексна деталь

Складена на комплексну деталь технологія виготовлення (таблиця 2) з невеликими переналадженнями може бути використане при виготовленні будь-якої іншої деталі групи, дозволить забезпечити замовлення та здійснювати як довгострокове (на протязі місяця чи кварталу), так і короткострокове (на протязі однієї зміни) оперативно-виробниче планування роботи.

Таблиця 2. Маршрутна технологія

| №з/п | Найменування операції                    | Устаткування (модель верстата) | Інструментальне оснащення                                                                                                                                       |
|------|------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 005  | Заготовча                                |                                |                                                                                                                                                                 |
| 010  | Термообробка (гартування та відпускання) |                                |                                                                                                                                                                 |
| 015  | Токарно-карусельний з ЧПК                | <b>HANKOOK VTB / VTC</b>       | Токарний розточний різець<br>- пластина кругла<br>Ø16 RNGN 160400;<br>- державка FSDQC2520R-08A.<br>Токарний різець для контурного точіння<br>- пластина кругла |

|     |                           |                          |                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |                           |                          | Ø16 мм RBG 16;<br>- державка<br>DCLNR2525M09-T                                                                                                                                                                            |
| 020 | Токарно-карусельний з ЧПК | <b>HANKOOK VTB / VTC</b> | Токарний розточний різець<br>- пластина<br>кругла Ø31 RNMG 310900;<br>- державка FSDQC2520R-11A.<br>Токарний різець для<br>контурного точіння<br>- пластина кругла<br>Ø32 RCMX 3209M0-RR;<br>- державка<br>DCLNR2525M09-T |
| 025 | Токарно-карусельний з ЧПК | <b>HANKOOK VTB / VTC</b> | Токарний розточний різець<br>- пластина<br>кругла Ø31 RNMG 310900;<br>- державка FSDQC2520R-11A.<br>Токарний різець для<br>контурного точіння<br>- пластина кругла<br>Ø32 RCMX 3209M0-RR;<br>- державка<br>DCLNR2525M09-T |
| 030 | Контрольна                |                          |                                                                                                                                                                                                                           |

Приклад структурної побудови такого групового налагодження приведений на рис. 3.

| Позначення бродів | Ескіз деталей | Операція           |                      |                    |
|-------------------|---------------|--------------------|----------------------|--------------------|
|                   |               | Токарна<br>чорнова | Токарна<br>натягнута | Токарна<br>чистова |
| 1                 | 2             | 3                  | 4                    | 5                  |
| А                 |               | +                  | +                    | -                  |
| П                 |               | +                  | +                    | +                  |
| Р                 |               | +                  | +                    | -                  |
| Н                 |               | +                  | +                    | -                  |
| О                 |               | +                  | +                    | -                  |
| Д                 |               | +                  | +                    | -                  |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| З |   | + | + | - |
| Е |   | + | + | - |
| Л |   | + | + | - |
| Ж |   | + | + | - |
| М |   | + | + | - |

Рисунок 3. Приклад структурної побудови групового налагодження

## 5.ВИСНОВКИ І НАПРЯМ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.

Застосування групової технології при виготовленні запасних частин для конусних дробарок дозволяє наблизити рівень культури одиничного виробництва до показників великосерійного, водночас суттєво підвищуючи рівень механізації та автоматизації виробничих процесів.

Під час формування груп, на стадії технологічного підготовки виробництва, доцільно прагнути до незмінності верстатів, верстатного оснащення та різального інструменту. Система групування повинна також забезпечувати можливість оцінювання якості розподілу деталей на групи. Для цього застосовуються різні критерії, зокрема мінімізація кількості обладнання, загального часу обробки групи деталей, сумарних простоїв устаткування за визначений період, а також допоміжного часу, необхідного для базування, закріплення та зняття деталей [3].

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Burbidge J. L. *Group Technology in Engineering Industry*. London : Mechanical Engineering Publications Ltd., 1975. 211 p.
2. Opitz H. *A Classification System to Describe Workpieces*. Oxford : Pergamon Press, 1970. 260 p.
3. Цивінда Н.І., А.В., Пікільняк, Зюган У.І., Зуєв І. О. Аналіз вибору оптимальних параметрів технологічної системи в виробничих умовах/ Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції, 25 - 26 травня 2023р. м. Чернівці, Том 1, с.143-144

УДК 004.94:621.7:620.18

**Григоренко Я.С., Дмитрієв Д.О.** (Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна).

### **ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ТА IN-SITU МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФЕКТІВ У ПРОЦЕСАХ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

**Анотація:** У роботі досліджено можливості застосування цифрових двійників та систем in-situ моніторингу для прогнозування дефектів у процесах адитивного виробництва металевих виробів. Розглянуто особливості пошарового формування металу та фактори, що впливають на виникнення дефектів, зокрема пористість, нестабільність ванни розплаву та зони неповного проплавлення. Проаналізовано принципи функціонування систем сенсорного спостереження, які дозволяють отримувати інформацію про стан процесу в режимі реального часу, а також роль цифрових моделей у відтворенні теплових і технологічних процесів. Показано, що інтеграція даних моніторингу з цифровими двійниками забезпечує більш точне

оцінювання якості формування шару та дозволяє виявляти потенційні відхилення на ранніх етапах. Визначено значення методів машинного навчання для встановлення залежностей між параметрами процесу та ймовірністю дефектоутворення. Обґрунтовано доцільність переходу від післяпроцесного контролю до прогнозного забезпечення якості у сучасному машинобудуванні.

**Ключові слова:** адитивне виробництво, цифровий двійник, in-situ моніторинг, прогнозування дефектів, машинне навчання, контроль якості, металеві вироби.

**Abstract:** The paper investigates the application of digital twins and in-situ monitoring systems for defect prediction in metal additive manufacturing processes. The features of layer-by-layer metal formation and factors influencing defect occurrence, including porosity, melt pool instability, and lack-of-fusion zones, are considered. The principles of sensor-based monitoring systems that provide real-time information about process conditions, as well as the role of digital models in simulating thermal and technological processes, are analyzed. It is shown that integrating monitoring data with digital twins enables more accurate assessment of layer formation quality and allows early detection of potential deviations. The importance of machine learning methods for identifying relationships between process parameters and defect probability is determined. The feasibility of transitioning from post-process inspection to predictive quality assurance in modern mechanical engineering is substantiated.

**Keywords:** additive manufacturing, digital twin, in-situ monitoring, defect prediction, machine learning, quality control, metal parts.

## ВСТУП.

Адитивне виробництво металевих виробів сьогодні є одним із важливих напрямів розвитку сучасного машинобудування. Воно дає можливість виготовляти деталі складної форми та робить виробництво більш гнучким. Разом із тим процеси пошарового формування металу дуже чутливі до параметрів друку, стану порошку, умов плавлення та тепловідведення [1–3]. Через це під час виготовлення можуть виникати пористість, нестабільність ванни розплаву, зони неповного проплавлення та інші дефекти, які погіршують властивості готових виробів. Проблема полягає в тому, що традиційний контроль якості зазвичай проводять уже після завершення друку, коли вплинути на процес формування дефектів уже неможливо.

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ.

У сучасних дослідженнях значну увагу приділяють цифровим двійникам і системам IN-situ моніторингу як засобам підвищення ефективності контролю якості в адитивному виробництві [1, 2]. In-situ моніторинг дає змогу отримувати інформацію безпосередньо під час друку за допомогою оптичних, інфрачервоних і фотодіодних систем спостереження. Такі дані відображають стан melt-pool, температурну поведінку локальних зон та стабільність формування шару [2]. Цифровий двійник, у свою чергу, дозволяє описувати перебіг процесу з урахуванням теплових і технологічних факторів, а також пов'язувати параметри друку з показниками якості [1, 4]. Поєднання цих підходів є доцільним для задач

прогнозування дефектів. Якщо дані моніторингу використовуються не лише для фіксації аномалій, а й для уточнення стану цифрової моделі, з'являється можливість більш достовірно оцінювати ризик виникнення пористості або неповного проплавлення ще на етапі формування виробу. У такому випадку цифровий двійник виступає засобом інтерпретації процесу, а моніторингові дані — джерелом оперативної інформації про його фактичний стан.

Важливу роль у такій схемі відіграють методи машинного навчання, які дозволяють встановлювати залежності між параметрами моніторингу та ймовірністю дефектоутворення [3]. Це особливо важливо у випадках, коли окремі сигнали самі по собі не дають однозначного висновку про якість, але їх поєднання дозволяє виявити характерні передумови появи дефектів. У результаті формується інформаційний контур, у якому сенсорні дані, цифрова модель і аналітична обробка взаємодіють для оцінювання стану процесу в режимі, наближеному до реального часу.

Практичне значення такого підходу полягає в тому, що він орієнтований не лише на контроль уже виготовленої деталі, а й на попередження дефектів у процесі друку. Для відповідальних машинобудівних виробів це дозволяє зменшити кількість браку, скоротити витрати на післяпроцесний контроль і підвищити відтворюваність якості. Саме тому інтеграцію цифрових двійників, in-situ моніторингу та аналітичних методів доцільно розглядати як один із перспективних напрямів розвитку інтелектуальних технологій у металевому адитивному виробництві [1–4].

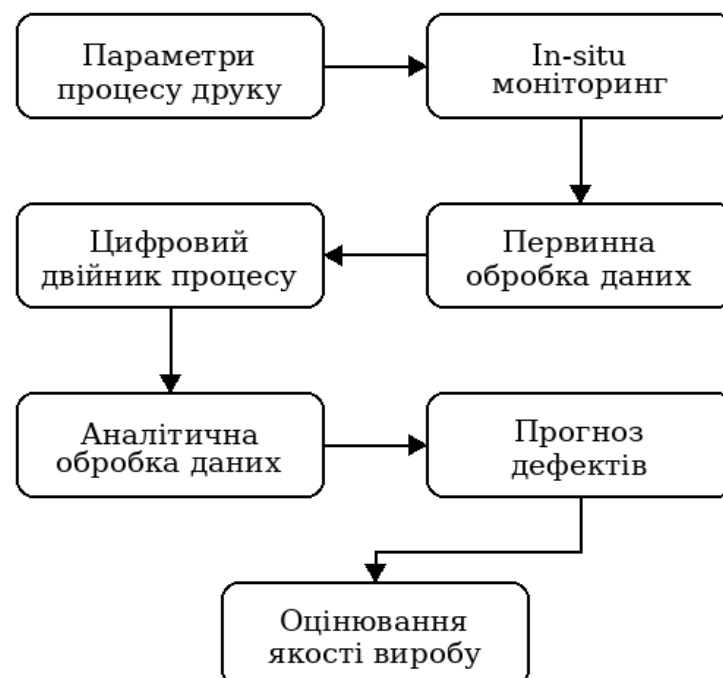


Рисунок 1. Узагальнена схема використання цифрового двійника та in-situ моніторингу для прогнозування дефектів у процесах адитивного виробництва металевих виробів.

## ВИСНОВКИ.

Отже, поєднання цифрових двійників із даними in-situ моніторингу є перспективним для прогнозування дефектів у процесах адитивного виробництва металевих виробів. Такий підхід дає змогу точніше оцінювати стан процесу формування виробу та своєчасно виявляти відхилення, що можуть призводити до дефектів. Це, у свою чергу, створює основу для переходу від традиційного післяпроцесного контролю до більш ефективного прогнозного забезпечення якості. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення інформативних параметрів моніторингу та підвищення надійності моделей в умовах реального виробництва.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Zhang L., Chen X., Zhou W., Cheng T., Chen L., Guo Z., Han B., Lu L. Digital twins for additive manufacturing: a state-of-the-art review. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 23. Art. 8350. DOI: 10.3390/app10238350.
2. McCann R., Obeidi M.A., Hughes C., McCarthy É., Egan D.S., Vijayaraghavan R.K., Joshi A.M., Acinas Garzon V., Dowling D.P., McNally P.J., Brabazon D. In-situ sensing, process monitoring and machine control in laser powder bed fusion: a review. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 45. Art. 102058. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102058.
3. Xiong Y., Tang Y., Zhou Q., Ma Y., Rosen D.W. Intelligent additive manufacturing and design: state of the art and future perspectives. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 59. Art. 103139. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103139.
4. Ben Amor S., Elloumi N., Eltaief A., Louhichi B., Alrasheedi N.H., Seibi A. Digital twin implementation in additive manufacturing: a comprehensive review. *Processes*. 2024. Vol. 12, no. 6. Art. 1062. DOI: 10.3390/pr12061062.

УДК 621.74

**Гуцалюк<sup>1</sup> А.М., Ковалевський<sup>2</sup> С.В.** (<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна; <sup>2</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна)

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ДЕТАЛЕЙ У ПІЩАНО-ГЛИНИСТИХ ФОРМАХ

**Анотація:** У роботі представлено комплексний підхід до математичного моделювання процесу лиття деталей у піщано-глинистих формах з урахуванням теплових та гідродинамічних явищ. Розроблено модель, що описує залежність якості відливки від ключових технологічних параметрів: температури розплаву, швидкості заливання та теплофізичних властивостей формувальної суміші. Проведено систематичне порівняння традиційного лиття з сучасними високотехнологічними методами виготовлення деталей, включаючи адитивні технології та лиття під тиском. Результати дослідження демонструють, що традиційне лиття зберігає економічну доцільність для певних класів виробів, незважаючи на нижчу точність порівняно з високими технологіями. Запропоновано кількісні критерії вибору оптимальної технології виробництва на основі багатопараметричної оптимізації.

**Ключові слова:** лиття, піщано-глинисті форми, теплоперенос, математичне моделювання, адитивні технології, якість відливок, оптимізація технологічних параметрів.

**Abstract:** The paper presents a comprehensive approach to the mathematical modeling of the casting process in sand-clay molds, taking into account thermal and hydrodynamic phenomena. A model is developed that describes the dependence of casting quality on key technological parameters, including melt temperature, pouring rate, and thermophysical properties of the molding mixture. A systematic comparison of traditional casting with modern advanced manufacturing methods, including additive technologies and die casting, is carried out. The results demonstrate that traditional casting remains economically feasible for certain classes of products despite its lower accuracy compared to advanced technologies. Quantitative criteria for selecting the optimal manufacturing technology based on multi-parameter optimization are proposed.

**Keywords:** casting, sand-clay molds, heat transfer, mathematical modeling, additive technologies, casting quality, optimization of technological parameters.

## 1. ВСТУП.

### 1.1. Актуальність проблеми.

Ливарні процеси відіграють фундаментальну роль у сучасному машинобудуванні та належать до критичних технологій, що визначають не лише якість кінцевої продукції, але й економічну ефективність виробництва [1,4]. Лиття у піщано-глинисті форми залишається одним з найпоширеніших методів завдяки технологічній універсальності, відносно низькій вартості обладнання та можливості виготовлення деталей широкого спектру габаритів і конфігурацій [1,5].

### 1.2. Виклики сучасного виробництва.

Стрімкий розвиток високих технологій, зокрема адитивного виробництва (3D-друку металами) та прецизійного лиття під тиском, ставить перед традиційними методами нові виклики [3,4]. Виникає необхідність об'єктивної оцінки ефективності класичних процесів на основі математичного моделювання та порівняльного аналізу техніко-економічних показників.

### 1.3. Мета дослідження.

Метою роботи є побудова математичної моделі процесу формування виливків у піщано-глинистих формах з урахуванням комплексу теплофізичних та гідродинамічних явищ, а також визначення області раціонального застосування методу в контексті сучасних виробничих технологій.

## 2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.

### 2.1. Проблематика якості відливок.

Забезпечення високої якості відливок при мінімальних виробничих витратах є ключовою інженерною задачею ливарного виробництва. Типові дефекти, що виникають у процесі лиття, включають:

- усадочні раковини – порожнини, що утворюються внаслідок об'ємної усадки металу при кристалізації;
- пористість – дисперсні газові включення в структурі відливки;
- тріщини – макроскопічні порушення суцільності, викликані термічними напруженнями;
- нерівномірна структура – неоднорідність зеренної будови по об'єму виливка [2,5].

## **2.2. Наукова задача.**

Необхідно встановити функціональні залежності між технологічними параметрами процесу (температура заливання, швидкість заповнення форми, теплофізичні характеристики формувальної суміші) та показниками якості готової продукції. Додатково потрібно визначити конкурентоспроможність методу порівняно з альтернативними технологіями виготовлення деталей.

## **3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДОЛОГІЯ.**

### **3.1. Загальна постановка моделі**

Процес лиття деталей у піщано-глинистих формах можна представити як багатопараметричну систему:

$$Y = f(T, V, \lambda, t)$$

де:  $Y$  – інтегральний показник якості відливки;  $T$  – температура розплаву, К;  $V$  – швидкість заливання, м/с;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності формувальної суміші, Вт/(м·К);  $t$  – час кристалізації, с.

### **3.2. Модель теплопереносу.**

Температурне поле в системі "метал-форма" описується рівнянням нестационарної теплопровідності [2]:

$$\partial T / \partial t = a \nabla^2 T$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Це рівняння параболічного типу враховує процес дифузії тепла від гарячого розплаву через границю розділу фаз до холодної форми. Градієнт температури визначає швидкість кристалізації та характер формування мікроструктури.

### **3.3. Критерій якості відливки.**

Інтегральний показник якості визначається як зважена лінійна комбінація часткових критеріїв:

$$Q = w_1 \cdot D^{-1} + w_2 \cdot S + w_3 \cdot H$$

де:  $D$  – дефектність відливки (обернено пропорційна якості);  $S$  – структурна однорідність (коефіцієнт варіації розміру зерна);  $H$  – твердість



матеріалу, що корелює з механічними властивостями;  $w_1, w_2, w_3$  – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети якості ( $\sum w_i = 1$ );

### 3.4. Методи дослідження.

Для вирішення поставлених задач використано:

- методи математичної фізики (теорія теплопереносу);
- чисельне моделювання (метод скінченних елементів) [6];
- експериментальна валідація результатів;
- порівняльний аналіз технологій.

## 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

### 4.1. Оптимальні параметри процесу.

Проведене моделювання дозволило визначити оптимальні технологічні режими [6]:

Температура заливання:

- для сталевих виливків: 1350–1450 °C;
- перегрів відносно температури ліквідусу: 50–150 °C.

Швидкість заливання:

- підвищення швидкості заливання (в допустимих межах) зменшує ймовірність утворення холодних швів;
- оптимальна швидкість залежить від геометрії форми та масштабу відливки.

Теплофізичні властивості форми:

- низька теплопровідність формувальної суміші сприяє рівномірній кристалізації;
- уповільнення охолодження знижує термічні напруження.

### 4.2. Порівняльний аналіз технологій.

Систематичне порівняння традиційного лиття з високими технологіями представлено у табл.1 [1,3,4]:

Таблиця 1. Порівняння традиційного лиття з високими технологіями

| Параметр                      | Піщано-глинисте лиття | Лиття під тиском | 3D-друк (метал) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Вартість процесу              | Низька                | Середня          | Висока          |
| Точність виготовлення         | Середня               | Висока           | Дуже висока     |
| Технологічна гнучкість        | Висока                | Низька           | Дуже висока     |
| Швидкість виробництва         | Середня               | Висока           | Низька          |
| Необхідність оснастки         | Мінімальна            | Висока           | Відсутня        |
| Мінімальна товщина стінки, мм | 5–10                  | 1–3              | 0.5–2           |
| Розмірна точність (квалітет)  | IT13–IT16             | IT7–IT10         | IT5–IT8         |
| Шорсткість поверхні Ra, мкм   | 12.5–50               | 1.6–6.3          | 3.2–12.5        |
| Питома вартість, \$/кг        | 1–3                   | 3–8              | 20–100          |

#### 4.3. Аналіз областей застосування.

Піщано-глинисте лиття зберігає конкурентні переваги для [1,5]:

- серійного виробництва великогабаритних деталей;
- одиничного та дрібносерійного виробництва;
- виробів з невисокими вимогами до точності;
- випадків економічної недоцільності виготовлення дорогої оснастки.

Адитивні технології ефективні для [6]:

- прототипування та виробництва складних геометрій;
- деталей з внутрішніми каналами та решітчастими структурами;
- одиничного виробництва високоточних компонентів.

Лиття під тиском оптимальне для [4]:

- масового виробництва деталей середніх розмірів;
- виробів з високими вимогами до точності та продуктивності.

### 5. КІЛЬКІСНІ КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ.

#### 5.1. Нормовані параметри.

Введені безрозмірні нормовані параметри:

- $G^*$  – геометрична складність (0 – проста, 1 – максимально складна)
- $C^*$  – вартісні обмеження (0 – мінімальні витрати, 1 – високі витрати допустимі)
- $Q^*$  – вимоги до якості/точності (0 – низькі, 1 – максимальні)

де  $G^*, C^*, Q^* \in [0,1]$

#### 5.2. Критерій вибору технологій.

На основі аналізу техніко-економічних характеристик запропоновано критерій:

$$M = \begin{cases} \text{Лиття (піщане),} & C^* < 0.3; \\ \text{Лиття під тиском,} & 0.3 \leq C^* \leq 0.6; \\ \text{Адитивне,} & G^* > 0.7. \end{cases}$$

#### 5.3. Багатокритеріальна оптимізація.

Для комплексної оцінки альтернативних технологій використовується адитивна функція корисності:

$$K_i = \alpha_1 Q + \alpha_2 S + \alpha_3 G - \alpha_4 C$$

де:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети виробника;  $K_i$  – інтегральний показник  $i$ -ї технології.

Оптимальна технологія визначається як:  $M = \max(K_i)$ .

#### 5.4. Практичний алгоритм прийняття рішення.

1. Визначити вимоги проєкту:

- точність виготовлення ( $Q$ );
- геометрична складність ( $G$ );

- обсяг виробництва (S);
  - бюджетні обмеження (C).
2. Нормувати параметри до діапазону [0,1].
  3. Обчислити критерій для кожної альтернативної технології.
  4. Обрати технологію з максимальним значенням критерію.

## 6. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.

Отримані результати дозволяють стверджувати:

1. Створено формалізований математичний апарат для опису процесу лиття у піщано-глинистих формах.
2. Встановлено кількісні залежності між технологічними параметрами та якістю продукції.
3. Розроблено об'єктивні критерії вибору оптимальної технології виготовлення деталей.

Запропонована модель може бути інтегрована у CAE-системи для [6]:

- віртуального прототипування ливарних процесів.
- оптимізації технологічних режимів.
- прогнозування дефектів на етапі проектування.

Слід зазначити, що модель не враховує:

- турбулентний характер течії розплаву при високих швидкостях заливання.
- хімічну взаємодію металу з формою.
- вплив вібраційних та електромагнітних полів.

## ВИСНОВКИ.

1. Розроблено математичну модель процесу лиття у піщано-глинистих формах, що описує взаємозв'язок технологічних параметрів та якості відливок на основі рівнянь теплопереносу [2].

2. Визначено оптимальні режими для сталевих виливків: температура заливання 1350–1450°C, контрольована швидкість заливання, низькотеплопровідні формувальні суміші.

3. Доведено економічну доцільність традиційного лиття для серійного виробництва великих деталей з помірними вимогами до точності.

4. Встановлено, що високі технології (адитивне виробництво, лиття під тиском) забезпечують кращу точність (IT5–IT10 проти IT13–IT16), але мають вищу питому вартість (20–100 \$/кг проти 1–3 \$/кг).

5. Запропоновано кількісні критерії вибору оптимальної технології на основі багатопараметричної оптимізації з урахуванням геометричної складності, вартісних обмежень та вимог до якості.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Campbell J. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2015. 1200 p.
2. Flemings M.C. *Solidification Processing*. New York: McGraw-Hill, 1974. 364 p.
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 3rd ed. New York: Springer, 2021. 675 p.

4. ASM Handbook, Volume 15: Casting. Materials Park, OH: ASM International, 2008. 1200 p.
5. Stefanescu D.M. Science and Engineering of Casting Solidification. 3rd ed. New York: Springer, 2015. 554 p.
6. Zhu J., Liu Z., Li H. Numerical simulation and optimization of sand casting process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 118. P. 2345–2358.

УДК 621.793:620.178

**Дмитрієв Д.О., Катріч С.Г., Кузмічов М.Ф.** (Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна).

### **ЗАЛЕЖНІСТЬ МІКРОТВЕРДОСТІ ДЕТАЛЕЙ ВІД СТРАТЕГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО 3D ДРУКУ ТИТАНОВИМ ДРОТОМ**

**Анотація:** У роботі представлено результати експериментальних досліджень мікротвердості по характерних поперечних перетинах складнопрофільних деталей, надрукованих за технологією xBeam титановим дротом із використанням різних стратегій послідовного накладання шарів металу. Розглянуто вплив зміни напрямку руху розхідного матеріалу, температурних градієнтів нагрівання та охолодження окремих ділянок сформованої деталі і підкладки на формування структури матеріалу. Особливу увагу приділено механічним властивостям у зонах з'єднання поверхонь і стінок, розташованих під кутом  $90^\circ$  одна до одної. Проведено аналіз розподілу мікротвердості та виявлено градієнти властивостей, пов'язані з умовами кристалізації та термічними напруженнями. Встановлено, що вибір стратегії друку суттєво впливає на однорідність структури та механічні характеристики виробів. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації параметрів адитивного виробництва та підвищення якості деталей із титанових сплавів.

**Ключові слова:** 3D друк, мікротвердість, титановий дріт, адитивне виробництво, температурні градієнти, структура матеріалу, механічні властивості.

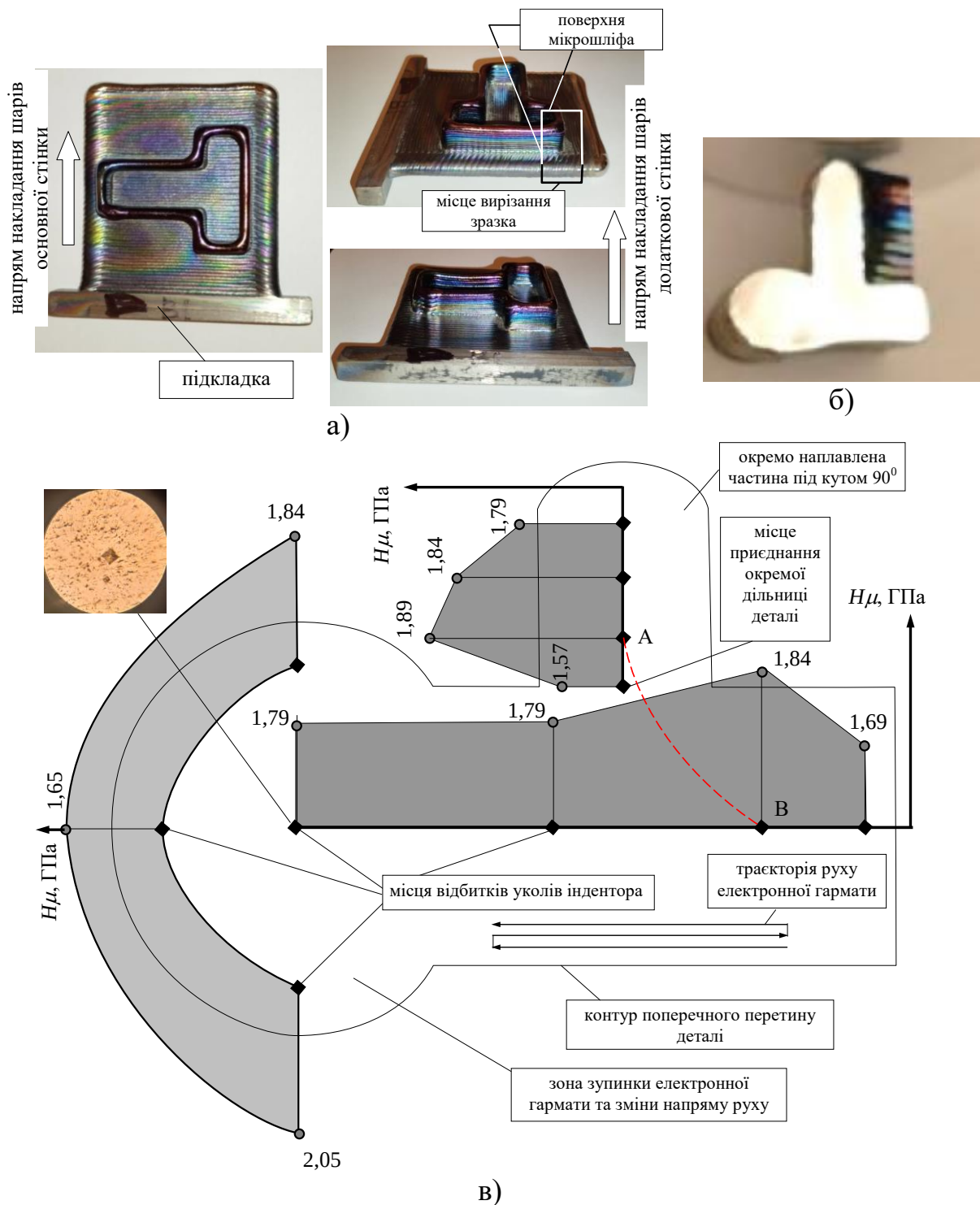
**Abstract:** The paper presents the results of experimental studies on the microhardness distribution across characteristic cross-sections of complex-shaped parts manufactured using xBeam technology with titanium wire under different layer deposition strategies. The influence of feedstock movement direction, as well as thermal gradients of heating and cooling in specific regions of the formed part and substrate, is analyzed. Special attention is paid to the mechanical properties in areas where surfaces and walls intersect at a  $90^\circ$  angle. The microhardness distribution is evaluated, revealing gradients associated with solidification conditions and residual thermal stresses. It is established that the selected printing strategy significantly affects structural uniformity and mechanical performance of the produced parts. The obtained results can be used to optimize additive manufacturing parameters and improve the quality of titanium alloy components.

**Keywords:** 3D printing, microhardness, titanium wire, additive manufacturing, thermal gradients, material structure, mechanical properties.

На сьогодні адитивні технології виготовлення деталей з титану та титанових сплавів набуває перспективного розвитку та застосування в багатьох галузях, зокрема в аерокосмічній та медичній, де треба зменшити час на виготовлення деталей складної геометрії зі збереженням високих механічних характеристик та корозійної стійкості. Тестову технологію 3D друку титановим дротом xBeam запроваджено на НВП «Червона хвиля» [1], що полягає у пошаровому наплавленні газорозрядною електронно-променевою гарматою, яка генерує порожнистий конічний електронний пучок, що забезпечує унікальні фізичні умови для точно контрольованого осадження металу та формування заданої металевої структури та механічних властивостей при виготовленні тривимірної деталі [2]. Основні технологічні і матеріалознавчі засади контрольованого 3D друку титановим дротом закладено в патентах на винахід авторів технології xBeam [3] та низці останніх публікацій в наукових виданнях міжнародного рівня [2, 4]. Однак для досягнення необхідних характеристик при 3D друці комбінованих деталей складної геометрії деталей з титану та сплавів потребує глибокого вивчення.

В даній роботі поставлено за мету визначити розподілення мікротвердості в профілях поперечних перетинів надрукованих деталей, з наплавленими окремо стінками під кутом  $90^0$  до попередньо надрукованих шарів титанового сплаву з різними стратегіями руху електронно-променевої гармати, керованої від ЧПУ (рис.1, а). Особливий інтерес викликають механічні характеристики комбінованих деталей отриманих 3D друком титановим дротом, а саме розподіл мікротвердості та залишкові механічні напруження в місцях зміни траєкторії руху електронної гармати, місцях адгезії і кристалізації шарів, місці з'єднання частин, що окремо наплавляються на вже існуючі ділянки друкованої деталі під кутом і ін.

Вимірювання мікротвердості виконувалось на приладі ПМТ-3 згідно ДСТУ EN ISO 6507-1:2022. Виготовлення мікрошліфів здійснювали методом механічного полірування у два етапи: з грубим та дрібним абразивом (або поліруючою речовиною) відповідно (рис.1, б).



Рисуннок 1. Визначення мікротвердості по перетину деталі комбінованої геометрії надрукованої за технологією xBeam з титанового сплаву ВТ-1:  
а) – загальний вигляд деталі; б) – вирізаний зразок (мікрошліф);  
в) - розподіл мікротвердості в характерних місцях траєкторії пошарового накладання розхідного матеріалу

Зразки підготовлювали поліруючою речовиною - суспензії з оксиду алюмінію, хрому та алмазні порошки. Нетравлені мікрошліфи використовували для аналізу дрібних фаз та включень. Як індентор було застосовано алмазну пірамідку з квадратною основою і двограним кутом

при вершині 136° при навантаженнях 0,05 та 0,2 Н протягом 10 с. Найбільша основна похибка окуляр-мікрометра на всьому діапазоні вимірювань становить  $\pm 2$  мкм відповідно до паспорта. Шліф встановлювався і закріплювався на предметному столику притискними лапками або тонким шаром пластилину.

Результати вимірювань накладено схематично як епюри на контур поперечного перетину вимірюваного зразка та наведено на рис. 1, в, які свідчать про збільшення мікротвердості після охолодження деталі на деякій відстані від місця стику двох стінок, що перпендикулярні одна одній до 1,89 ГПа і створюють градієнт не тільки твердості, а і імовірно механічних залишкових напружень – лінія АВ. Дана обставина характеризує можливість пружних деформацій та неточності заданої геометрії друкованих елементів деталі під кутом, що потребує подальшої термічної і механічної пост обробки. Тому в якості напрямів подальших досліджень можна розглянути: вивчення програмно-керованих стратегій пошарового утворення елементів деталі узгоджених з керованими режимами нагрівання-охолодження під час друку; визначення мікротвердості від впливу режимів відпуску при термічній пост обробці; дослідження геометричної залежності друкованих стінок під різними кутами на анізотропію механічних властивостей і точності друку.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. *Технологія xBeam 3D Metal Printing на шляху до промислового виробництва* / Д. В. Ковальчук, В. Г. Мельник, І. В. Мельник, Б. А. Тугай // *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 3. С. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.03.04>
2. *Manufacturing a consolidated copper-stainless steel bimetallic product using xBeam 3D metal printing* / Dmytro Kovalchuk, Leontii Tretyakov, Paul R Carriere, Nanda Gopal Matavalam // *The Paton Welding Journal.*, Issue 7, July 2024, pp. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.07.01>
3. *Патент України № 112682, МПК B22D19/00, B22D23/00, Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів і пристрій для його реалізації* / Ковальчук Д.В., Мельник В.Г., патентовласник Приватне акціонерне товариство "НВО "Червона хвиля", заявл. 10.03.2015, бюл. № 5/2015, опубл. 10.10.2016, бюл. № 19/2016
4. Kovalchuk D., Ivasishin O., Savvakina D. *Microstructure and Properties of 3D Ti-6Al-4V Articles Produced with Advanced Co-axial Electron Beam & Wire Additive Manufacturing Technology* // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 321. 03014 : *The 14th World Conference on Titanium*. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202032103014>

**Жаріков Д., Борисов Д., Романенко А., Гринь О.Г., Жаріков С.В.**  
(Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна).

## **ПОШУК РАЦІОНАЛЬНОГО БАЛАНСУ ПОЄДНАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛАКОВОЇ СИСТЕМИ**

**Анотація:** У роботі проведено дослідження впливу співвідношення компонентів шлакової системи на її в'язкість і поверхневий натяг. Проаналізовано взаємозв'язок між хімічним складом шлаків і технологічними характеристиками процесу наплавлення самозахисних порошкових дротів. Встановлено закономірності зміни фізичних властивостей залежно від концентрації основних компонентів системи  $\text{CaO}-\text{CaF}_2-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ . На основі експериментальних даних і математичного моделювання побудовано поверхні відгуку, що дозволяють визначити області оптимальних значень в'язкості та поверхневого натягу. Обґрунтовано раціональний баланс компонентів, який забезпечує стабільність процесу формування зварного шва, покращення металургійних процесів і зниження дефектності наплавленого металу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації складу порошкових дротів і підвищення якості зварювальних робіт у машинобудуванні.

**Ключові слова:** шлак, порошковий дріт, в'язкість, поверхневий натяг, шлакова система, оптимізація.

**Abstract:** The paper investigates the influence of the component ratio of slag systems on viscosity and surface tension. The relationship between the chemical composition of slags and the technological characteristics of the self-shielded flux-cored wire welding process is analyzed. The regularities of changes in physical properties depending on the concentration of the main components of the  $\text{CaO}-\text{CaF}_2-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$  system are established. Based on experimental data and mathematical modeling, response surfaces are constructed to determine the regions of optimal viscosity and surface tension values. A rational balance of components ensuring process stability, improved metallurgical interactions, and reduced defects in the deposited metal is substantiated. The obtained results can be used to optimize the composition of flux-cored wires and improve welding quality in mechanical engineering.

**Keywords:** slag, flux-cored wire, viscosity, surface tension, slag system, optimization.

**Постановка проблеми.** Відомо [1-4], що склад газошлакових наповнювачів самозахисних порошкових дротів (СПД) та фізичні властивості шлаків, що утворюються під час плавлення дроту і утворення захисного покриття, впливають на природу сплаву, якість дозованого металу, рівномірність плавлення оболонки і осердя та інші зварювально-технологічні властивості дроту. Разом з тим в недостатній мірі досліджено комплексний вплив фізичних властивостей шлаків, як-то поверхневий натяг і в'язкість, на формування зварного шва, видалення шлаку з розплавленого металу, відокремлення шлакової кірки, повноту металургійних процесів між шлаком і розплавленим металом, газонасичення наплавленого металу, формування валика.



Для успішного розвитку СПД необхідний аналіз кореляції між технологічними характеристиками процесу його плавлення та фізичними властивостями шлаків залежно від їх складу та структури.

**Аналіз публікацій.** Аналіз публікацій [3-6] показав вплив окремих параметрів фізичних властивостей на технологічні характеристики процесу: поверхневого натягу на формування зварного шва, видалення шлаку з розплавленого металу, поведінку дуги, відокремлення шлакової кірки та в'язкості на повноту металургійних процесів між шлаком і розплавленим металом, газонасичення наплавленого металу, формування валика.

Було визначено, що для технологічних цілей, придатних для зварювання, в'язкість шлаків обмежена кривими рівноважного значення ( $\eta = 0,05 \dots 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), а поверхневий натяг становить  $300\text{--}350 \text{ мДж/м}^2$ .

**Мета та постановка задачі.** Мета роботи полягає у вивченні та обґрунтуванні взаємозв'язку між хімічним складом шлаків та їх в'язкістю і поверхневим натягом та визначенні раціонального балансу співвідношення цих властивостей.

**Основний текст.** У процесі роботи за основу була прийнята добре відома шлакова система  $\text{CaO-CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ .

В'язкість шлакової системи досліджували за допомогою роторного віскозиметра з робочим тілом, що обертається. Чутливість приладу становить  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Гранична відносна похибка  $\leq 7 \%$ . Отримані значення в'язкості для кожного експерименту наведено в табл. 1.

Вимірювання поверхневого натягу шлаку проводилося методом максимального тиску газу у флаконі при зануренні капіляра на різну глибину [7]. Середня квадратична похибка вимірювання поверхневого натягу дорівнює  $1,3 \%$ . Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Експериментальні та розрахункові залежності поверхневого натягу та в'язкості шлакового плавлення від вмісту компонентів

| № досліду | Хімічний склад шлаку        |                |                | Поверхневий натяг      |                        | В'язкість (при $1700\text{K}$ ) $\eta \cdot 10^{-1}, \text{ Па}\cdot\text{с}$ |                      |
|-----------|-----------------------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|           | $\text{CaF}_2 + \text{CaO}$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{TiO}_2$ | $\sigma_{\text{експ}}$ | $\sigma_{\text{розн}}$ | $\eta_{\text{експ}}$                                                          | $\eta_{\text{розн}}$ |
| 1         | 1                           | 0              | 0              | 390                    | 390                    | 0,04                                                                          | 0,04                 |
| 2         | 0                           | 1              | 0              | 295                    | 295                    | 0,9                                                                           | 0,9                  |
| 3         | 0                           | 0              | 1              | 250                    | 250                    | 1,6                                                                           | 1,6                  |
| 4         | 0,5                         | 0,5            | 0              | 380                    | 380                    | 0,3                                                                           | 0,3                  |
| 5         | 0,5                         | 0              | 0,5            | 270                    | 270                    | 1,4                                                                           | 1,4                  |
| 6         | 0                           | 0,5            | 0,5            | 375                    | 375                    | 0,6                                                                           | 0,6                  |
| 7         | 0,334                       | 0,333          | 0,333          | 292                    | 292,00                 | 0,4                                                                           | 0,4                  |

В результаті реалізації цього експерименту та обробки отриманих даних у програмі Statistica 6 було отримано рівняння (1) та рівняння (2), які

описують зміну в'язкості та поверхневого натягу шлаку залежно від його хімічного складу.

$$\eta = 0,04 \cdot (CaF_2 + CaO) + 0,9 \cdot SiO_2 + TiO_2 - 0,68 \cdot (CaF_2 + CaO) \cdot SiO_2 + 3,52 \cdot (CaF_2 + CaO) \cdot TiO_2 - 1,4 \cdot SiO_2 \cdot TiO_2 - 10,9806 \cdot (CaF_2 + CaO) \cdot SiO_2 \cdot TiO_2 \quad (1)$$

$$\sigma = 390 \cdot (CaF_2 + CaO) + 295 \cdot SiO_2 + 250 \cdot TiO_2 + 150 \cdot (CaF_2 + CaO) \cdot SiO_2 - 200 \cdot (CaF_2 + CaO) \cdot TiO_2 + 410 \cdot SiO_2 \cdot TiO_2 - 1610,51 \cdot (CaF_2 + CaO) \cdot SiO_2 \cdot TiO_2 \quad (2)$$

За результатами дослідження системи  $CaF_2$ - $CaO$ - $SiO_2$ - $TiO_2$  були побудовані поверхні відгуку (рис. 1) залежності поверхневого натягу ( $\sigma$ ) та в'язкості ( $\eta$ ) від хімічного складу шлакового розплаву.

Відомо [8], що в'язкість визначається природою та складом розплаву, а також його температурою. Характер впливу оксидів на в'язкість розплаву оксифториду залежить не лише від розміру частинок (комплексів) та їх кількості, але й від енергії їхньої взаємодії [9, 10].

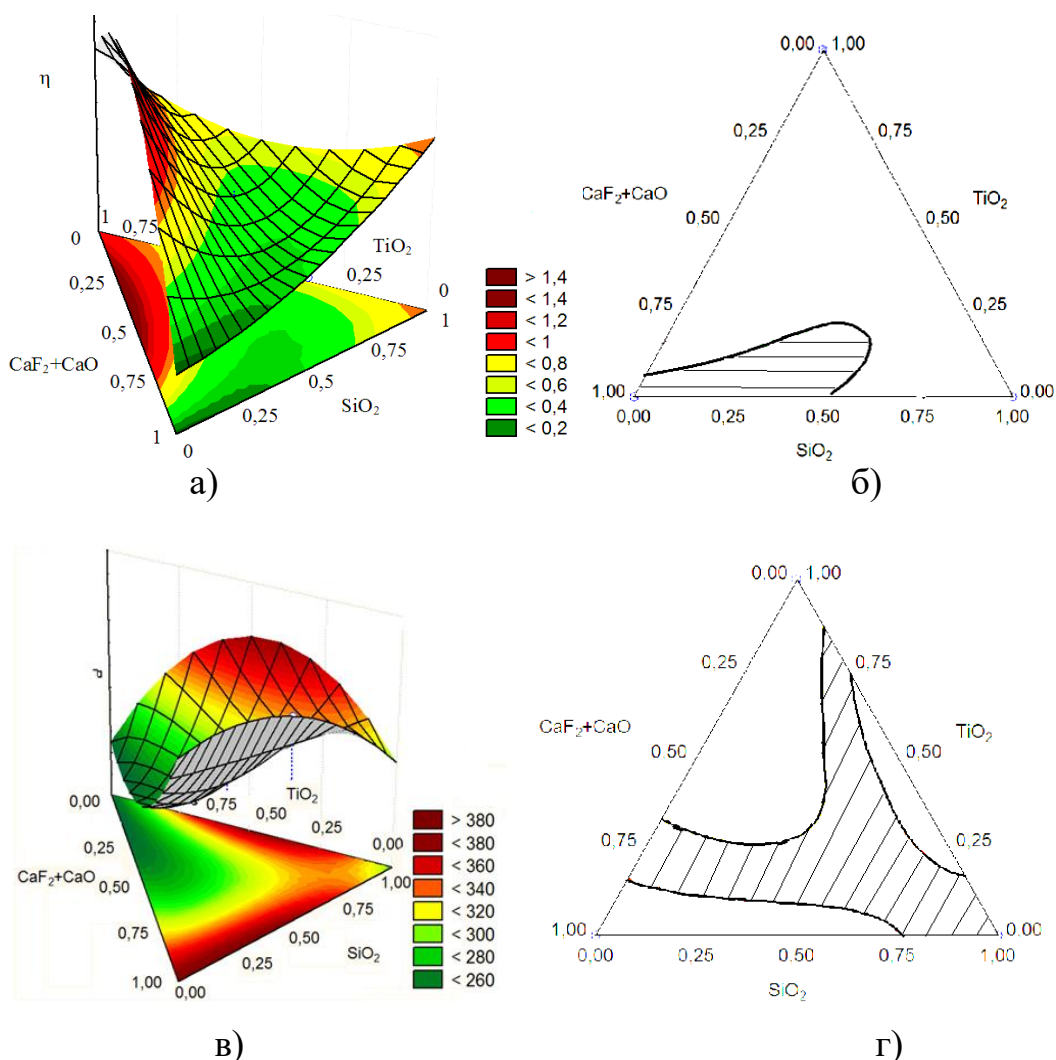


Рисунок 1. Поверхня відгуку математичної залежності в'язкості (а) та поверхневого натягу (в) від хімічного складу шлаку та графічна інтерпретація області оптимальних значень в'язкості (б) та поверхневого натягу (г)

З отриманої графічної залежності (рис. 1) видно, що зі зменшенням вмісту  $\text{CaF}_2 + \text{CaO}$  значення в'язкості зростає, що пов'язано зі зменшенням концентрації фторид-іонів, які мають відносно невеликі розміри [6, 7].

При великій кількості добавок оксидів титану, що відіграють роль комплексоутворювачів [4, 9, 11], збільшується в'язкість шлаку. Деяке зниження в'язкості в шлаках з відносно високим вмістом кремнезему зі збільшенням вмісту  $\text{TiO}_2$  можна пояснити збільшенням у розплаві аніонів кисню  $\text{O}^{2-}$ , які руйнують кремній-кисневі комплекси  $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-} + \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{SiO}_4^{4-}$ .

При великій кількості добавок оксидів титану відбувається утворення комплексних з'єднань [4, 9, 11], що сприяють підвищенню в'язкості.

Отже, у потрійній системі  $\text{CaF}_2 + \text{CaO-SiO}_2\text{-TiO}_2$  (рис. 1) область хімічних складів шлаків з відносно низькою в'язкістю зміщується до сторони з високим вмістом  $\text{CaF}_2 + \text{CaO}$  та  $\text{TiO}_2$  і відносно низьким вмістом  $\text{SiO}_2$ .

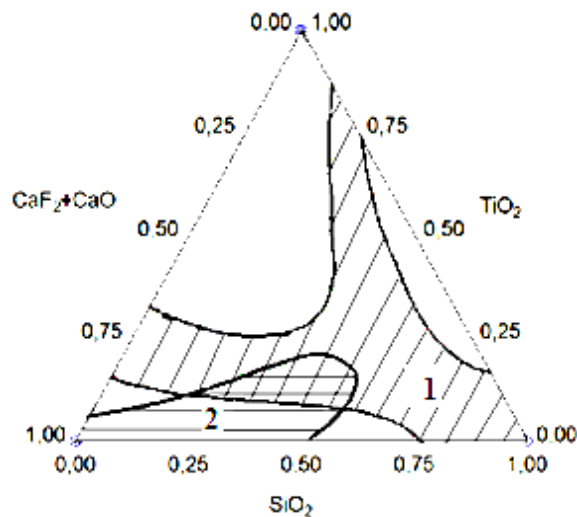
На основі отриманої математичної моделі було побудовано область оптимальних значень в'язкості від співвідношення досліджуваних компонентів (рис. 1, б).

Відомо [10], що вплив оксидів  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  при їх додаванні до розплаву системи  $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$  має неоднозначний вплив на величину його поверхневого натягу. З одного боку, поява сильніших іонів у розплаві повинна призводити до синхронного збільшення поверхневого натягу, а з іншого боку, поверхневий натяг, внаслідок хімічних реакцій на поверхні розплаву з утворенням летких іонів, зменшується.

З додаванням  $\text{TiO}_2$  до фторидно-оксидного розплаву можна спостерігати незначне зниження поверхневого натягу, що пояснюється [12] утворенням складних аніонних груп, які завдяки своїм великим розмірам мають нижчу кулонівську енергію взаємодії з катіонами.

На основі отриманої графічної моделі відгуку було побудовано діаграму, на якій вказана область оптимальних значень поверхневого натягу для обраної шлакової основи (рис. 1, г).

При накладенні діаграм оптимальних значень поверхневого натягу та в'язкості для шлакової системи  $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-TiO}_2$  (рис. 2) отримуємо перетин двох областей. Цей перетин є областю оптимальних значень співвідношення компонентів шлакової основи та відповідає:  $\text{CaF}_2 + \text{CaO} = 0,25\ldots 0,65$ ;  $\text{SiO}_2 = 0,2\ldots 0,55$ ;  $\text{TiO}_2 = 0,1\ldots 0,23$ .



1 – область оптимальних значень поверхневого натягу; 2 - область оптимальних значень в'язкості; 3 – перетин областей

Рисунок 2 - Схема нанесення областей оптимальних значень поверхневого натягу та в'язкості

## ВИСНОВКИ

1. За результатами досліджень отримано математичні залежності значень в'язкості та поверхневого натягу від співвідношення компонентів для системи  $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ , а також побудовано їх графічні моделі.

2. Визначено раціональний баланс поєднання оптимальних значень поверхневого натягу та в'язкості для досліджуваної шлакової системи із співвідношенням компонентів:  $\text{CaF}_2 + \text{CaO} = 0,55...0,80$ ;  $\text{SiO}_2 = 0,20...0,55$ ;  $\text{TiO}_2 = 0,25...0,40$ .

3. Перспективним є дослідження впливу в'язкості і поверхневого натягу шлаків на технологічні характеристики плавлення самозахисного порошкового дроту.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Гринь О.Г. Вплив плавкості шлаків на рівномірність плавлення самозахисного порошкового дроту / О.Г. Гринь, І.О. Трембач, С.В. Жаріков // Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції 25-27 жовтня 2023 року за заг. ред. А.М. Фесенка - М.А. Турчаніна. – Краматорськ: ДДМА, 2023. – С. 36–38. ISBN 978-617-7889-48-8
2. Гринь О. Г. Дослідження фізичних властивостей і структури шлаків, утворених при наплавленні порошковими дротами / О. Г. Гринь, С. В. Жаріков, І. О. Бойко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ, 2011. – № 4 (25). – С. 185–190.
3. Гринь О. Г. Віддільність шлакової корки при наплавленні самозахисним порошковим дротом / О. Г. Гринь, В. М. Карпенко, І. О. Бойко // Вісник ДДМА, 2009. – №5. – С. 169-173.
4. Макієнко В. М. Вплив компонентів шлакової системи порошкових дротів на технологічність процесу наплавлення та механічні властивості наплавленого металу / В.М.Макієнко, Д. В. Строїтелєв, Е. М. Баранов, І. О. Романов // Сварочное производство, 2006. – №10. – С. 7–10.
5. Журавльов В. В. Обґрунтування параметрів в'язкості шлакових систем для безперервного розливання сталі / В. В. Журавльов, В. О. Синельников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2020. – Вип. 4. – С. 45–51

6. Пацкевич І.Р. Поверхневі явища у зварювальних процесах / І.Р. Пацкевич, Г.Ф. Деєв – Металургія, 1974. – 121 с.
7. Якобашивілі С.Б. Поверхневі властивості флюсов і шлаків / С.Б. Якобашивілі – К.: Техніка, 1970. – 205 с.
8. Есін О. А. Фізична хімія пірометалургічних процесів / О.А. Есін, П. В. Гельд – Металургія, 1966. – 710с.
9. R. C. Behera and U. K. Mohanty/ Viscosity of molten  $Al_2O_3$ – $Cr_2O_3$ – $CaO$ – $CaF_2$  slags at various  $Al_2O_3/CaO$  ratios/ ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 8, pp. 834–843 - <http://dspace.nitrkl.ac.in/dspace/bitstream/2080/144/1/ukm2.pdf>.
10. Лепинських Б.М. Фізична хімія оксидних і оксифторидних розплавів / Б.М. Лепинських, А.І. Манаков –К.: Наука, 1977. – с. 190.
11. Нестеренко С.В. Фізичні властивості металургійних шлаків / С.В. Нестеренко, Н.А. Овчинніков, В.М. Хоменко – Донецьк: Донеччина, 2001. – 224 с.
12. Костьолов П. О. Термодинамічне моделювання фізичних характеристик оксидних розплавів / П. О. Костьолов // Сучасні проблеми металургії, 2021.– № 24. – С. 112–119.

УДК 004.896

**Зеленський І.Р., Третяк В.В., Волков А.О.** (Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна).

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ КІЛЬКОСТІ І ПОСЛІДОВНОСТІ ОПЕРАЦІЙ ПРИ ФОРМУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ДЕТАЛІ «ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ»**

**Анотація:** У роботі досліджено проблеми автоматизації формування технологічних процесів для складних деталей авіаційних двигунів та розроблено підхід до розрахунку кількості і послідовності операцій обробки. Проаналізовано недоліки існуючих інтелектуальних систем автоматизованого проектування, що базуються на використанні аналогів та класифікаційних методів. Запропоновано програмне забезпечення для напіваавтоматичного формування технологічного процесу на основі аналізу конструктивних параметрів деталі. Представлено екранні форми інтерфейсу, що забезпечують введення даних, розрахунок кількості операцій, формування списку поверхонь і побудову технологічної документації. Проведено тестові розрахунки для деталі типу «вал-шестерня», що підтверджують ефективність запропонованого підходу. Встановлено, що автоматизація розрахунків дозволяє скоротити час проектування та підвищити точність визначення структури технологічного процесу. Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі та інтегровані в сучасні системи автоматизованого проектування.

**Ключові слова:** технологічний процес, автоматизація, САПР, вал-шестерня, виробництво, оптимізація

**Abstract:** The paper investigates the problems of automating the formation of technological processes for complex aircraft engine components and proposes an approach to calculating the number and sequence of machining operations. The limitations of existing intelligent computer-aided design systems based on analog and classification methods are analyzed. Software for semi-automatic generation of technological processes based on the analysis of part design parameters is developed. Interface screen forms for data input,

*operation calculation, surface list generation, and technological documentation creation are presented. Test calculations for a shaft-gear type part confirm the efficiency of the proposed approach. It is established that automation reduces design time and improves the accuracy of determining the structure of the technological process. The results can be used in education and integrated into modern CAD systems.*

**Keywords:** technological process, automation, CAD, shaft-gear, manufacturing, optimization.

Як відомо, деталі авіаційних двигунів мають складні конструктивні і технологічні характеристики. Вони мають, як правило великі габаритні розміри, виробляються з важкодеформуємих матеріалів, мають високу точність розмірів і поверхонь, низьку шорсткість, що впливає на складність формування технологічного процесу.

Існуючі інтелектуальні системи пропонують викорисовувати математичні методи автоматизованого проектування технологічних процесів або методами адресації в діалоговому режимі, або методом синтеза з елементами аналогами при проектуванні групових технологічних процесів. У цьому варіанті технологічний процес формується за фрагментами аналога і лише корегується в залежності від констуктивних ознак деталі.

Для перспективних технологічних процесів це не завжди можливо. Для перспективних технологічних процесів технологи користуються методом синтеза з елементами аналогами або в ручному режимі, або для цього використовуюються методи класифікаційної обробки.

В роботах [1-3] представлені математичні методи і розроблене програмне забезпечення для реалізації автоматизованого формування плану технологічного процесу для групових і типових технологічних процесів з використанням структурно-аналітичного метода розпізнавання образів. Але при роботі з цим методом такий план повинен вже існувати як типовий, що не завжди існує в літературних джерелах.

Є класичний метод, яким користуються в навчальному процесі. Спочатку по кресленню деталі, таблицям і технічним умовам всім поверхням деталі присвоюється номер, потім по двом формулам розраховується кількість їх оброблення, потім складається таблиця і план технологічного процесу. За планом формуються операції і переходи, а кінцевим етапом є формування технологічної документації.

Далі представлені екранні форми розробленого на кафедрі «технологій виробництва авіаційних двигунів» програмного забезпечення і варіант виконання послідовності розрахунків у напівавтоматичному режимі для деталі «Вал-шестерня».

Ескіз деталі, таблиця парметрів зубців і технічні умови представлені на рис. 1-3.

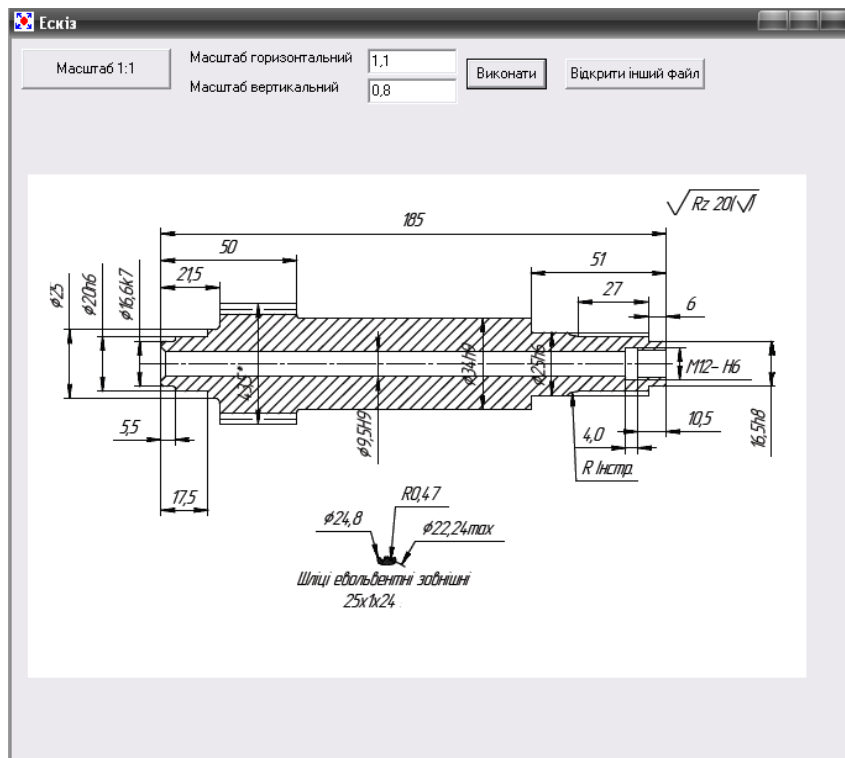


Рисунок 1. Екранна форма для перегляду ескізу деталі «Вал-шестерня»

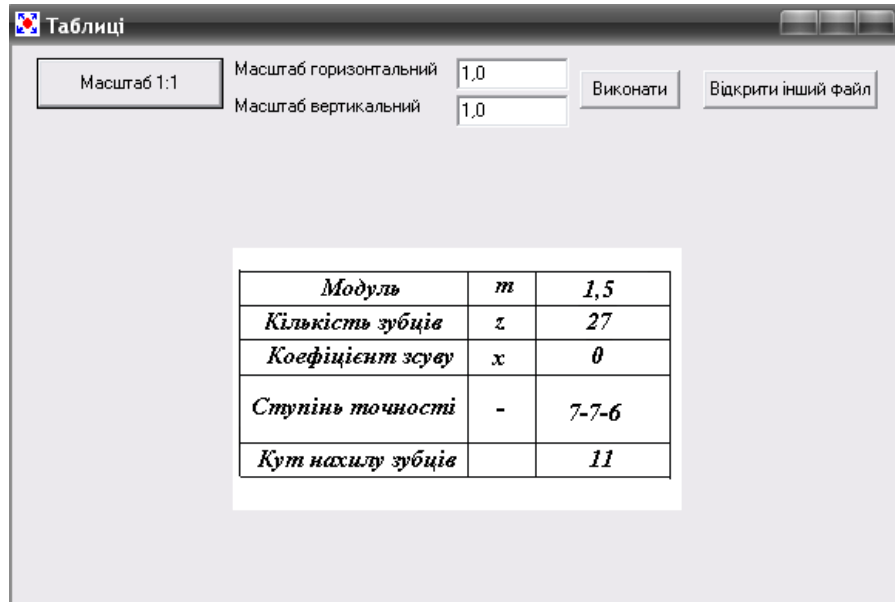


Рисунок 2. Екранна форма для перегляду таблиці в кресленні деталі «Вал-шестерня»

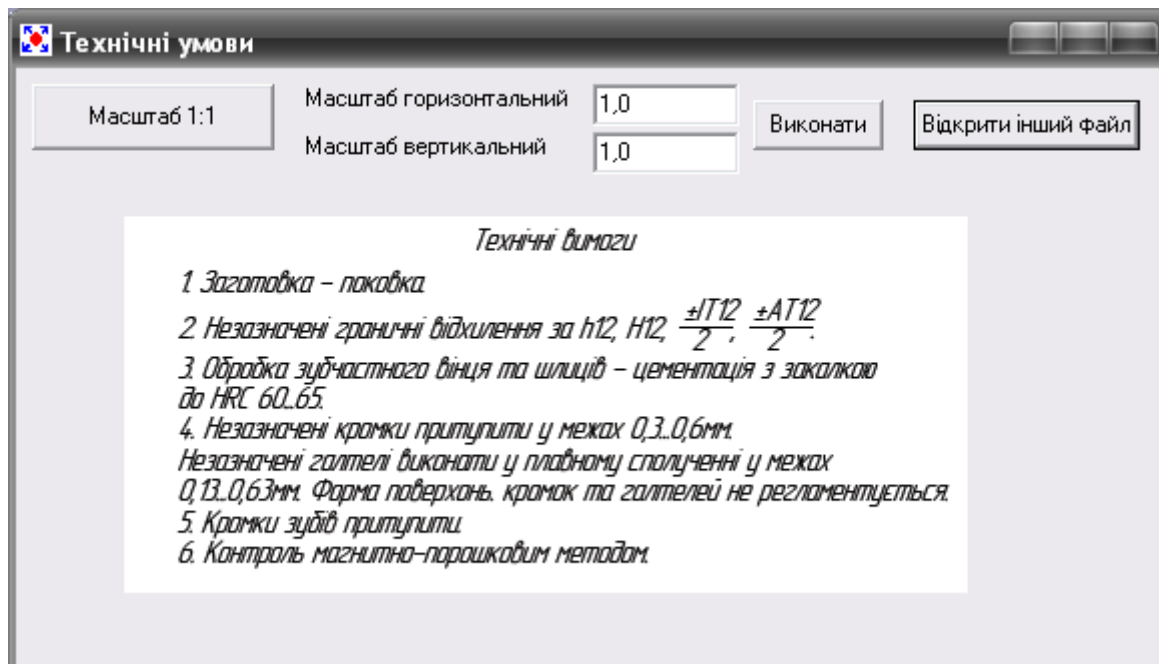


Рисунок 3. Екранна форма для технічних вимог деталі «Вал-шестерня»

На рис.4 представлено екранну форму з нумерацією поверхонь деталі «Вал-шестерня». Ці рисунки можна переглянути у будь-який момент за бажанням користувача при створенні технологічного процесу або через головне меню, або по кнопкам «Ескіз», «Таблиці», «Технічні умови», «Ескіз поверхонь».

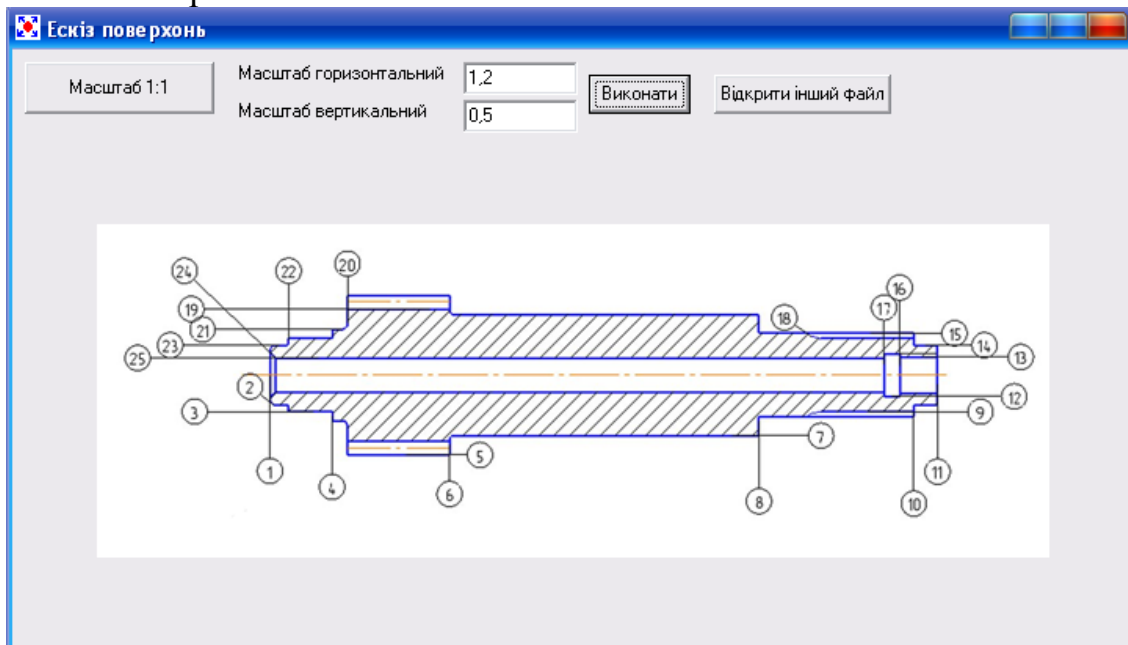


Рисунок 4. Екранна форма для перегляду нумерації поверхонь деталі «Вал-шестерня»

На рис. 5 представлена екранна форма для формування списку поверхонь деталі. На рис.5 в складі поверхонь присутня поки що тільки перша за списком поверхоня деталі «Вал-шестерня» - «Торцева».



Інші поверхні додаються при використанні кнопок: «Вид поверхні», «Тип поверхні» і інші у верхньому правому куті.

Список поверхонь росташований в лівому куті. Кнопки «Зберегти структуру» і «Відкрити структуру» необхідні для збереження даних і їх використання в інших модулях програми.

Рисунок 5. Екранна форма для формування списку кодів поверхонь деталі «Вал-шестерня»

На рис. 6 представлена екранна форма для формування параметрів кожної поверхні деталі.

| Наймк/Пар | Знач | Вал_доп | Отв_доп | Верх | Нижн | Ra | Rz |
|-----------|------|---------|---------|------|------|----|----|
| L         | 185  | h12     | -       | 0    | 460  | 5  | 20 |
| D         | 16,6 | k7      | -       | +19  | +1   | 5  | 20 |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |
|           |      |         |         |      |      |    |    |

Рисунок 6. Екранна форма для формування параметрів поверхонь деталі «Вал-шестерня»

На рис. 7 представлена екранна форма з розрахунком необхідної кількості операцій для першої поверхні.

Розрахунок кількості операцій

Ном. розмір заготов. 195 Т-? Заготовка ? Rz-? ? Перерахувати

IT16 2000 n no Rz180 180 n no

Ном. розмір деталі h12 460 1,38 1 Rz25 25 2,15 2 2 Розрахувати

185 Деталь Поверхня 1 ?

Рисунок 7. Екранна форма для розрахунків кількості операцій для першої поверхні деталі «Вал-шестерня»

Кнопки  необхідні для перегляду інформації - формул розрахунків, таблиць параметрів точності, шорсткості і таблиць перерахунків цих параметрів.

Кнопка  існує для збереження даних при їх використанні в інших модулях програми.

На рис. 8 представлена екранна форма для кінцевого розрахунку операцій для вибраної поверхні.

Таблиця для розрахунку кількості обробок поверхонь

| №                | Характеристики     |                      | Кількість      |                |                |                | Характеристики по операціям: |   |   |   |   | Технологічні операції |                 |
|------------------|--------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|---|---|---|---|-----------------------|-----------------|
|                  | Деталь             | Заготовка            | n <sub>г</sub> | n <sub>ш</sub> | n <sub>с</sub> | n <sub>т</sub> | 1                            | 2 | 3 | 4 | 5 | №                     | Найменування    |
| N поверхні       | Точність заготовки | Шорсткість заготовки |                |                |                |                | h12                          |   |   |   |   | 10                    | Токарна чорнова |
| 1                | is16               | Rz180                | 1,69           | 2,15           |                |                | Rz 50                        |   |   |   |   | 70                    | Токарна чистова |
| Вид              | 2900               | 180                  | 2              | 2              |                |                | Ra 5                         |   |   |   |   |                       |                 |
| Розмір заготовки | Точність деталі    | Шорсткість деталі    |                |                |                |                |                              |   |   |   |   |                       |                 |
| 190              | h12                | Rz25                 |                |                |                |                |                              |   |   |   |   |                       |                 |
| Розмір деталі    | 480                | 25                   |                |                |                |                |                              |   |   |   |   |                       |                 |
| 185              |                    |                      |                |                |                |                |                              |   |   |   |   |                       |                 |

Зберегти дані Відкрити дані Обнулити дані Квалітети Шорсткість Приклад Скачати

☒ Всі ☐ Операції

Рисунок 8. Екранна форма для формування таблиці для розрахунків кількості операцій першої поверхні деталі «Вал-шестерня»

На рис. 9 представлена екранна форма фрагмента кінцевої таблиці.

За представленими розрахунками можна скласти план обробки поверхонь з необхідними ескізами, а також сформуванати технологічну документацію.

| №     | Характеристики |           |      |        | Кількість |      |    |    | Характеристики за операціями: |   |               |              |   | Технологічні операції |
|-------|----------------|-----------|------|--------|-----------|------|----|----|-------------------------------|---|---------------|--------------|---|-----------------------|
|       | Деталь         | Заготовка |      |        | пт        | пш   | пб | пш | 1                             | 2 | 3             | 4            | 5 | Назва                 |
|       |                |           |      |        |           |      |    |    | h12                           |   | h8<br>Ra 2,5  |              |   | Токарна чистова       |
|       |                | Ra 2,5    |      | Rz 160 |           |      |    |    |                               |   |               | h7<br>Ra 2,5 |   | Шліфування            |
| 21    | 25             | 0         | 29   | 1      | 1,85      | 2,27 |    | 2  | h12<br>Rz 50                  |   |               |              |   | Токарна чорнова       |
|       |                | -0,084    |      | -0,5   |           |      |    |    | h10<br>Ra 5                   |   |               |              |   | Токарна напівчистова  |
|       |                | Ra 5      |      | Rz 160 |           |      |    |    | h8<br>Ra2,5                   |   |               |              |   | Токарна               |
| 14    | 16,5           | 0         | 25,3 | 0      | 0         | 0    |    | 1  |                               |   |               |              |   |                       |
|       |                | -0,027    |      | -0,027 |           |      |    |    |                               |   |               |              |   |                       |
|       |                | Ra 2,5    |      | Ra 2,5 |           |      |    |    |                               |   |               |              |   |                       |
| 1; 11 | 185            | 0         | 195  | 1,3    | 1,38      | 2,27 |    | 2  | h12<br>Rz 50                  |   |               |              |   | Токарна чорнова       |
|       |                | -0,46     |      | -0,7   |           |      |    |    | h12<br>Ra 5                   |   |               |              |   | Токарна чистова       |
|       |                | Ra 5      |      | Rz 160 |           |      |    |    |                               |   |               |              |   |                       |
| 6,20  | 28,5           | 0         | 32,5 | 1      | 2,7       | 3,03 |    | 3  | h12<br>Rz 50                  |   |               |              |   | Токарна чорнова       |
|       |                | -0,084    |      | -0,5   |           |      |    |    | h12<br>Ra 5                   |   |               |              |   | Токарна чистова       |
|       |                | Ra 2,5    |      | Rz 160 |           |      |    |    |                               |   | h10<br>Ra 2,5 |              |   | Шліфування            |
| 25    | 9,5            | 0,043     | 9,3  | 0,15   | 1,17      | 2    |    | 2  | H12<br>Ra 20                  |   |               |              |   | Свердління            |

Рисунок 9. Екранна форма фрагмента кінцевої таблиці розрахунків кількості операцій для кожної поверхні деталі «Вал-шестерня»

На рис. 10 представлено карту ескізів для 10 операцій.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє в напівавтоматичному режимі проектувати план перспективних технологічних процесів методом синтеза з елементами аналогами перш за все у навчальному процесі.

Окремі модулі програми можуть бути використані в сучасних САПР системах.

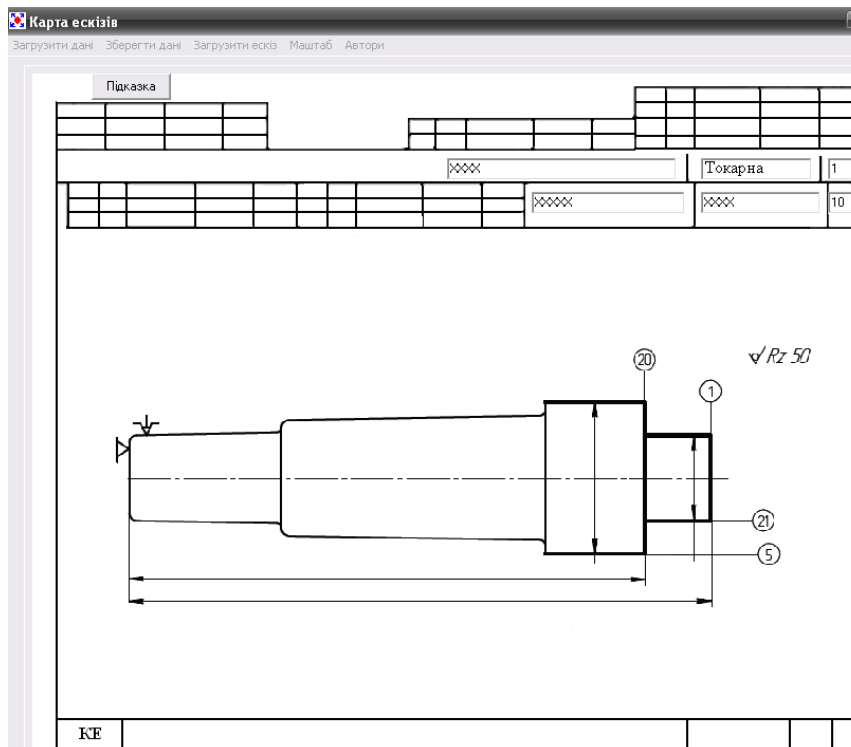


Рисунок 10. Екранна форма для карти ескізів для 10 операцій деталі «Вал-шестерня»

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Третьяк В. В., Близнюк О. О. Синтез технологічних процесів для об'ємних деталей з використанням структурно-аналітичного методу розпізнавання подібностей // XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2023 – С. 40.
2. Близнюк О. О. Автоматичне формування елементів і структури ТП за допомогою структурно-аналітичних моделей розпізнавання образів // Молода наука - роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування. Збірник наукових праць міжнародної молодіжної науково-технічної конференції 10-12 квітня 2024 р. За загальною редакцією д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського and Hon. D .Sc., Prof. Predrag Dašić Краматорськ – Вінниця – Тернопіль, 2024 . – С. 118-125.
3. Третьяк В. В., Квятковский М. Ю., Данаєв О. В. Використання структурно-аналітичної моделі для автоматичного формування маршрутно-операційного опису деталі типу «вал» // Молода наука - роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування: збірник наукових праць Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 16-18 квітня 2025 р.. / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф., and Hon.D.Sc., Prof. Predrag Dašić – Краматорськ : ДДМА, 2025. – С 287-292.

УДК 621.9

**Зюган У.І., Цивінда Н.І.** (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна).

## **АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ГІРНИЧО-ДОБУВНОГО КОМПЛЕКСУ З ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ РІЗАЛЬНИМИ ПЛАСТИНАМИ З КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ**

**Анотація:** У роботі представлено результати аналізу експериментальних досліджень обробки деталей гірничо-добувного комплексу з високомарганцевих сталей різальними пластинами на основі кубічного нітриду бору. Розглянуто особливості механічної обробки сталі 110Г13Л, яка характеризується високою в'язкістю та схильністю до наклепу, що ускладнює процес різання. Проаналізовано вплив інструментальних матеріалів на продуктивність обробки, зносостійкість та стійкість різального інструменту. Наведено результати експериментальних досліджень при використанні різальних пластин типу гексаніт та кіборит, визначено режими різання та їх вплив на тривалість обробки і якість поверхні. Встановлено, що застосування надтвердих матеріалів дозволяє суттєво підвищити швидкість різання та знизити трудомісткість процесу. Обґрунтовано економічну доцільність використання кубічного нітриду бору при обробці важкооброблюваних матеріалів у машинобудуванні.

**Ключові слова:** різання, високомарганцева сталь, кубічний нітрид бору, інструмент, знос, продуктивність, обробка.

**Abstract:** The paper presents an analysis of experimental studies on machining mining industry components made of high-manganese steels using cutting inserts based on cubic boron nitride. The features of machining 110G13L steel, characterized by high ductility and work hardening, are considered. The influence of tool materials on machining performance, wear resistance, and tool life is analyzed. Experimental results obtained using hexanite and kiborit cutting inserts are presented, including cutting parameters and their effect on machining time and surface quality. It is established that the use of superhard materials significantly increases cutting speed and reduces process labor intensity. The economic feasibility of using cubic boron nitride for machining difficult-to-machine materials in mechanical engineering is substantiated.

**Keywords:** machining, high-manganese steel, cubic boron nitride, cutting tool, wear, productivity, processing.

Надійність і довговічність дробарок та мельниць, а значить і собівартість продукції гірничо-добувного комплексу напряму пов'язані з затратами на механічну обробку деталей. В конструкціях дробарок та мельниць, різної фракції подрібнення, особливу увагу заслуговує обробка броней, яких в кожній дробарці по дві: нижня і верхня бронь та футеровочних кілець. Причина не тільки у тому, що це крупногабаритні великотонажні деталі, а й тому, що броні виготовлені зі сталі 110Г13Л - самонаклепуваної важкооброблюваної сталі. Для підвищення продуктивності механічної обробки необхідно постійно шукати шляхи підбору матеріалу різальної частини токарних різців [1].

Однією з головних причин, яка обмежує використання різальних інструментів для обробки сталі 110Г13Л є надзвичайно утруднена її обробка різанням. Сталь настільки в'язка і здатна під дією сил різання  $P_z$  до утворення наклепування в точках стикання різця, що стримує підвищення продуктивності обробки різальним інструментом.

Різальна частина інструментів при роботі піддається стиранню, тепловим взаємодіям та силовим навантаженням, здійснюючи безперервне деформування зрізаємого шару. Ці, дуже важкі умови роботи, визначають вимоги до матеріалу різальної частини. Основні показники стійкості інструментальних матеріалів для різальних частин – границі міцності на згинання та стискання, ударна в'язкість, здатність протистояти зношуванню при стиранні.

Існує безліч фірм, які пропонують свої новітні розробки в області обробки матеріалів різанням важкооброблюємих матеріалів [2]. На підприємствах Кривбасу активно проводять випробування інструментів різних фірм з метою визначення стійкості інструментів при обробці деталей зі сталі 110Г13Л, таких, як матеріали з кубічного нітриду бору, надтвердого матеріалу, що отримується методом спікання дрібних частинок нітриду бору в умовах дуже високого тиску. Нітрид бора BN відомий в трьох модифікаціях: гексагональний графітоподібний (ГНБ), кубічний (КНБ) і гексагональний в'юрцитоподібний нітрид бора (ВНБ).

Рівень швидкостей різання 110Г13Л, при обробці традиційними інструментальними матеріалами (BK8, T5K10, T15K6...) складає 6-14 м/хв.

Також на деяких підприємствах застосовують плазмово-механічну обробку.

Ріст швидкостей в даному випадку обмежений низькими теплофізичними властивостями твердого сплаву. Однак, тільки швидкість різання може служити реальним джерелом суттєвого підвищення продуктивності і зниження собівартості обробки, так як значення подач інструментів не можуть бути підвищені з-за вимог до шорсткості, які постійно ростуть. Постановка експериментів здійснювались в ремонтно-механічному цеху одного з підприємств міста.

#### *Випробування 1*

Найменування операції : токарна

Обладнання : токарно-карусельний верстат, моделі 1550

Деталь : кільце футеровочне, сталь 110 Г13Л

Вид обробки: чорнова та чистова обробка

Найменування інструменту: пластина LINCUT RNMN 190700 S07015 IBN 100-кіборит та Гексаніт 07 RNUN 200800S

Таблиця 1. Результати випробувань

| №з/п | Інструмент | Режими різання |             |          |            | Час обробки, хв |
|------|------------|----------------|-------------|----------|------------|-----------------|
|      |            | $n$ , об/хв    | $S$ , мм/хв | $t$ , мм | $V$ , м/хв |                 |
| 1    | LINCUT     | 8              | 0,45        | 4        | 50         | 480             |
| 2    | Гексаніт   | 8              | 0,45        | 4        | 50         | 2640            |

Висновок: В ході обробки відбувались сколи пластини. Руйнування відбувалось через раковини, які відкриваються при чистовій обробці. Стійкість пластин 8 годин.

#### *Випробування 2*

Найменування операції : токарна

Обладнання : токарно-карусельний верстат, моделі 1Л532 без плазмово-механічної обробки (ПМО).

Деталь: бронь, сталь 110 Г13Л

Вид обробки: чорнова та чистова обробка

Умови обробки: напівчистова обробка, пісок, невеликі тріщини, нагар еліпсність. Обробка внутрішньої конусної поверхні Ø 2000/Ø1750 L=450мм без (ПМО)

Найменування інструменту: Гексаніт 07 RNUN 200800S

Таблиця 2. Результати випробувань

| №з/п | Інструмент                                                                               | Режими різання |             |          |            | Час обробки, 1 проходу хв | K  |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|----------|------------|---------------------------|----|
|      |                                                                                          | $n$ , об/хв    | $S$ , мм/об | $t$ , мм | $V$ , м/хв |                           |    |
| 1    | Гексаніт 07                                                                              | 9              | 0,5         | 3        | 51         | 26                        | 76 |
|      | Проточено 110 мм. Видимого зношення різальної кромки нема. При обробці присутня вібрація |                |             |          |            |                           |    |

|   |                                                                                          |   |     |   |    |    |     |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------|---|-----|---|----|----|-----|
| 2 | Гексаніт 07                                                                              | 9 | 0,5 | 3 | 51 | 89 | 76  |
|   | Проточено 400 мм. Видимого зношення різальної кромки нема. При обробці присутня вібрація |   |     |   |    |    |     |
| 3 | Гексаніт 07                                                                              | 9 | 0,5 | 5 | 56 | 73 | 127 |
|   | Проточено 330 мм. Різальна кромки затупилась. Вібрації не було                           |   |     |   |    |    |     |

## ВИСНОВКИ.

Проточено 840 мм (188 хв), використана 1 різальна кромка. К-порівняльний показник продуктивності  $K = V \times S \times t$ .

Використання змінних різальних пластин з надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору дозволяє ефективно вирішити ряд технічних і економічних задач:

1.Значне збільшення швидкості різання та доведення її до рівня 50-56 м/хв. При цьому трудомісткість обробки суттєво знижується.

2.При точінні висомарганцевих сталей інструментом на основі кубічного нітриду бору при високих швидкостях різання в поверхневому шарі деталі, що оброблюється не відбувається структурних змін, т.як більша частина тепла йде зі стружкою.

3.Токарна обробка інструментом на основі кубічного нітриду бору дозволяє виключити використання плазмового підігрівання що знижує загальні витрати на механічну обробку, зменшує витрати електроенергії, виключає затрати на закупку плазмотронів [3].

4.Економічний ефект на підприємствах досягається за рахунок: скорочення потреб на електроенергію в 5 разів; скорочення часу обробки виробів в 3 рази; скорочення затрат на утримання верстатів в 2 рази; можливість збільшення виробничої програми на даному парку верстатів в 2 рази; поліпшення екології процесу обробки.

Установлено, що серед основних причин зниження стійкості використання твердосплавних пластин: 30% –наявність ливарних раковин вище 3-5 мм; 60% –недостатня жорсткість верстатів і, як наслідок, вібрації, недостатньо обґрунтовані режими різання складають всього 7-10%.

Після аналізу результатів дослідження були обґрунтовані режими різання. Найбільший інтерес для подальшого дослідження має питання стійкості різального інструменту з кубічного нітриду бору, при інтенсифікації режимів різання, яка впливає на термін експлуатації інструменту і на собівартість виготовлення деталей.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1.Типові технологічні процеси у важкому машинобудуванні/С.В. Ковалевський, В.Т. Саункін, С.Г. Онищук, О.І.Волошин. Навч.посіб. Краматорськ, Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), 2010.116 с.

2.Залога В. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні. Суми: СумДУ, 2013.

3.Цивінда Н.І., Зуєв І.О., Зюган У.І. Підвищення надійності різального інструменту в виробничих умовах/ Розвиток промисловості та суспільства: Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції. 19 -21 травня 2023 р. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2023. С. 165

УДК 004.896:621

**Іванченко В.І., Светлічний І.В., Хоменко Є.В.** (Науково-дослідний центр Державної спеціальної служби транспорту, Дніпро, Україна).

## **РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ВІЙСЬКОВОМУ МАШИНОБУДУВАННІ: ДОСВІД КОРПУСУ ІНЖЕНЕРІВ АРМІЇ США ТА КОРПУСУ КОРОЛІВСЬКИХ ІНЖЕНЕРІВ БРИТАНСЬКОЇ АРМІЇ**

**Анотація:** Стаття присвячена порівняльному аналізу передумов та напрямів впровадження роботизованих систем і технологій штучного інтелекту у військовому машинобудуванні на основі досвіду інженерних підрозділів США та Великої Британії. Досліджено організаційні моделі наукового супроводу, включаючи централізовану та мережеву структури, а також їх роль у розробці інноваційних технологій. Проаналізовано сучасні рішення у сфері автономних платформ, цифрових двійників, безпілотних систем та інтелектуальних алгоритмів обробки даних. Визначено ключові напрями інтеграції штучного інтелекту у військові інженерні процеси, включаючи логістику, будівництво та інженерну розвідку. Обґрунтовано значення міжнародного досвіду для формування національних підходів до розвитку військового машинобудування та підвищення ефективності оборонних систем.

**Ключові слова:** штучний інтелект, роботизація, військове машинобудування, автономні системи, цифрові двійники, безпілотні технології, оборонні технології.

**Abstract:** The paper presents a comparative analysis of the prerequisites and directions for implementing robotic systems and artificial intelligence technologies in military engineering based on the experience of the US Army Corps of Engineers and the Royal Engineers of the British Army. Organizational models of scientific support, including centralized and network-based structures, are examined along with their role in developing innovative technologies. Modern solutions in autonomous platforms, digital twins, unmanned systems, and intelligent data processing algorithms are analyzed. Key directions for integrating artificial intelligence into military engineering processes, including logistics, construction, and reconnaissance, are identified. The importance of international experience for shaping national approaches to the development of military engineering and improving defense capabilities is substantiated.

**Keywords:** artificial intelligence, robotics, military engineering, autonomous systems, digital twins, unmanned technologies, defense technologies.

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**



Збройна агресія РФ проти України та динаміка розвитку сил оборони України, розширення їх функцій та напрямів діяльності поставили на порядок денний питання роботизації та застосування елементів штучного інтелекту (далі - ШІ) у сучасному машинобудуванні. Підставами таких змін є накопичений практичний (зокрема бойовий) досвід підрозділів, а також досвід військових інституцій країн-партнерів, насамперед – Корпусу інженерів армії США (далі – Корпус інженерів) та Корпусу королівських інженерів Британської армії (далі – Корпус королівських інженерів). Актуальність обраної тематики зумовлена динамічним характером сучасного безпекового середовища, в якому спектр глобальних загроз зазнає постійної трансформації (еволюції), враховуючи масштаби застосування штучного інтелекту у військовій сфері та його геополітичні наслідки [1, с. 43].

Сучасні військові конфлікти характеризуються високою динамікою, широким застосуванням безпілотних систем і роботизованих комплексів. Тому машинобудування постало перед потребою швидкого переходу від традиційних технологій до роботизованих і автономних платформ, які інтегрують елементи ШІ [2, с. 357]. Для України, вивчення досвіду країн-партнерів є критично важливим для створення власних інноваційних технологій, що підвищать живучість військ, сприятимуть мінімізації втрат та досягненню визначених цілей [3, с. 76-86].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Стан вітчизняних наукових досліджень зазначеної теми можна охарактеризувати як малочисельний. У існуючих наукових дослідженнях (Хоменко, Светлічний, Шумлянський, Бондар, Краснов та ін.) [1-3; 5] недостатньо узагальнено й систематизовано закордонний досвід роботизації та елементів ШІ у військовому машинобудуванні військових інженерних підрозділів країн-партнерів. Як зазначають Нестеров, Примаченко, Бесараб науковий супровід діяльності Корпусу інженерів здійснюється через систему спеціалізованих науково-дослідних підрозділів, центральне місце серед яких посідає Науково-дослідний центр інженерів армії США (The U.S. Army Engineer Research and Development Center, ERDC). При цьому дослідження ERDC демонструють активний розвиток роботизованих систем для інженерних операцій (Robotics for Engineer Operations, REO), зокрема створення безпілотних бульдозерів, телекерованого будівельного обладнання та автономних платформ для забезпечення логістики й виконання завдань в умовах бойових дій [5 с. 32-42]. Британські наукові установи (зокрема Dstl та розробники British Army RAS Strategy) зосереджують увагу на роях безпілотних систем, використанні цифрових двійників місцевості та розвитку автономних платформ, інтегрованих у єдиний інформаційний простір. Уроки війни в Україні послідовно враховуються під час оновлення британських доктрин і стратегічних документів, зокрема у сфері застосування дронів і роботизованих систем [6; 11; 12].

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Нині особливого значення набуває аналіз того, як провідні військові інженерні формування країн-партнерів адаптуються до сучасних викликів та загроз, впроваджують нові технології та вдосконалюють існуючі з метою виконання завдань за призначенням. Незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішеними питання розробки механізмів інтеграції автономних систем у єдиний інформаційний простір, забезпечення їх надійної роботи в умовах придушення GPS, етичні аспекти застосування летальної зброї автономними системами ІІІ в бойових умовах, а також швидке масштабування технологій подвійного призначення [7; 8; 9].

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою статті є порівняльний аналіз окремих аспектів досвіду застосування роботизованих і ІІІ технологій у військовому машинобудуванні на прикладі Корпусу інженерів армії США та Корпусу королівських інженерів Британської армії. Завдання статті – огляд деяких сучасних технологічних рішень та організаційних моделей.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Історія Корпусу інженерів армії США охоплює понад два століття становлення та розвитку військової інженерії. У 1802 році він був офіційно створений як окремий підрозділ військ, що стало початком інженерної діяльності армії США. Відтоді Корпус інженерів реагував на зміну оборонних потреб держави та соціально-економічних викликів, поступово розширюючи сферу своєї компетенції. Сучасна діяльність підрозділу охоплює як оборонну сферу, так і реалізацію цивільних інфраструктурних проєктів загальнодержавного значення [10].

Американська модель характеризується централізованою вертикаллю: Науково-дослідний центр інженерів армії США (ERDC) об'єднує сім лабораторій, які досліджують та розробляють, зокрема, автономні системи для будівництва, розвідки та логістики. Згідно джерел [5; 10] особлива увага приділяється Robotics for Engineer Operations (REO), як телекерованим та повністю автономним платформам. При цьому ERDC активно застосовує елементи ІІІ для предиктивного моделювання прохідності місцевості та створення 3-D цифрових двійників місцевості [7].

У американському Корпусі (автономна модель) повний цикл від планування до впровадження інновацій, корисних моделей, винаходів та інших результатів наукової та дослідної діяльності відбувається усередині цієї військової інституції і організовано чітко по вертикалі:  
→ Директорат науки й технологій (R&D) Штаб-квартири Корпусу інженерів → Науково-дослідний центр інженерів армії США (вищезгаданий як ERDC) → Лабораторії у складі Центру та окремі спеціалізовані центри й установи.

У вітчизняному науковому дискурсі Корпус королівських інженерів Британської армії позиціонується як структурний компонент армії Великої Британії, який упродовж трьох століть забезпечує інженерну підтримку під час бойових дій, миротворчих операцій та пост-конфліктної реконструкції інфраструктури в різних регіонах світу [9; 10]. На відміну від американської, британська модель є мережевою (інтегрованою): Лабораторія оборонної науки та технологій (Dstl) у взаємодії з королівською школою військової інженерії та Інститутом королівських інженерів забезпечує розробки, зокрема роїв автономних систем (swarms), цифрових двійників і навігації в умовах придушення сигналу. Програма цифрової трансформації британської армії, започаткована з 2020 року підтверджує перехід від аналогових методів до цифрового підходу, орієнтованого на роботу з великими даними (на тлі переходу від концепції розвитку Індустрія 4.0 до Індустрії 5.0) [11; 12]. У такій моделі організація та здійснення завдань відбувається у рамках спільної для всіх складових британського Міністерства оборони інфраструктури без утворення власної потужної наукової інституції, і у ефективній співпраці з цивільними науковими установами (НДЦ, університети та їхні лабораторії і т.д.) та промисловістю й бізнесом (впровадження, серійне виробництво винаходів та розробок).

**Порівняльний аналіз показує, що Корпус інженерів армії США демонструє більш масштабну інтеграцію інформаційних технологій порівняно із Корпусом королівських інженерів, орієнтовану на військово-цивільні проекти. Обидві моделі демонструють принцип повного циклу «від концепції до спроможності» та тісну співпрацю з промисловістю. Спільними пріоритетами обох корпусів є цифрові двійники та автономні платформи з елементами ШІ.**

Попри різницю в організації, обидві системи мають фундаментальні точки дотику, що визначають сучасне обличчя військової інженерії. По-перше, це реалізація концепції подвійного призначення (Dual-use): науковий продукт є критично важливим не лише для фронту, а й для національної інфраструктури, що забезпечує сталість фінансування. По-друге, ключовим пріоритетом є цифровізація та застосування елементів ШІ. По-третє, обидві моделі базуються на безперервному циклі “Lessons Learned”, де бойовий досвід швидко стає науковим завданням для лабораторій та виробництва.

Впровадження технологій, орієнтованих на роботизацію та штучний інтелект, з урахуванням наявних викликів і загроз, про які зазначають вітчизняні дослідники (зокрема, Краснов, Светлічний, Шумлянський, Хоменко [1-5]), забезпечить підвищення рівня взаємосумісності сил і засобів сил оборони України відповідно до стандартів STANAG та вимог Північноатлантичного альянсу (НАТО).

## Висновки та перспективи подальших досліджень.

Досвід Корпусу інженерів армії США та Корпусу королівських інженерів засвідчує, що роботизовані й автономні системи з елементами ІІІ є одним із ключових чинників успішного виконання інженерних завдань за призначенням. Серед принципів, доцільних для імплементації в українському контексті, виокремлюються практична спрямованість сучасного військового машинобудування та реалізація повного життєвого циклу створення спроможностей, що невід’ємно пов’язана з концепцією безперервного вдосконалення. Подальші дослідження мають зосереджуватися на адаптації технологій цифрових двійників і автономних систем (платформ) до національних умов, а також на розробці національних стандартів застосування ІІІ в оборонному секторі, включно з роботизацією та сучасним машинобудуванням.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Шумлянський С. В., Світлічний І. В. Інтелектуалізація воєнного мистецтва: застосування штучного інтелекту Китаєм у військовій сфері та його геополітичні наслідки. *Китаєзнавчі дослідження*. № 3, 2025. С. 42-52. DOI: <https://doi.org/10.51198/chinesest2025.03.42>. URL: <https://chinese-studies.com.ua/index.php/journal/article/view/302/280>.
2. Краснов Р. В., Шумлянський С. В., Світлічний І. В. Використання штучного інтелекту у військовій галузі: ризики та загрози для особового складу. *Human rights and public governance : Scientific monograph*. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2025. 772 с. С. 356-376. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-608-9-19>.
3. Нестеров Д. Ю., Примаченко В. Ф., Хоменко Є. В., Світлічний І. В., Бесараб П. М. Освітня та наукова діяльність як засіб модернізації військової інституції: досвід Корпусу інженерів. *Модернізація вищої освіти України в контексті глобалізації : кол. моногр. Кам'янець-Подільський. Подільський Державний Університет*. Рига, Латвія: Baltija Publishing, 2025. С. 75-84 DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-560-0-35>.
4. Хоменко Є. В., Чеханюк Б. Є., Нестеров Д. Ю., Світлічний І. В. Виклики та перспективи підготовки військових кадрів та організації наукової роботи у Державній спеціальній службі транспорту: досвід Корпусу інженерів армії США. *Можливості України щодо реалізації програми сталого розвитку в умовах повномасштабної збройної агресії : кол. моногр.* Baltija Publishing. м. Рига, Латвія 2025. С. 289-306. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-570-9-17>.
5. Хоменко Є. В., Будз В. П., Костиця С. В., Світлічний І. В. Досвід діяльності Інженерного корпусу армії США (USACE) та можливість його застосування в Україні. *Наука і оборона*, 2025. №4. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2025-31-4-35-42>
6. Cutting-edge drone degree to train military forces of the future unveiled // Gov.uk. 21 January 2026. URL: <https://www.gov.uk/government/news/cutting-edge-drone-degree-to-train-military-forces-of-the-future-unveiled>.
7. Dual-Purpose Military Engineering: Boosting Defence and Building Nations [Електронний ресурс] / George James Consulting. Jul 18, 2025 URL: <https://www.georgejamesconsulting.com/post/dual-purpose-military-engineering-boosting-defence-and-building-nations>.
8. Joint Publication 3-34. Engineer Doctrine for Joint Operations [Електронний ресурс]. 2000. URL: [https://www.bits.de/NRANEU/others/jp-doctrine/jp3\\_34\(2000\).pdf](https://www.bits.de/NRANEU/others/jp-doctrine/jp3_34(2000).pdf).
9. The British Army Review. SPRING 2023 / ISSUE #182 [Електронний ресурс]. URL: [https://www.army.mod.uk/media/22266/bar\\_spr23\\_for-web.pdf](https://www.army.mod.uk/media/22266/bar_spr23_for-web.pdf).
10. Military engineering – the Royal Engineers [Електронний ресурс]. Chatham, United Kingdom. URL: <https://www.ice.org.uk/what-is-civil-engineering/infrastructure-projects/military-engineering-the-royal-engineers>.

11. Strategic Defence Review. 2025 [Електронний ресурс]. URL: <https://military.com/uk/articles/strategic-defence-review-2025-yak-brytaniya-gotuyetsya-do-vijny-majbutnogo/>
12. Joint Doctrine Publication 0-01. UK Defence Doctrine [Електронний ресурс] / DCDC. 2022. 94 p. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-defence-doctrine-jdp-0-01>.

УДК 004.41

**Картамишев Д.О., Семеній В.А.** (Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ–Тернопіль, Україна).

## **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНОМ З РОБОЧИМ МІСЦЕМ МЕНЕДЖЕРА ТА ІНТЕГРОВАНИМИ СТАТИСТИЧНИМИ МОДУЛЯМИ**

**Анотація:** У роботі розглянуто проєкт автоматизованої системи управління інтернет-магазином, спрямованої на підвищення ефективності обробки замовлень та підтримку прийняття управлінських рішень на основі інтегрованої аналітики. Запропоновано архітектуру системи, що поєднує серверну частину на базі Spring Boot і Spring Security із реляційною базою даних PostgreSQL та веб-інтерфейсом, реалізованим за допомогою Thymeleaf, HTML, CSS і JavaScript. Розроблено функціональне робоче місце менеджера, яке забезпечує повний цикл роботи з замовленнями, включаючи їх обробку, зміну статусів, управління каталогом товарів та застосування знижок. Особливу увагу приділено інтеграції статистичних модулів, що відображають ключові показники діяльності інтернет-магазину у вигляді інтерактивних панелей, графіків і діаграм. Реалізовано модулі фінансової аналітики, інвентаризації, продажів і загальної статистики, що дозволяють здійснювати комплексний моніторинг діяльності в режимі реального часу. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та можливість його застосування для підвищення якості управління електронною комерцією.

**Ключові слова:** інтернет-магазин, автоматизація, інформаційна система, аналітика, статистичні модулі, управління, веб-додаток.

**Abstract:** The paper presents the design of an automated online store management system aimed at improving order processing efficiency and supporting managerial decision-making through integrated analytics. The system architecture combines a backend implemented with Spring Boot and Spring Security, a PostgreSQL relational database, and a web interface built using Thymeleaf, HTML, CSS, and JavaScript. A dedicated manager workstation is developed to support the full order lifecycle, including processing, status management, product catalog control, and discount application. Particular attention is paid to integrated statistical modules that visualize key business indicators using dashboards, charts, and diagrams. Financial analytics, inventory monitoring, sales analysis, and general statistics modules are implemented to provide comprehensive real-time monitoring of store performance. The results confirm the effectiveness of the proposed approach and its applicability for improving e-commerce management.

**Keywords:** online store, automation, information system, analytics, statistical modules, management, web application.

## **1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ І ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ.**

Швидкий розвиток електронної комерції зумовлює потребу в інформаційних системах, які забезпечують не лише обробку замовлень, а й підтримку прийняття рішень на основі оперативної аналітики. У більшості невеликих інтернет-магазинів процеси роботи з замовленнями, клієнтами та асортиментом залишаються частково ручними, що призводить до зростання кількості помилок, затримок у обробці та ускладнює контроль ключових показників діяльності. Тому актуальним є створення автоматизованої системи управління інтернет-магазином з інтегрованими статистичними модулями та зручним робочим місцем менеджера, що забезпечує повний цикл супроводу замовлення – від його формування до аналізу результатів виконання.

## **2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ.**

Існуючі платформи електронної комерції здебільшого пропонують типові механізми керування товарами й замовленнями, однак мають обмежені можливості адаптації статистичних панелей під конкретні бізнес-процеси. У наукових роботах з інформаційних систем для торгівлі значна увага приділяється проектуванню баз даних, веб-інтерфейсів та механізмів безпеки, проте питання інтеграції доменно-орієнтованої аналітики безпосередньо в інтерфейс менеджера залишається мало дослідженим. Це обумовлює необхідність розробки рішень, що поєднують класичні підходи побудови веб-систем з інструментами візуального статистичного аналізу, адаптованими до специфіки інтернет-торгівлі.

## **3. ФОРМУЛЮВАННЯ НЕВИРІШЕНИХ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ.**

Мало дослідженими залишаються питання побудови єдиного інтегрованого інтерфейсу для менеджера інтернет-магазину, в якому об'єднано: оперативну роботу із замовленнями, керування асортиментом, аналіз поведінки клієнтів, контроль фінансових показників та стану складу. Відсутня узгоджена методика подання статистичної інформації у вигляді інтерактивних панелей, діаграм та таблиць, що дозволяють одразу переходити до виконання керуючих дій – зміни статусу замовлень, коригування цін або формування замовлення постачальнику.

## **4. ЦІЛІ СТАТТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.**

Метою роботи є розробка автоматизованої системи управління інтернет-магазином з розширеним робочим місцем менеджера, яке забезпечує: реєстрацію та авторизацію користувачів із розмежуванням

ролей (клієнт, менеджер, адміністратор); обробку замовлень, зміну їх статусів та застосування знижок; ведення каталогу товарів і управління ціновою політикою; інтегрований статистичний аналіз діяльності магазину за основними показниками.

Для досягнення мети вирішено такі задачі: обґрунтовано вибір технологічного стеку; спроектовано базу даних та архітектуру системи; реалізовано веб-інтерфейс робочого місця менеджера з візуальними статистичними модулями; перевірено дієздатність рішення на тестових даних.

## 5.ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ.

В основі системи використано стек Spring Boot та Spring Security для реалізації серверної логіки й механізмів аутентифікації та авторизації, PostgreSQL як СУБД, а також Thymeleaf, HTML/CSS/JavaScript для побудови веб-інтерфейсу. База даних містить сутності для користувачів, ролей, товарів, замовлень, позицій замовлень і фінансових операцій, що дозволяє отримувати агреговані показники для статистичних панелей. Структуру системи описано за допомогою UML-діаграм та компонентної архітектури.

Робоче місце менеджера реалізовано у вигляді розширеного веб-інтерфейсу, через який доступний перегляд списку замовлень та деталей кожного замовлення, зміна статусів, застосування знижок і доступ до аналітики за обраними періодами (рис. 1).

 Акаунт

 Замовлення #3

Персональні дані

Зміна пароля

Список усіх замовлень

Статистика

**І** Інформація про клієнта

Ім'я: Ivan

Прізвище: Ivanov

Місто: Київ

Адреса: Хрещатик 1

Email: ivan123@test.com

Номер телефону: 1234567890

Поштовий індекс: 1234567890

**І** Інформація про замовлення

Id замовлення: 3

Дата: 2025-04-08 00:00

Сума замовлення: **€138463.00**

| Id товару | Бренд товару | Назва товару     | Ціна      |
|-----------|--------------|------------------|-----------|
| 5         | ASUS         | ROG Strix G16    | €75650.00 |
| 9         | Sennheiser   | Momentum 4       | €13050.00 |
| 2         | Samsung      | Galaxy S23 Ultra | €49763.00 |

Рисунок 1. Сторінка перегляду та зміни замовлень менеджером

Окрема сторінка «Статистика магазину» є головною аналітичною панеллю системи та надає менеджеру узагальнену картину роботи інтернет-магазину в режимі реального часу. У верхній частині інтерфейсу розміщено блоки з ключовими числовими показниками: сумарний дохід за весь період роботи, загальна кількість замовлень, середній чек та кількість товарів у каталозі. Нижче представлено візуальні діаграми: розподіл товарів за категоріями, розподіл товарів за виробниками та дохід за категоріями, що дозволяє швидко визначити найбільш прибуткові та популярні напрямки асортименту (рис. 2). Окремо виведено графік замовлень за останні 30 днів, який відображає динаміку активності покупців і дає змогу оперативно реагувати на зміни попиту. Навігація між різними розділами статистики реалізована через випадаючий список, що забезпечує зручний перехід до будь-якої іншої аналітичної сторінки без зайвих кроків.

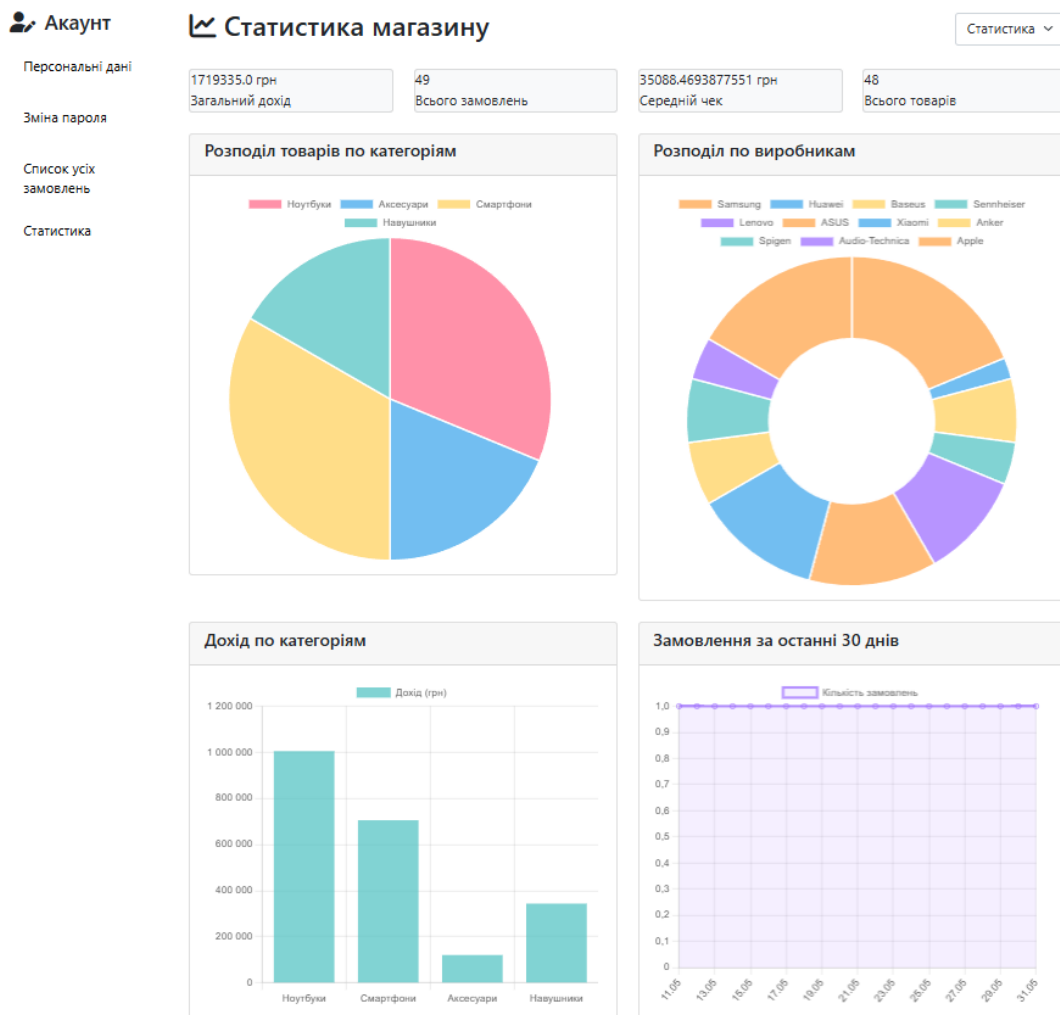


Рисунок 2. Загальна статистика магазину

Сторінка «Фінансова статистика» демонструє загальний дохід, загальні витрати та чистий прибуток за обраний період у вигляді числових значень, що дозволяє менеджеру миттєво оцінити фінансовий стан



магазину. Додатково на сторінці відображається динаміка зміни фінансових показників за останні місяці у вигляді графіку, гістограми та зведеної таблиці, що забезпечує комплексний аналіз тенденцій доходності підприємства (рис. 3). Поєднання числових індикаторів і візуальних засобів представлення даних дає змогу не лише відстежувати поточний стан фінансів, а й виявляти сезонні закономірності та відхилення від очікуваних показників, що є важливою основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

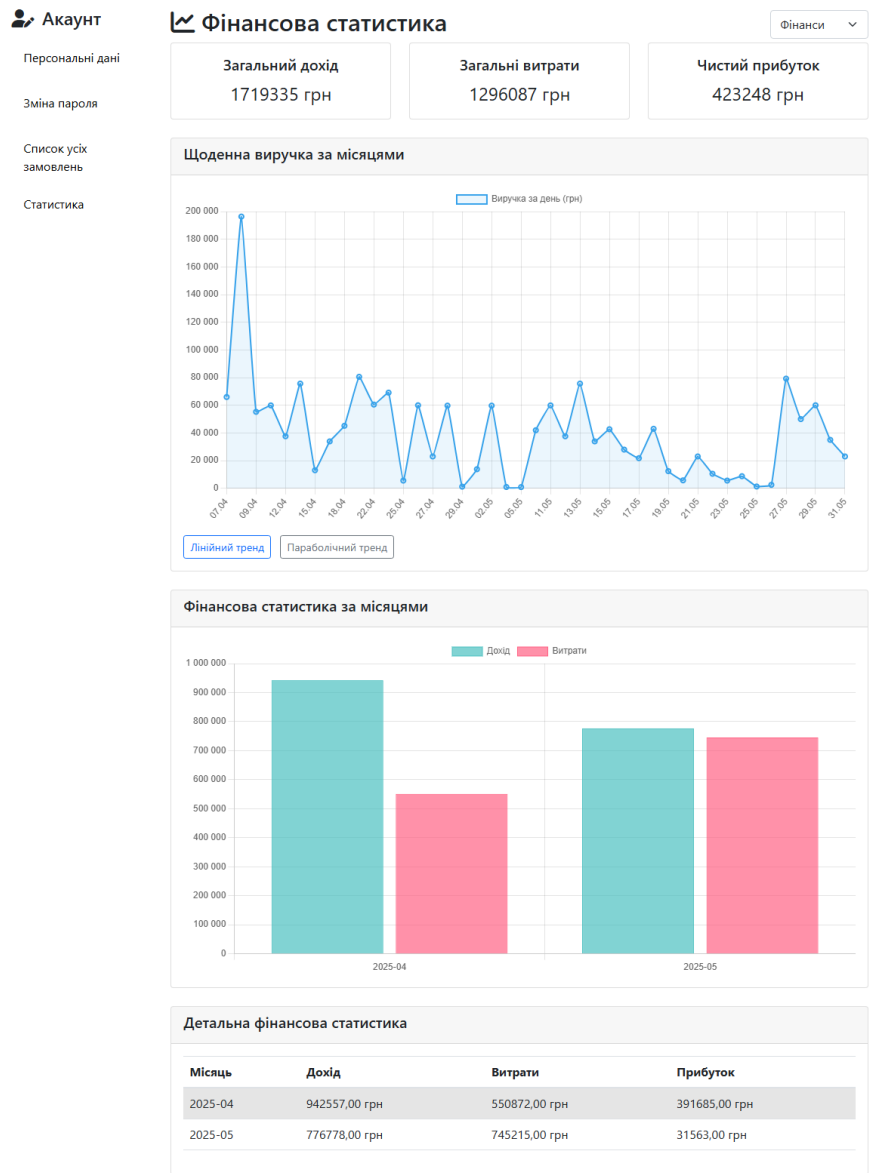


Рисунок 3. Фінансова статистика

Сторінка «Інвентаризація» надає менеджеру повну картину стану складських запасів інтернет-магазину в розрізі категорій товарів. Центральним елементом сторінки є перелік товарів з низьким залишком, який дозволяє оперативно виявляти позиції, що потребують поповнення, та уникати ситуацій дефіциту під час активного попиту. Поряд із цим відображається розподіл залишків товарів за категоріями у вигляді

діаграми, що дає змогу оцінити загальний стан складу та визначити пріоритетні напрямки для закупівлі (рис. 4). Важливою функціональною особливістю сторінки є можливість безпосередньо сформувати замовлення постачальнику натисканням кнопки «Замовити товар», не виходячи з інтерфейсу системи, що суттєво скорочує час на виконання рутинних логістичних операцій.

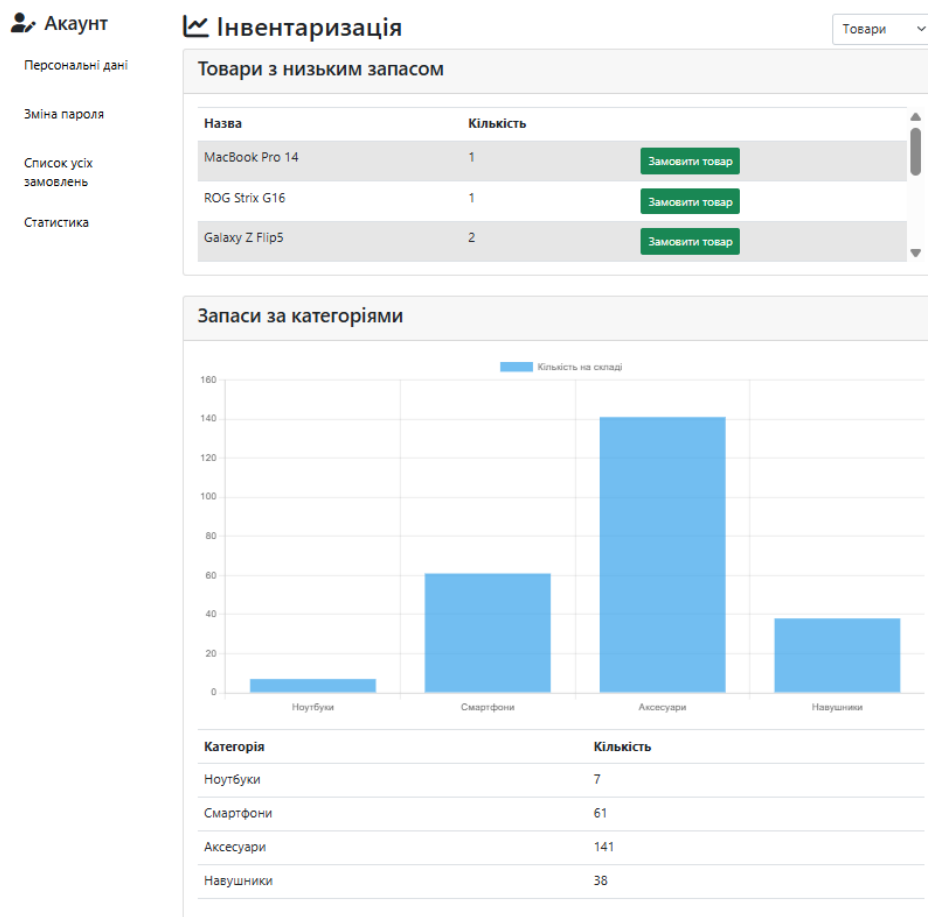


Рисунок 4. Статистика інвентаризації

Сторінка «Продажі» забезпечує детальний аналіз реалізації товарів у розрізі категорій, дозволяючи менеджеру визначити, які групи товарів користуються найбільшим попитом серед покупців (рис. 5). Представлені дані візуалізовано у вигляді діаграм і таблиць, що забезпечує наочне порівняння показників між категоріями та спрощує виявлення слабких позицій асортименту. На основі отриманих даних менеджер може приймати обґрунтовані рішення щодо коригування асортименту та маркетингової стратегії, зокрема додавати або видаляти знижки на товари з найменшим попитом безпосередньо з інтерфейсу сторінки, що виключає необхідність переходу до інших розділів системи.

Сукупність реалізованих статистичних модулів — загальна статистика, фінансова аналітика, інвентаризація, аналіз продажів та клієнтська база формує інтегроване середовище для оперативного моніторингу та комплексного управління діяльністю інтернет-магазину в

режимі реального часу. Кожен модуль є самостійним інструментом аналізу, водночас усі вони логічно пов'язані між собою та доступні через єдиний навігаційний інтерфейс робочого місця менеджера. Така архітектура аналітичної підсистеми суттєво підвищує швидкість і якість прийняття управлінських рішень, мінімізує кількість ручних операцій і забезпечує прозорість усіх ключових процесів інтернет-магазину.

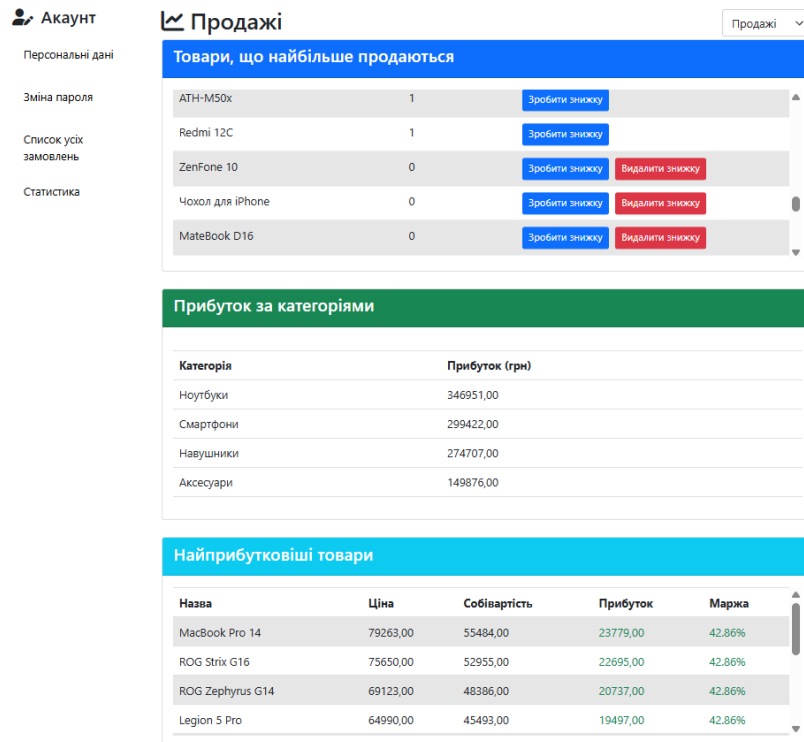


Рисунок 5. Статистика продажів

## 6.ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Розроблена автоматизована система управління інтернет-магазином з інтегрованим робочим місцем менеджера та статистичними модулями забезпечує підвищення ефективності обробки замовлень, зменшення часу на виконання рутинних операцій і покращення якості обслуговування клієнтів. Наявність візуальних панелей для аналізу загальної, фінансової, складської, продажної та клієнтської статистики формує основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері електронної комерції. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження методів машинного навчання для прогнозування попиту, персоналізації рекомендацій клієнтам, оптимізації запасів, а також на інтеграцію системи з зовнішніми сервісами оплати і логістики.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Fowler M. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Boston : Addison-Wesley, 2002. 533 p.
2. Spring Framework Documentation. URL: <https://spring.io/projects/spring-framework> (дата звернення: 31.03.2026).
3. Spring Security Reference. URL: <https://spring.io/projects/spring-security> (дата звернення: 31.03.2026).

4. Програмні засоби аналітичної підтримки обліку продажів інтернет-магазину. Вісник СХУ. 2023. URL: <https://journals.snu.edu.ua/index.php/VisnikSNU/article/view/433> (дата звернення: 31.03.2026).
5. Miah S.J. Impact of Business Analytics and Decision Support Systems on e-Commerce. arXiv preprint. 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2212.00016.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).
6. Ye X., Jonilo M. The application of business intelligence system based on big data in e-commerce data analysis. Journal of Computer Engineering and Intelligent Management. 2024. DOI: <https://doi.org/10.54097/51qmiveqpf>

УДК 621.9.02

**Кінденко М.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСТАТКУВАННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ

**Анотація:** У роботі досліджено функціональні схеми технологічного устаткування для магнітно-імпульсної обробки матеріалів, спрямованої на підвищення експлуатаційних властивостей інструментів. Розглянуто принцип дії установок, що базується на перетворенні електричної енергії, накопиченої у конденсаторі, у змінне магнітне поле високої напруженості. Проаналізовано структуру устаткування, яка включає підготовчий і технологічний вузли, а також основні елементи системи: трансформатор, випрямляч, накопичувач енергії, комутатор і соленоїд. Описано процес формування імпульсного струму та механізм впливу електромагнітного поля на матеріал заготовки, що призводить до зменшення внутрішніх напружень і підвищення фізико-механічних характеристик. Встановлено, що ефективність обробки визначається вибором режимів та параметрів устаткування. Обґрунтовано перспективність застосування магнітно-імпульсної обробки як енергоефективної та безконтактної технології зміцнення інструментів у машинобудуванні.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка, індуктор, імпульсний струм, зміцнення матеріалів, технологічне устаткування, електромагнітне поле.

**Abstract:** The paper investigates functional schemes of technological equipment for magnetic pulse processing aimed at improving the performance properties of tools. The operating principle of installations based on the conversion of electrical energy stored in a capacitor into a high-intensity alternating magnetic field is considered. The structure of the equipment is analyzed, including preparatory and technological units, as well as key system components such as a transformer, rectifier, energy storage unit, switch, and solenoid. The process of pulse current generation and the mechanism of electromagnetic field influence on

*the material, leading to reduced internal stresses and improved physical and mechanical properties, are described. It is established that processing efficiency depends on the correct selection of operating modes and equipment parameters. The перспективність of magnetic pulse processing as an energy-efficient and contactless method for tool strengthening in mechanical engineering is substantiated.*

**Keywords:** magnetic pulse processing, inductor, pulse current, material strengthening, technological equipment, electromagnetic field.

Поліпшення властивостей у феромагнітних деталей, які пройшли магнітно-імпульсну обробку досягається за рахунок спрямованої орієнтації вільних електронів речовини зовнішнім полем, внаслідок чого збільшується тепло- і електропровідність матеріалу. [1].

Застосовуючи магнітно-імпульсну обробку, можна значно зменшити надлишкову енергію матеріалу, пов'язану з концентрацією внутрішніх і поверхневих напружень в конкретній деталі, і знизити до мінімуму ймовірність її поломки [2].

Магнітне зміцнення на основі методу магнітно-імпульсної обробки (МІО) має низку переваг, зокрема: низька собівартість оброблення, збереження геометрії оброблених деталей, відсутність витратних матеріалів, простота технологічного оснащення та екологічна чистота.

Водночас слід зазначити, що ключовим моментом забезпечення ефективності МІО є правильний вибір режимів обробки. Успішне розв'язання задачі отримання потрібних режимів МІО на установках може бути досягнуто шляхом створення відповідного технічного устаткування.

Мета роботи: аналіз функціональних схем технологічного устаткування магнітно-імпульсної обробки.

Технологія магнітно-імпульсної обробки матеріалів заснована на перетворенні електричної енергії, запасеної в накопичувачі, в змінне магнітне поле, під впливом якого відбувається зміцнення матеріалу.

Установки для магнітно-імпульсної обробки включають два основні вузли: підготовчий (накопичення енергії і формування імпульсної напруги і струму) і технологічний. До підготовчого вузла відносяться генератори імпульсних струмів, до технологічного – соленоїд.

Основними елементами установок (рис.1) для магнітно-імпульсної обробки інструментів є: трансформатор для підвищення, високовольний випрямляч, конденсатор або батарея, що складається з таких конденсаторів, комутатор і технологічний блок – соленоїд.

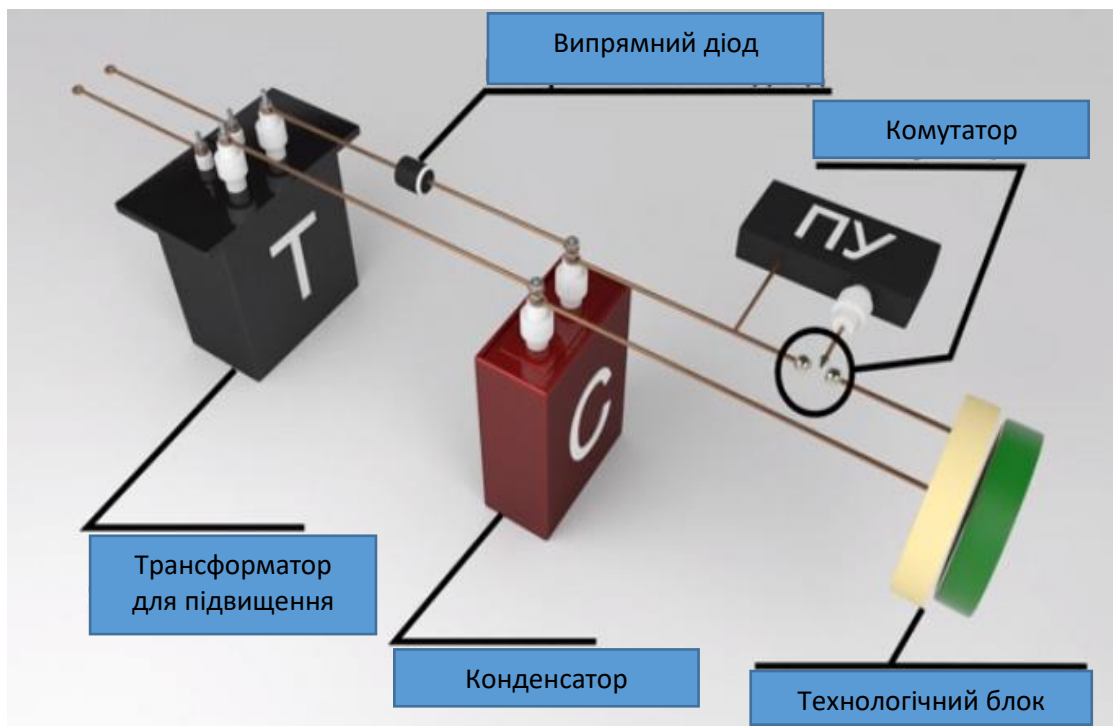


Рисунок 1. Основні елементи установки для магнітно-імпульсної обробки

На першому етапі роботи відбувається накопичення енергії у високовольтному конденсаторі. Відносна низька змінна мережева напруга підвищується, за допомогою трансформатора (рис. 2) до декількох одиниць або десятків кіловольт.

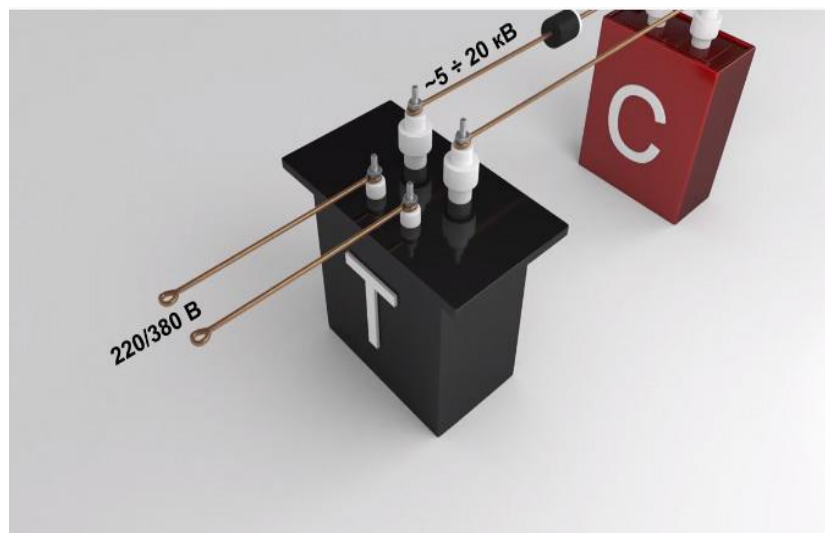


Рисунок 2. Підвищення змінної мережевої напруги за допомогою трансформатора

Ця напруга випрямляється за допомогою діода і заряджає конденсатор (рис. 3) до його робочої напруги.

На другому етапі заряджений конденсатор повинен розрядитися на індуктор. Виникає резонансне питання - як замкнути ланцюг з такою високою напругою? Очевидно, що простий вимикач використовувати не вийде,

напівпровідникові ключі теж сильно обмежені по максимальній напрузі. Для цих цілей використовується спеціальний пристрій - керований розрядник

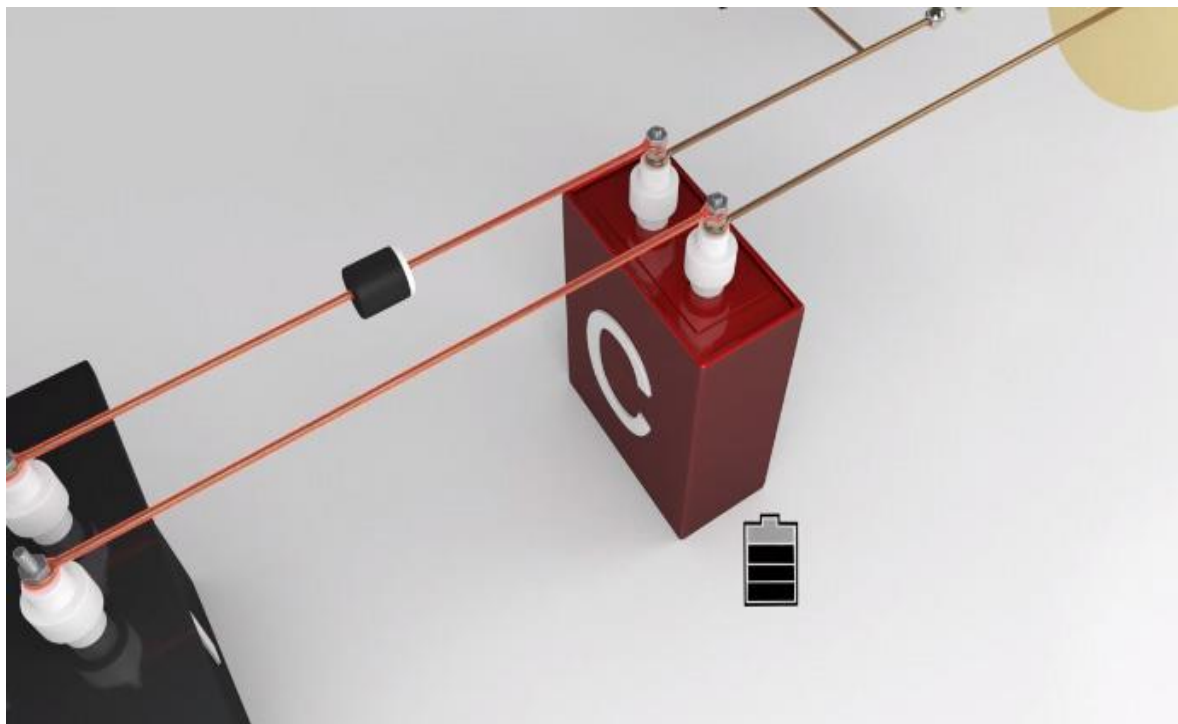


Рисунок 3. Випрямний діод і конденсатор

Він складається ( рис.4) з пари основних електродів і одного керуючого. Відстань між основними електродами налаштовується так, щоб витримувати робочу напругу до якої заряджається конденсатор. Для того, щоб замкнути силовий ланцюг установки, за допомогою пристрою підпалення , подається невеликий імпульс високої напруги до керуючого і одному з основних електродів.

Між ними виникає невелика іскра, яка ініціює пробій проміжку між основними електродами. Виникає провідний канал, який замикає розрядний контур і конденсатор розряджається на індуктор. У момент розряду, по індуктору протікає імпульсний струм, десятки або навіть сотні кілоампер протягом мільйонних доль секунди. Завдяки такому короткому часу розряду миттєва потужність набувати величезних значень. Довкола витків індуктора виникає змінне магнітне поле високої напруженості. У заготівці, яка знаходиться в цьому полі, через закон електромагнітної індукції, виникають вихрові струми. Напрями цих струмів протилежно струму в індукторі.



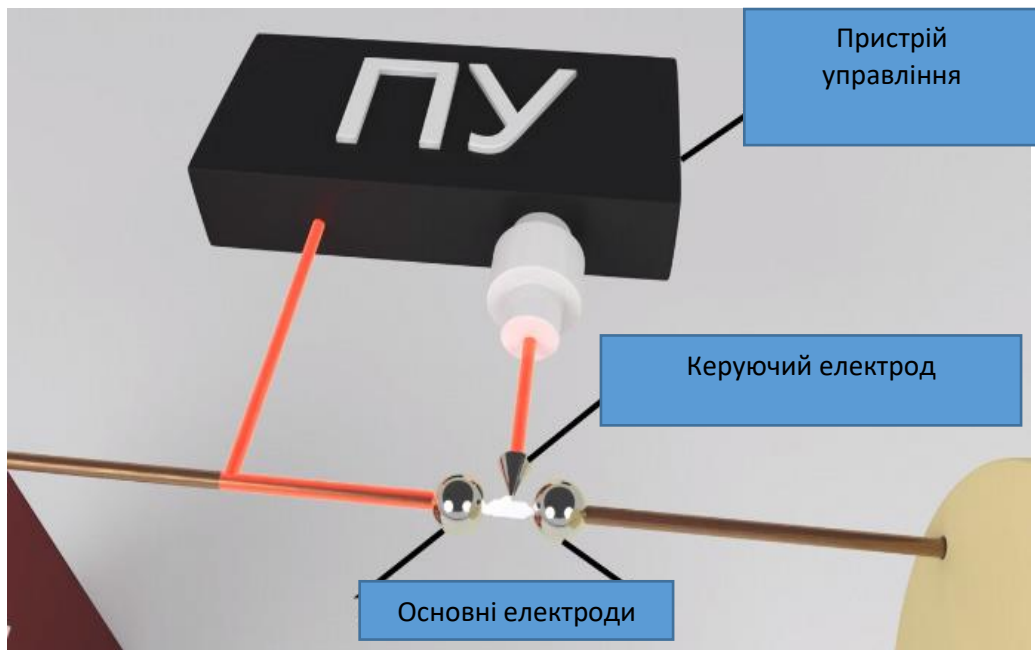


Рисунок 4. Замикання силового ланцюга установки

Магнітно-імпульсна обробка використовується для поліпшення фізико-механічних властивостей матеріалу інструменту, її дія направлена на локальне розігрівання металу. Дія обробки відбувається в місцях концентрації напруги, дефектів кристалічної решітки, наявності сторонніх включень і веде або до виправлення дефекту, або його виштовхуванню.

## ВИСНОВКИ

1. Технічна сторона обробки полягає в різкому включенні високого струму на індукторі, необхідного для розвитку максимального значення частоти імпульсу магнітного поля. Енергія для цих цілей накопичується в конденсаторах.

2. В цієї технології широкі можливості - безпосередня дія на інструмент здійснюється дистанційно, без контакту, що дозволяє зміцнювати інструмент, що має складну форму або структуру.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Кінденко М.І. Вплив режимів магнітної обробки інструменту зі швидкорізальної сталі на його фізико-механічні властивості // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XXI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 16–17 травня 2024 р. Кременчук, КрНУ, 2024. – С. 67-68. <https://doi.org/10.32782/2079-5106.2024.3.2>
2. Кінденко М.І. Дослідження механізму магніострикційного та магнітно-дисперсійного твердіння пробивних пуансонів із швидкорізальної сталі після обробки в імпульсних магнітних полях // Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure. Краматорськ : ДДМА. 2024. 1(53). С. 181–187, [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-\(53\)181](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-(53)181)



**Кінденко М.І.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

**Анотація:** У роботі досліджено підходи до оптимізації управління процесом магнітно-імпульсної обробки інструментів зі швидкорізальних сталей із використанням методів штучного інтелекту. Розглянуто особливості формування експлуатаційних властивостей інструментів під впливом імпульсних магнітних полів та визначено ключові параметри процесу, що впливають на якість обробки. Запропоновано структуру інтелектуальної системи управління, яка поєднує генетичні алгоритми для пошукової оптимізації режимів та нечіткі нейронні мережі для моделювання і прогнозування результатів обробки. Описано механізм адаптивного керування, що враховує параметри матеріалу та геометрії деталі, а також реалізує самонавчання системи на основі накопичених даних. Показано, що застосування інтелектуальних методів дозволяє підвищити точність вибору режимів обробки, скоротити час налаштування технологічного процесу та покращити якість зміцнення інструментів. Обґрунтовано перспективність впровадження інтелектуальних систем у технології магнітно-імпульсної обробки в машинобудуванні.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка, штучний інтелект, генетичні алгоритми, нечіткі нейронні мережі, оптимізація, управління процесами.

**Abstract:** The paper investigates approaches to optimizing the control of magnetic pulse processing of high-speed steel tools using artificial intelligence methods. The formation of operational properties of tools under pulsed magnetic fields is analyzed, and key process parameters affecting processing quality are identified. An intelligent control system structure combining genetic algorithms for search optimization and fuzzy neural networks for modeling and prediction is proposed. The adaptive control mechanism considers material and geometry parameters and implements self-learning based on accumulated data. The application of intelligent methods improves parameter selection accuracy, reduces setup time, and enhances processing quality.

**Keywords:** magnetic pulse processing, artificial intelligence, genetic algorithms, fuzzy neural networks, optimization, process control.

Ефективність працездатності осьового інструмента може бути істотно підвищена в результаті використання технології магнітної обробки інструменту.

Поліпшення властивостей у феромагнітних деталей, які пройшли магнітно-імпульсну обробку досягається за рахунок спрямованої орієнтації вільних електронів речовини зовнішнім полем, внаслідок чого збільшується тепло- і електропровідність матеріалу. Взаємодія імпульсного магнітного поля з деталлю з струмопровідного матеріалу відбувається тим інтенсивніше, чим вище структурна і енергетична неоднорідність речовини [1].

Магнітне зміцнення на основі методу магнітно-імпульсної обробки (МІО) має низку переваг, зокрема: низька собівартість оброблення, збереження геометрії оброблених деталей, відсутність витратних матеріалів, простота технологічного оснащення та екологічна чистота.

Застосовуючи МІО, можна значно зменшити надлишкову енергію матеріалу, пов'язану з концентрацією внутрішніх і поверхневих напружень в конкретній деталі, і знизити до мінімуму ймовірність її поломки.

Водночас слід зазначити, що ключовим моментом забезпечення ефективності МІО є правильний вибір режимів обробки. Вибір режимів є складним технічним завданням, що потребує індивідуального підходу до вирішення для кожної конкретної галузі застосування. Успішне розв'язання задачі вибору режимів МІО може бути досягнуто шляхом створення інтелектуальних систем керування цим процесом.

Нині триває інтенсивний розвиток методів і засобів магнітно-імпульсної обробки (МІО), у зв'язку з чим особливого інтересу набуває проблема математичного моделювання МІО з метою оптимального керування її основними параметрами. Складність керування процесом МІО полягає в тому, що необхідно одночасно здійснювати керування кількома параметрами (напруженістю магнітного поля, числом імпульсів у серії, частотою проходження імпульсів, часом імпульсу в серії, інтервалами між імпульсом у серії, числом серій імпульсів).

Керування МІО доводиться здійснювати на підставі емпіричних залежностей і досвідчених даних, на які істотно впливають матеріал і форма виробу.

У ситуації, що склалася, виникає необхідність створення інтелектуальної системи управління МІО, що дає змогу оптимізувати режими оброблення для конкретних типів і матеріалів оброблюваних виробів.

Наявність апріорно заданих режимів МІО часто призводить до зниження якості обробки, оскільки під час програмування не можуть бути враховані особливості МІО конкретної деталі і розрахунок ведеться за усередненими середньостатистичними даними. Разом з тим, у багатьох випадках оптимальні режими МІО є унікальними для конкретного зразка виробу.

Мета роботи: оскільки ефективність процесу МІО безпосередньо залежить від точності вибору режимів, виникає необхідність розв'язання задачі оптимального управління режимами - сукупності числових значень кількох параметрів, основними з яких є: напруженість магнітного поля, час імпульсу в серії, частота проходження імпульсів, кількість імпульсів у серії, інтервал між імпульсами в серії, кількість серій імпульсів.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що для подолання зазначених недоліків необхідна наявність інтелектуальної

системи управління, що дає змогу оптимізувати процес оброблення кожної деталі, що визначає умови та якість процесу МІО. Управління процесами МІО в інтелектуальній системі управління МІО може бути здійснено за допомогою методів адаптивного управління.

Цій проблемі й присвячені дослідження, проведені в даній роботі.

Доцільність застосування генетичних алгоритмів під час оптимізації режимів МІО обґрунтовано тим, що на практиці складно зафіксувати властивості функціональної залежності вихідних параметрів режимів МІО від вхідних величин, ще складніше зробити аналітичний опис такої залежності. Генетичний метод утворює клас алгоритмів пошукової оптимізації, заснованих на математичному моделюванні біологічних механізмів і процесів у живій природі за допомогою принципів популяційної генетики, що дають змогу знаходити оптимальні або близькі до них (субоптимальні) рішення [2].

Доцільність застосування нечіткої нейромережі в системі управління МІО зумовлена необхідністю класифікації даних, що використовуються під час обробки [3,4]. Ефективно вирішити задачу моделювання та прогнозування результатів МІО. Використовувати апріорну інформацію, здобувати нові знання і бути для користувача логічно прозорими. Значну роль при управлінні процесом МІО має технологія об'єктивізації процесу прийняття рішень. Інформаційна невизначеність і непередбачувані умови зумовлюють раціональність застосування методів теорії нейро-нечітких систем для управління складним процесом МІО. На рисунку 1 представлено узагальнену структурну схему управління МІО, що містить у собі: блок оптимізації параметрів МІО; блок навчання і прогнозування результатів МІО.

Перед початком обробки вводяться параметри оброблюваної деталі - матеріал заготовки і геометричні параметри деталі. Після отримання цих даних комп'ютер визначає потрібну комбінацію параметрів оброблюваної деталі з бази даних (БД). Якщо така інформація знайдена, з бази даних витягають діапазони параметрів режимів оброблення (напруженість магнітного поля  $H$ , числом імпульсів у серії  $n$ , часом імпульсу в серії  $\tau$ , інтервалом між імпульсом у серії  $t$ , числом серій імпульсів  $\Theta$ ). Якщо інформація не знайдена, проводиться пошук деталі з максимально близькими параметрами.

Після того, як визначено діапазон параметрів режимів обробки, він оптимізується за допомогою генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм оперує сукупністю параметрів режимів МІО ( $H$ ,  $n$ ,  $\tau$ ,  $t$ ,  $\Theta$ ), за яких після МІО деталей певного матеріалу і геометрії, отримують задану твердість поверхні.

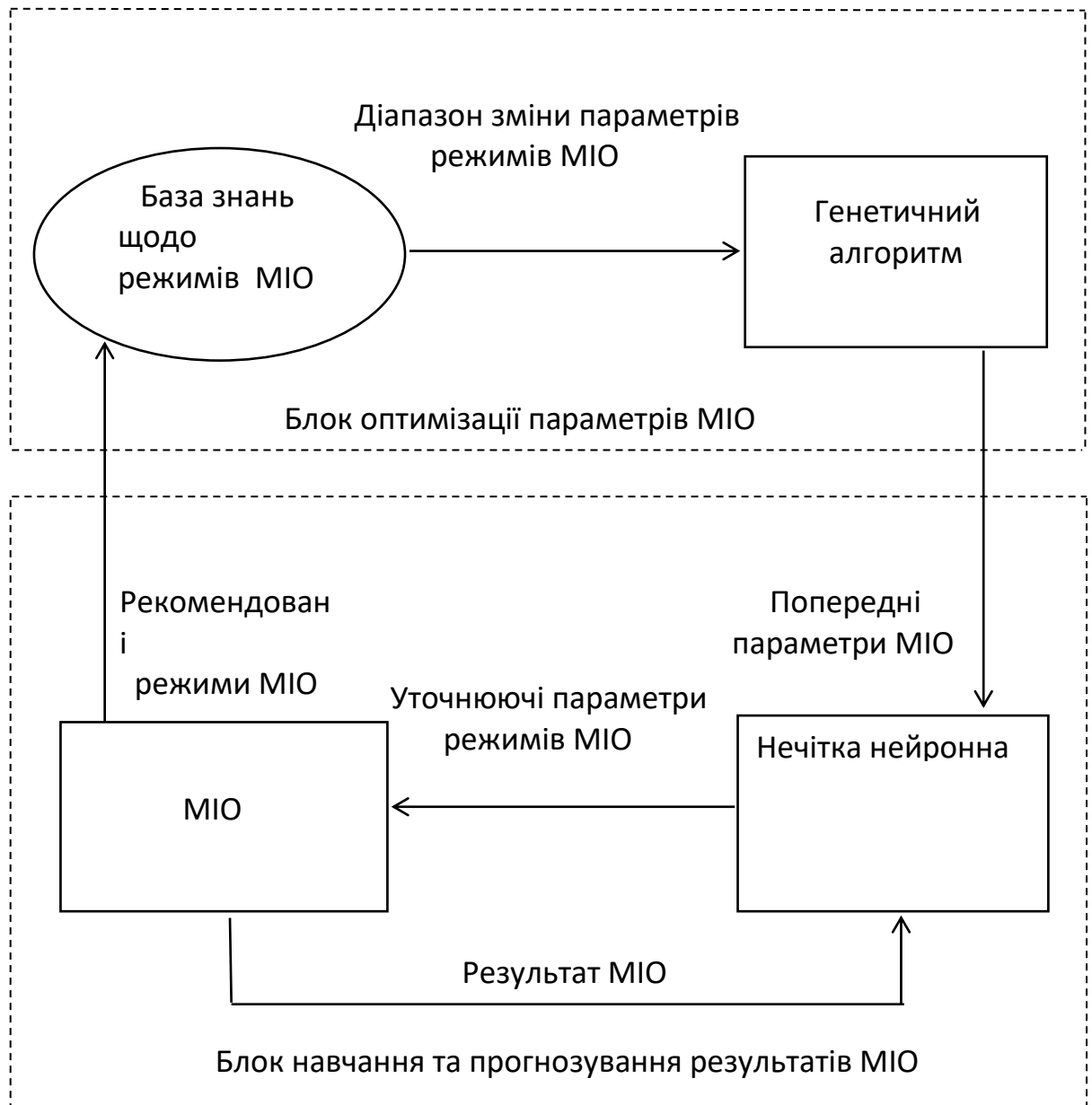


Рисунок 1. Узагальнена структурна схема управління МІО

Після того, як визначено параметри режимів обробки, вони подаються через нечітку нейронну мережу. Параметри режимів МІО проходять чотири блоки системи нечіткого логічного виведення:

- блок фазифікації, що перетворює чисельні параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ );
- база даних, що містить набір нечітких правил щодо зміни режимів оброблення;
- блок ухвалення рішень, що здійснює операції виведення на підставі наявних правил;
- блок дефазифікації, що перетворює результати виведення в чисельні значення параметрів режимів МІО ( $H, n, \tau, t, \Theta$ ).

Уточнені параметри подаються на модуль керування соленоїдом, після чого здійснюється процес МІО. Після обробки проводиться оцінка продуктивності, і якщо отриманий результат не задовольняє заявленому, результати обробки відправляються на навчання нечіткої нейромережі. Під час навчання нечіткої нейронної мережі відбувається зміна параметрів режимів обробки, і змінені режими подаються на МІО. Цикл повторюється, до отримання необхідних результатів, після чого режими обробки записуються в базу даних і базу даних нечіткої нейромережі.

Установка з інтелектуальною системою управління (рис. 2) функціонує наступним чином: у робочу порожнину соленоїда (6) розміщують деталь (7), що підлягає МІО.

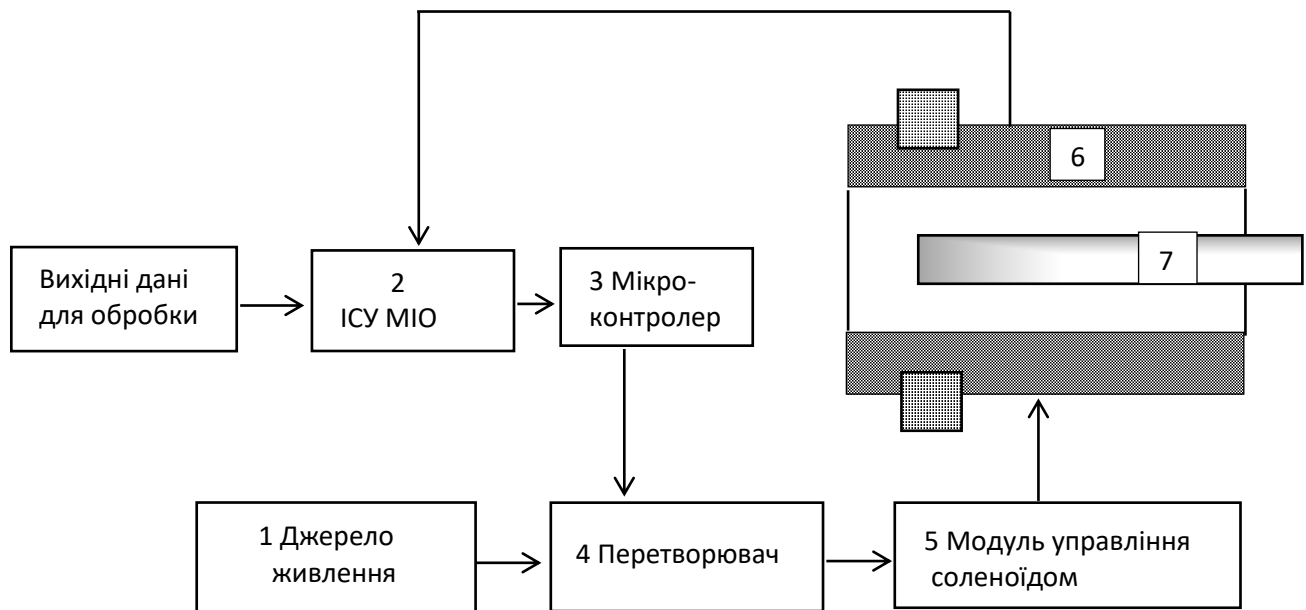


Рисунок 2. Функціональна схема установки з інтелектуальною системою управління МІО

Оператор вводить дані про оброблювану деталь у базу даних інтелектуальної системи управління МІО (2). Отримана інформація обробляється системою управління (2), яка за отриманими даними задає параметри режимів обробки. Після цього сигнал подається на мікроконтролер (3), через перетворювач (4) і модуль управління соленоїдом (5). У соленоїді виникає магнітний потік, який концентрується на виробі.

Розроблена система має такі можливості:

1. Вибір параметрів режимів МІО під конкретний виріб з використанням інформації щодо початкових режимів оброблення, що містяться в базі даних системи.
2. Уточнення оптимальних режимів МІО з використанням нечіткої нейронної мережі.
3. Збереження результатів обробки конкретних виробів у базі даних і реалізація механізму самонавчання.

Програмну реалізацію алгоритму функціонування ІСУ МІО можна здійснити за допомогою інструментальних засобів пакета прикладних програм MATLAB 7 - Genetic Algorithm Tool (пакет генетичні алгоритми) і Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечіткої логіки).

## ВИСНОВКИ

1. Застосування інтелектуальної системи управління МІО дасть змогу змінювати параметри режимів обробки залежно від матеріалу і геометрії оброблюваного виробу. Це дасть змогу швидко переналаштовуватися на обробку виробів різних типів і матеріалів.

2. Застосування нечітких нейронних мереж в управлінні дасть змогу точно оптимізувати параметри режимів МІО для конкретного типу інструменту або виробу.

3 Застосування запропонованого підходу до управління МІО дасть змогу скоротити час на обробку виробів, підвищити якість МІО і скоротити витрату електроенергії, що витрачається на процес МІО.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Кінденко М.І. Вплив режимів магнітної обробки інструменту зі швидкорізальної сталі на його фізико-механічні властивості // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XXI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 16–17 травня 2024 р. Кременчук, КрНУ, 2024. – С. 67-68. <https://doi.org/10.32782/2079-5106.2024.3.2>

2. Інтелектуальні системи автоматизації : монографія / О.Г. Аврунін, С.І. Владов, М.В. Петченко, В.В. Семенець, В.В. Татарінов, Г.В. Тельнова, В.О. Філатов, Ю.М. Шмельов, Н.О. Шушляпіна – Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2021. – 322 с.

3. Субботін С.О. Нейронні мережі. Навчальний посібник /С.О. Субботін - Запоріжжя : ЗНТУ, 2014.132 с.

4. Нестеренко О.В., Савенков О.І., Фаловський О.О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: навч. посібн. / за ред. П.І. Бідюка. Київ: Національна академія управління. 2016. 188 с.

УДК 519.7

**Ковалевський С.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна)

## ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЕМЕРДЖЕНТНИХ ПЕРЕХОДІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

**Анотація:** У статті запропоновано строгу математичну формалізацію емерджентних переходів у контексті цифрових двійників виробничих систем. Введено формальне означення емерджентної макровластивості через нерозкладний

функціонал, визначено поняття емерджентного переходу як моменту розриву класу поведінки системи. Сформульовано спектральний критерій виявлення біфуркаційних порогів на основі аналізу якобіану лінеаризованої динаміки. Визначено умову емерджентно-узгодженості цифрового двійника та доведено необхідну умову точного виявлення переходу моделлю. Як розширення запропоновано інформаційний критерій через спектральну ентропію, що інтегрує теорію нелінійної динаміки з теорією інформації. Отримані результати формують математичну основу для розробки прогностичних систем технічного обслуговування нового покоління.

**Ключові слова:** цифровий двійник; емерджентність; біфуркація; нелінійна динаміка; спектральний критерій; прогностичне технічне обслуговування; функціонал стану.

**Abstract:** This paper proposes a rigorous mathematical formalization of emergent transitions in the context of digital twins for manufacturing systems. A formal definition of emergent macroproperty is introduced through a non-decomposable functional, and the concept of emergent transition is defined as a moment of discontinuity in the system's behavioral class. A spectral criterion for detecting bifurcation thresholds is formulated based on the analysis of the Jacobian of the linearized dynamics. The condition of emergent consistency for a digital twin is defined, and the necessary condition for accurate detection of the transition by the model is proven. As an extension, an information-theoretic criterion based on spectral entropy is proposed, integrating nonlinear dynamics theory with information theory. The obtained results establish a mathematical foundation for next-generation predictive maintenance systems.

**Keywords:** digital twin; emergence; bifurcation; nonlinear dynamics; spectral criterion; predictive maintenance; state functional.

## 1. ВСТУП

Концепція цифрового двійника (Digital Twin, DT) набуває дедалі більшого значення у сфері інтелектуального виробництва, предиктивної діагностики та управління складними кіберфізичними системами [1, 2]. Цифровий двійник є динамічною цифровою копією фізичного об'єкта, здатною відображати його поточний стан, прогнозувати поведінку та оптимізувати процеси в реальному часі [3].

Водночас одним із ключових викликів у побудові адекватних двійників є проблема виявлення та відтворення так званих емерджентних переходів — різких якісних змін у поведінці системи, які не можуть бути передбачені лише на основі аналізу локальних характеристик [4]. Такі переходи спостерігаються у промислових установках у вигляді стрибків вібраційного спектра, раптових змін зносу вузлів або переходів у нестійкі режими роботи.

Незважаючи на значний прогрес у галузі машинного навчання та аналізу часових рядів, математична основа для формального опису емерджентності у цифрових двійниках залишається недостатньо розробленою. Більшість існуючих підходів або оперують нечіткими визначеннями, або обмежуються евристичними порогоми [5, 6].

Метою цієї роботи є розробка суворої математичної формалізації емерджентних переходів у рамках теорії цифрових двійників, включаючи

означення відповідних функціоналів, спектральний критерій виявлення та теорему про необхідну умову коректного відтворення переходу моделлю. Результати можуть бути використані при проектуванні систем предиктивного технічного обслуговування та верифікації цифрових двійників складних виробничих систем.

## 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Теорія цифрових двійників була систематизована у роботах Grieves та Vickers [1], де цифровий двійник розглядається як тривимірна модель, що включає фізичний об'єкт, його цифрове відображення та потоки даних між ними. У контексті Industry 4.0 цей підхід набув широкого поширення [2, 3].

Математичний апарат теорії біфуркацій, закладений у працях Гуккенгеймера та Голмса [7], забезпечує строгу мову для опису якісних змін у динаміці нелінійних систем. Спектральні критерії стійкості, засновані на аналізі власних чисел матриці Якобі, широко застосовуються в теорії управління [8].

Концепція емерджентності традиційно досліджується у контексті теорії складних систем [9, 10]. Проте формалізація емерджентності через функціональний аналіз у застосуванні до цифрових двійників залишається малодослідженою. Окремі спроби пов'язати нелінійну динаміку з теорією інформації для виявлення критичних переходів зроблено у [11, 12], де ентропійні міри використовуються як індикатори наближення до точок біфуркації.

Таким чином, у літературі відсутнє єдине математично строге визначення емерджентного переходу, застосовне у контексті цифрових двійників, що й становить мотивацію цього дослідження.

## 3. ФОРМАЛЬНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

### 3.1. Фізична система

Нехай реальна виробнича система описується нелінійною динамікою вигляду:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \theta(t)), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

де  $x$  — вектор стану системи розмірності  $n$ ,  $u$  — вектор керуючих впливів,  $\theta(t)$  — вектор параметрів деградації або структурної еволюції, що можуть змінюватися у часі. Функція  $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$  є гладкою нелінійною відображенням, що задає динаміку стану.

### 3.2. Цифровий двійник

Цифровий двійник визначимо як упорядковану пару:

$$D = (\hat{f}, I) \quad (2)$$

де  $\hat{f}$  — модель динаміки стану,  $I : x \mapsto \hat{x}$  — оператор ідентифікації, що відображає вимірний стан фізичної системи в оцінку стану моделі. Динаміка двійника описується рівнянням:

$$\hat{x}(t) = \hat{f}(\hat{x}(t), u(t), \theta(t)) \quad (3)$$



Адекватність двійника визначається умовою рівномірного наближення у нормі:

$$\|x(t) - \hat{x}(t)\| < \varepsilon \quad (4)$$

для деякого заданого рівня точності  $\varepsilon > 0$ .

## 4. ОЗНАЧЕННЯ ЕМЕРДЖЕНТНОСТІ

### 4.1. Емерджентна макровластивість

**Означення 1 (Емерджентна макровластивість).** Функціонал  $\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  називається емерджентним відносно декомпозиції  $\{x_1, \dots, x_n\}$ , якщо:

$$\Phi(x) \neq \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_i) \quad (5)$$

для будь-якого набору локальних функцій  $\{\varphi_i\}$ . Іншими словами, макровластивість системи є нередукованою до суми незалежних вкладів компонент.

У виробничому контексті емерджентними макровластивостями можуть виступати: раптові зміни вібраційного спектра вузлів машин, нелінійні стрибки інтенсивності зносу контактних поверхонь, колективні нестійкості у розподілених теплових полях.

### 4.2. Емерджентний перехід

**Означення 2 (Емерджентний перехід).** Момент часу  $t^*$  називається емерджентним переходом для системи (1) відносно функціоналу  $\Phi$ , якщо:

$$\lim_{t \rightarrow t^{*-}} \Phi(x(t)) \neq \lim_{t \rightarrow t^{*+}} \Phi(x(t)) \quad (6)$$

тобто ліво- та правостороннє граничне значення макровластивості в точці  $t^*$  не співпадають. Це означає, що в момент  $t^*$  система змінює клас своєї поведінки — відбувається якісна зміна динаміки, нередукована до плавної еволюції.

Ключова відмінність від звичайної нестійкості полягає у тому, що емерджентний перехід передбачає зміну не лише кількісних характеристик, а й структури самої динаміки системи.

## 5. СПЕКТРАЛЬНИЙ КРИТЕРІЙ ВИЯВЛЕННЯ

Розглянемо матрицю Якобі лінеаризованої динаміки системи (1):

$$A(t) = \partial f / \partial x|_{x(t)} \quad (7)$$

Спектральні властивості матриці  $A(t)$  визначають локальну стійкість системи поблизу поточної траєкторії. Сформулюємо критерій у термінах власних чисел.

**Теорема 1 (Спектральний критерій біфуркації).** Система (1) проходить через біфуркаційний поріг у момент  $t^*$ , якщо існує власне число  $\lambda_i$  матриці  $A(t^*)$  таке, що:

$$\exists \lambda_i : \operatorname{Re}(\lambda_i(A(t^*))) = 0 \quad (8)$$

і при цьому:

$$d/dt \operatorname{Re}(\lambda_i(A(t)))|_{t=t^*} \neq 0 \quad (9)$$

Умова (8) означає, що в момент  $t^*$  одне або кілька власних чисел матриці Якобі перетинають уявну вісь, а умова (9) гарантує, що це перетин є нетривіальним, тобто система не повертається до попереднього режиму.

Зауважимо, що спектральна біфуркація є необхідною, але не достатньою умовою емерджентного переходу. Для повного означення останнього необхідно також перевірити умову (6) для відповідного функціоналу  $\Phi$ .

## 6. ЕМЕРДЖЕНТНО-УЗГОДЖЕНИЙ ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК

Введемо оператор структурної різниці між фізичною системою та її цифровим двійником:

$$\Delta\Phi(t) = |\Phi(x(t)) - \Phi(\hat{x}(t))| \quad (10)$$

**Означення 3 (Емерджентно-узгоджений цифровий двійник).** Цифровий двійник  $D$  називається *емерджентно-узгодженим* відносно функціоналу  $\Phi$ , якщо:

$$\Delta\Phi(t^*) \rightarrow 0 \quad (11)$$

у кожній точці емерджентного переходу  $t^*$ .

Якщо умова (11) не виконується, то цифровий двійник втрачає структурний клас поведінки у критичній точці, тобто є структурно неадекватним, незважаючи на можливу малість  $\|x - \hat{x}\|$  у звичайній нормі (умова (4)). Це підкреслює принципову недостатність звичайної метрики наближення для оцінки якості двійника поблизу емерджентних переходів.

## 7. ОСНОВНА ТЕОРЕМА

**Теорема 2 (Необхідна умова виявлення емерджентного переходу).** Нехай виконуються такі умови:

- (а) - система (1) проходить через спектральну біфуркацію у момент  $t^*$  (умови (8)–(9));
- (б) - існує емерджентний функціонал  $\Phi$  такий, що  $t^*$  є емерджентним переходом (умова (6));
- (с) - цифровий двійник є локально лінійно узгодженим:  $\|\hat{A}(t) - A(t)\| < \delta$  для деякого  $\delta > 0$ .

Тоді для достатньо малого  $\delta$  момент переходу, виявлений двійником, збігається з реальним:

$$t^*_{\text{model}} \rightarrow t^* \quad \text{при } \delta \rightarrow 0 \quad (12)$$

**Доведення (схема).**

Оскільки власні числа матриці є неперервними функціями її елементів (теорема про неперервну залежність власних чисел [8]), умова (с) гарантує:

$$|\operatorname{Re}(\lambda_i(\hat{A}(t))) - \operatorname{Re}(\lambda_i(A(t)))| \leq C \cdot \delta \quad (13)$$

для деякої константи  $C > 0$  та для всіх  $t$ . Отже, спектральний перетин уявної осі для матриці двійника  $\hat{A}$  відбувається при  $t$ , відхиленому від  $t^*$  не більш ніж на  $O(\delta)$ . З умов (а)–(б) та означення (11) випливає (12).  $\square$

## 8. РОЗШИРЕННЯ: ІНФОРМАЦІЙНИЙ КРИТЕРІЙ

Для практичного виявлення емерджентних переходів у реальних виробничих системах пропонується доповнити спектральний критерій інформаційним підходом. Введемо спектральну ентропію сигналу як міру розсіювання спектральної потужності:

$$H(t) = -\sum_i p_i(t) \log p_i(t) \quad (14)$$

де  $p_i(t)$  — нормовані спектральні густини потужності сигналу стану системи. Значення  $H(t)$  відображає ступінь «невизначеності» або «складності» спектрального складу динаміки.

Зв'язок з емерджентним переходом виражається через поведінку похідної ентропії в точці  $t^*$ :

$$dH/dt|_{t=t^*} \rightarrow \infty \quad \text{або} \quad \max_{t \in [t^*-\varepsilon, t^*+\varepsilon]} H(t) \text{ досягається при } t = t^* \quad (15)$$

Умова (15) встановлює, що емерджентний перехід супроводжується або різким зростанням спектральної ентропії, або досягненням її локального максимуму, що пов'язано з перерозподілом енергії між спектральними компонентами в точці зміни динамічного класу.

Цей підхід дозволяє інтегрувати теорію нелінійної динаміки з теорією інформації, відкриваючи шлях до практичного застосування у системах реального часу на основі аналізу сигналів датчиків без явного обчислення матриці Якобі.

## 9. ОБГОВОРЕННЯ

Запропонована формалізація вирізняється кількома ключовими особливостями. По-перше, емерджентність введена не через філософські міркування, а через точне математичне означення нерозкладного функціоналу (Означення 1), що дозволяє операційно перевіряти наявність цієї властивості. По-друге, перехід між класами поведінки формалізовано через умову розриву граничних значень макровластивості (Означення 2), що строго відрізняє емерджентні переходи від плавних нестійкостей.

Критерій емерджентно-узгодженості (Означення 3) вводить новий стандарт адекватності цифрових двійників: навіть при малій абсолютній помилці відтворення стану двійник може бути структурно неадекватним, якщо він не відтворює якісну зміну поведінки системи в точці переходу. Це принципово важливо для застосувань у предиктивному технічному обслуговуванні.

Теорема 2 встановлює конструктивний зв'язок між якістю локальної лінійної апроксимації двійника та точністю виявлення моменту переходу, забезпечуючи теоретичну основу для параметричної верифікації моделей.

Обмеженням запропонованого підходу є необхідність вибору конкретного функціоналу  $\Phi$  для конкретної системи. В загальному випадку задача ідентифікації найбільш інформативного емерджентного функціоналу може потребувати застосування методів машинного навчання або топологічного аналізу даних.

## ВИСНОВКИ

У роботі розроблено математично строгий апарат для опису емерджентних переходів у цифрових двійниках виробничих систем. Основні результати:

1. Введено означення емерджентного функціоналу та емерджентного переходу, що базуються на умові нерозкладності макровластивості та розриву її граничних значень.
2. Сформульовано спектральний критерій виявлення біфуркаційного порогу через умови на власні числа матриці Якобі.
3. Визначено поняття емерджентно-узгодженого цифрового двійника, що встановлює новий, більш строгий стандарт адекватності моделі поблизу критичних точок.
4. Доведено теорему про необхідну умову точного виявлення переходу, що пов'язує якість лінійної апроксимації двійника з точністю прогнозу.
5. Запропоновано інформаційне розширення через спектральну ентропію, що відкриває шлях до практичної реалізації без явного обчислення матриці Якобі.

Отримані результати формують теоретичну основу для верифікації та сертифікації цифрових двійників у застосуваннях предиктивного технічного обслуговування, а також для розробки критеріїв надійності систем управління на основі моделей.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Grieves M., Vickers J. *Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems* / M. Grieves, J. Vickers // *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. – Cham : Springer, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
2. Tao F. *Digital twin in industry: state-of-the-art* / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15, iss. 4. – P. 2405–2415. – DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
3. Rasheed A. *Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective* / A. Rasheed, O. San, T. Kvamsdal // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 21980–22012. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
4. Bar-Yam Y. *A mathematical theory of strong emergence using multiscale variety* / Y. Bar-Yam // *Complexity*. – 2004. – Vol. 9, iss. 6. – P. 15–24. – DOI: 10.1002/cplx.20029.pdodds.w3.uvm+1
5. Voit E. O. *The inner workings of life: vignettes in systems biology* / E. O. Voit. – Cambridge : Cambridge University Press, 2017. – 200 p.
6. Kusiak A. *Convolutional and generative adversarial neural networks in manufacturing* / A. Kusiak // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58, iss. 5. – P. 1594–1604. – DOI: 10.1080/00207543.2019.1662133.
7. Guckenheimer J. *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcations of vector fields* / J. Guckenheimer, P. Holmes. – New York : Springer-Verlag, 1983. – 453 p. – (Applied Mathematical Sciences ; vol. 42). – ISBN 0-387-90819-6.
8. Khalil H. K. *Nonlinear systems* / H. K. Khalil. – 3rd ed. – Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 2002. – 750 p. – ISBN 978-0130673893.
9. Holland J. H. *Emergence: from chaos to order* / J. H. Holland. – Reading, Mass. : Perseus Books, 1998. – 256 p. – ISBN 978-0738201429.
10. Camazine S. *Self-organization in biological systems* / S. Camazine et al. – Princeton : Princeton University Press, 2001. – 384 p. – ISBN 978-0691116242.

11. Scheffer M. Early-warning signals for critical transitions / M. Scheffer et al. // Nature. – 2009. – Vol. 461. – P. 53–59. – DOI: 10.1038/nature08227.
12. Dakos V. Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data / V. Dakos et al. // PLOS ONE. – 2012. – Vol. 7, iss. 7. – Article e41010. – DOI: 10.1371/journal.pone.0041010.

УДК 621.891:620.178.16

**Ковалевський С.В.<sup>1</sup>, Гливиий В.М.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна; <sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна)

## **ВПЛИВ ТОНКОГО ШАРУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ТА НАНОАМПЛІТУДНИХ ВІБРАЦІЙ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Анотація.** У роботі досліджено механізми впливу поєднання тонкого адсорбційного шару поверхнево-активних речовин та наноамплітудних вібрацій на трибологічні характеристики робочих поверхонь деталей машин. Розглянуто фізичні процеси, що відбуваються у контактній зоні, включаючи орієнтацію молекул ПАР, зміну реальної площі контакту та активацію трибохімічних реакцій. Розроблено математичну модель динамічного контакту з урахуванням гармонічних коливань зазору та сил тертя. Проведено оцінку впливу параметрів вібрацій на коефіцієнт тертя та встановлено експоненційну залежність цього параметра від динамічних характеристик системи. Показано, що при амплітуді коливань порядку десятків нанометрів та високочастотному збудженні можливе суттєве зниження сил тертя. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні вузлів тертя машин, підвищенні їх енергоефективності та довговічності, а також при створенні активних трибологічних систем з керованими властивостями поверхні.

**Ключові слова:** поверхнево-активні речовини; наноамплітудні вібрації; трибологія; коефіцієнт тертя; адсорбційний шар; зносостійкість; деталі машин.

**Abstract:** This paper investigates the mechanisms of the combined influence of a thin adsorption layer of surfactants and nano-amplitude vibrations on the tribological characteristics of working surfaces of machine parts. The physical processes occurring in the contact zone are analyzed, including molecular orientation of surfactants, variation of real contact area, and activation of tribochemical reactions. A mathematical model of dynamic contact is developed, taking into account harmonic oscillations of the gap and friction forces. The influence of vibration parameters on the friction coefficient is evaluated, and an exponential relationship between friction and dynamic system parameters is established. It is shown that at vibration amplitudes on the order of tens of nanometers and high-frequency excitation, a significant reduction in friction forces can be achieved. The obtained results can be applied in the design of friction units, improvement of energy efficiency and durability of machines, and development of active tribological systems with controlled surface properties.

**Keywords:** surfactants; nano-amplitude vibrations; tribology; friction coefficient; adsorption layer; wear resistance; machine parts.

## Вступ.

Проблема зменшення тертя та зносу є однією з ключових у сучасному машинобудуванні. Втрати енергії через тертя у механічних системах становлять значну частину загальних енергетичних витрат промисловості [1, 2]. Тому пошук нових методів керування трибологічними властивостями контактних поверхонь є важливим науковим і практичним завданням.

Одним із перспективних напрямів є використання поверхнево-активних речовин (ПАР), які утворюють на поверхні металу молекулярні адсорбційні шари товщиною порядку кількох десятків нанометрів [3]. Полярна частина молекули ПАР взаємодіє з поверхнею металу, тоді як неполярна частина орієнтується назовні, формуючи шар зі зниженою поверхневою енергією, що призводить до зменшення сил адгезії та зниження коефіцієнта тертя [4]. Додатково перспективним є використання механічних коливань малої амплітуди, які впливають на структуру контактної зони та механізми тертя [5, 6].

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу поєднання поверхнево-активного шару та наноамплітудних вібрацій на трибологічні характеристики поверхні деталей машин.

## Результати дослідження.

Дослідження показало, що поєднання шару ПАР та наноамплітудних коливань може призводити до декількох взаємопов'язаних фізичних ефектів: орієнтації молекул ПАР у напрямку ковзання; періодичного зменшення контактної площі мікронерівностей; активації трибохімічних процесів на поверхні металу; формування стабільної захисної трибоплівки [7]. В результаті відбувається перехід контактної зони у режим часткового мікросковзання, що сприяє суттєвому зниженню сил тертя.

Динамічний зазор між поверхнями описується рівнянням  $h(t) = h_0 + A \sin(\omega t)$ , де  $h_0$  — середній зазор,  $A$  — амплітуда коливань,  $\omega$  — кутова частота. Для опису динаміки контактної системи використано рівняння коливального руху  $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_t$ , де  $m$  — приведена маса системи,  $c$  — коефіцієнт демпфування,  $k$  — жорсткість контакту,  $F_t$  — сила тертя [8].

Коефіцієнт тертя залежить від параметрів коливань і може бути представлений у вигляді:  $\mu = \mu_0 \cdot e^{(-\gamma A \omega)}$ , де  $\mu_0$  — коефіцієнт тертя без вібрацій,  $\gamma$  — коефіцієнт чутливості трибологічної системи. Для типових параметрів системи ( $A \approx 30$  нм,  $f \approx 50$  кГц) динамічний параметр  $A\omega \approx 0,009$  м/с. За таких умов коефіцієнт тертя знижується з  $\mu \approx 0,10$  до  $\mu \approx 0,04$ – $0,05$ , тобто приблизно у 2–3 рази.

Використання даного підходу потенційно дозволяє: зменшити коефіцієнт тертя на 40–70 %; підвищити зносостійкість поверхонь; знизити температуру у зоні контакту; стабілізувати мікрогеометрію поверхні. Запропонований метод є перспективним для застосування у вузлах

підшипників ковзання, зубчастих передачах, напрямних верстатів, кулачкових механізмів та двигунів внутрішнього згоряння.

## Висновки.

У результаті теоретичного дослідження встановлено, що поєднання тонкого шару поверхнево-активної речовини та наноамплітудних вібрацій суттєво впливає на трибологічні характеристики робочих поверхонь деталей машин. Основними механізмами цього впливу є: формування впорядкованого адсорбційного шару ПАР, зменшення реальної площі контакту мікронерівностей, активація трибохімічних процесів та утворення стабільної захисної трибоплівки.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати зниження коефіцієнта тертя залежно від параметрів вібраційного впливу. Запропонований підхід може розглядатися як перспективний напрям розвитку активних трибологічних систем, у яких властивості контактної поверхні керуються за допомогою зовнішніх фізичних полів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку отриманих теоретичних результатів, оптимізацію параметрів вібрацій та підбір ефективних типів ПАР.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*. 2017. Vol. 5, No. 3. P. 263–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.
2. Meng Y., Xu J., Ma L., Jin Z., Prakash B., Ma T., Wang W. A review of advances in tribology in 2020–2021. *Friction*. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 1443–1595. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0685-7>.
3. Spikes H. Friction modifier additives. *Tribology Letters*. 2015. Vol. 60, No. 1. Article 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0589-z>.
4. Chen Z., Liu Y., Zhang S., Luo J. Tribological behavior of amphiphilic molecules at solid-liquid interfaces: A molecular dynamics simulation study. *Langmuir*. 2018. Vol. 34, No. 19. P. 5611–5622. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00274>.
5. Popov V. L., Starcevic J., Filippov A. E. Influence of ultrasonic in-plane oscillations on static and sliding friction and intrinsic length scale of dry friction processes. *Tribology Letters*. 2022. Vol. 70. Article 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01592-z>.
6. Teidelt E., Starcevic J., Popov V. L. Influence of ultrasonic oscillation on static and sliding friction. *Tribology Letters*. 2016. Vol. 48. P. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-012-9937-4>.
7. Ковалевський С. В. Деякі аспекти застосування штучного інтелекту для відновлення та розвитку України. *Штучний інтелект*. 2023. № 3. С. 117–125. DOI: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001445551>.
8. Kovalevskyy S. Intelligent control systems for mechanical engineering technology tasks. *Штучний інтелект*. 2024. № 4 (101). С. 218–227. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.04.218>.
9. Shen X., Liu D., Wang Z., Li Y. Effect of ultrasonic vibration on friction and wear characteristics of metallic surfaces with adsorption films. *Wear*. 2023. Vol. 523. Article 204812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204812>.
10. Verma P. C., Campanerut R., Gialanella S., Straffelini G. Friction and wear behaviour of the brake pad material sliding against piped cast iron: influence of lubricant film. *Wear*. 2015. Vol. 322–323. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.012>.

**Ковалевський С.В.<sup>1</sup>, Жуківський Н.С.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна;  
<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна).

## **АДАПТИВНИЙ ІМПУЛЬСНИЙ МУЛЬТИЕЛЕКТРОДНИЙ РЕАКТОР КОРОННОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ**

**Анотація:** У роботі досліджено принципи створення адаптивного імпульсного мультieleктродного реактора коронного розряду для обробки поверхонь деталей машин при атмосферному тиску. Розглянуто фізичні механізми формування коронного розряду та переносу матеріалу електродів у поверхневий шар оброблюваної деталі. Особливу увагу приділено саморегуляції процесу, що забезпечується імпульсним режимом роботи та електромагнітним керуванням рухом електродів. Проаналізовано переваги використання мультieleктродної системи порівняно з одноелектродними схемами, зокрема підвищення рівномірності оброблення та продуктивності процесу. Запропоновано підхід до керування параметрами розряду для досягнення оптимального поєднання мікротвердості та шорсткості поверхні. Отримані результати можуть бути використані при створенні нових технологій зміцнення та модифікації поверхонь деталей машин без застосування вакуумного обладнання.

**Ключові слова:** коронний розряд; мультieleктродний реактор; імпульсний режим; саморегуляція; електромагнітне поле; мікротвердість; шорсткість; деталі машин.

**Abstract:** This paper investigates the principles of designing an adaptive pulsed multi-electrode corona discharge reactor for surface treatment of machine parts under atmospheric pressure conditions. The physical mechanisms of corona discharge formation and transfer of electrode material into the surface layer of the workpiece are analyzed. Special attention is given to process self-regulation achieved through pulsed operation and electromagnetic control of electrode motion. The advantages of a multi-electrode system compared to single-electrode configurations are considered, particularly improved processing uniformity and higher productivity. An approach to controlling discharge parameters is proposed to achieve an optimal balance between microhardness and surface roughness. The results can be applied in the development of advanced technologies for surface strengthening and modification of machine parts without the need for vacuum equipment, improving efficiency and operational performance.

**Keywords:** corona discharge; multi-electrode reactor; pulsed режим; self-regulation; electromagnetic field; microhardness; surface roughness; machine parts.

## **ВСТУП.**

Поверхневий шар матеріалу визначає адгезійні, трибологічні та функціональні властивості виробу. Такі промислові матеріали, як поліетилен, поліпропілен та фторополімери, характеризуються низькою поверхневою енергією, що обмежує їх здатність до формування міцних з'єднань з покриттями та клеями [1, 2]. Традиційні методи поверхневої активації — хімічне травлення, вогнева обробка, вакуумна плазма — мають суттєві недоліки: високу вартість, необхідність вакуумного



обладнання, екологічну небезпеку, складну інтеграцію з безперервними виробничими лініями [3].

Обробка атмосферною плазмою є перспективною альтернативою, оскільки дозволяє модифікувати хімію поверхні без вакуумного устаткування. Серед атмосферних плазмових технологій коронний розряд є найбільш енергоефективним і масштабованим методом для промислового застосування [4]. Коронний розряд виникає при докладанні високої напруги між несиметричними електродами; утворена плазма містить реакційно-здатні частинки: радикали кисню (O), озон (O<sub>3</sub>), гідроксильні радикали (OH) та збуджені молекули азоту, які вводять полярні функціональні групи на поверхні [5].

Водночас традиційні системи коронної обробки мають такі обмеження: нерівномірний розподіл розряду, обмежені можливості керування хімією плазми, ерозія електродів, перехід корони в дуговий розряд [6]. Головною метою цієї роботи є розробка адаптивного імпульсного мультиелектродного реактора коронного розряду, який забезпечує підвищену стабільність плазми, рівномірність обробки та ефективне керування параметрами розряду.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Запропонований реактор містить такі підсистеми: імпульсне високовольтне джерело живлення, мультиелектродну матрицю коронного розряду, діелектричний бар'єр, транспортну систему та модуль адаптивного керування. Електродна матриця складається з голчастих електродів із радіусом кривизни 50–200 мкм, відстанню між електродами 5–10 мм та зазором до підкладки 4–6 мм. Напруженість електричного поля поблизу вістря електрода описується співвідношенням  $E = V / [r \cdot \ln(4d/r)]$ , де  $V$  — напруга,  $r$  — радіус електрода,  $d$  — відстань до підкладки. Критична напруженість поля іонізації повітря при атмосферному тиску становить  $E_{\text{крит}} \approx 3 \times 10^6$  В/м.

Математична модель плазми ґрунтується на рівнянні Пуассона для розподілу електричного потенціалу, рівнянні дрейфово-дифузійного транспорту заряджених частинок та кінетичному рівнянні швидкості поверхневих реакцій  $R = k \cdot C_{\text{plasma}} \cdot C_{\text{surface}}$ . Імпульсний генератор забезпечує амплітуду напруги 20–30 кВ, частоту імпульсів 20–40 кГц та тривалість імпульсу 50–200 нс, що суттєво знижує ймовірність переходу в дуговий розряд при збереженні високої густини плазми [7].

Експериментальна перевірка проводилась на полімерних підкладках з поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП) та поліетилентерефталату (ПЕТ). Поверхнева енергія вимірювалась методом контактного кута, міцність адгезії — методом відриву. Результати вимірювань поверхневої енергії зведено у таблицю 1.

Таблиця 1. Поверхнева енергія полімерних підкладок до та після коронної обробки

| Матеріал | До обробки, мН/м | Після обробки, мН/м |
|----------|------------------|---------------------|
| ПЕ       | 32               | 68                  |
| ПП       | 30               | 65                  |
| ПЕТ      | 42               | 72                  |

Коронна обробка забезпечила суттєве підвищення поверхневої енергії всіх досліджених матеріалів. Міцність адгезії покриттів збільшилась у 2–3 рази порівняно з необробленими зразками. Нерівномірність обробки становила менше 5% по всій поверхні підкладки. Порівняно з традиційними системами коронної обробки запропонований реактор забезпечує покращену стабільність плазми, вищу просторову рівномірність та знижене енергоспоживання [8].

### ВИСНОВКИ.

У результаті проведених досліджень розроблено та апробовано адаптивний імпульсний мультиелектродний реактор коронного розряду для обробки поверхонь при атмосферному тиску. Побудовано математичну модель плазми коронного розряду, що описує розподіл електричного поля, транспорт заряджених частинок та кінетику поверхневих реакцій. Експериментально підтверджено підвищення поверхневої енергії полімерних підкладок (ПЕ, ПП, ПЕТ) до 65–72 мН/м, що на 60–70% перевищує вихідні значення. Міцність адгезії покриттів зросла у 2–3 рази при нерівномірності обробки менше 5%.

Імпульсний режим роботи генератора (20–30 кВ, 20–40 кГц, 50–200 нс) дозволяє суттєво знизити ймовірність дугових розрядів і ерозію електродів при збереженні високої густини плазми. Система адаптивного керування автоматично підлаштовує параметри розряду залежно від матеріалу підкладки. Запропонована технологія має перспективи впровадження у пакувальній, автомобільній, біомедичній та електронній промисловості. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію геометрії електродів, плазмову діагностику та масштабні промислові випробування.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Fridman A. *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008. 978 p.
2. Lieberman M., Lichtenberg A. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. 2nd ed. Wiley-Interscience, 2005. 757 p.
3. Roth J. R. *Industrial Plasma Engineering*. Vol. 2. Bristol: IOP Publishing, 2001. 546 p.
4. Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B*. 2006. Vol. 61, No. 1. P. 2–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003>.
5. Strobel M., Lyons C. S. An essay on contact angle measurements. *Plasma Processes and Polymers*. 2011. Vol. 8, No. 1. P. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.201000041>.

6. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2003. Vol. 23, No. 1. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
7. Laroussi M., Akan T. Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: A review. *Plasma Processes and Polymers*. 2007. Vol. 4, No. 9. P. 777–788. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.200700066>.
8. Sira M., Trunec D., Stahel P., Buršíková V., Navrátil Z., Buršík J. Surface modification of polyethylene and polypropylene in atmospheric pressure glow discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. Vol. 38. P. 621–627. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/4/015>.

УДК 621.9.048.7:534.1

**Ковалевський С.В.<sup>1</sup>, Надич П.В.<sup>1</sup>, Марчук В.І.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна;  
<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна).

## ШИРОКОСМУГОВИЙ НАНОАМПЛІТУДНИЙ ЗБУДЖУВАЧ ДЛЯ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

**Анотація:** У роботі розглянуто фізичні принципи та інженерну концепцію широкосмугового генератора наноамплітудних механічних коливань для твердосплавних різальних пластин у широкому частотному діапазоні. Обґрунтовано застосування електромагнітного збудження за принципом сили Лоренца у поєднанні з термопружним ефектом як ефективного механізму формування коливань без використання механічних приводів. Проведено аналіз умов збудження об'ємних пружних хвиль у матеріалі WC-Co та визначено параметри, за яких реалізуються наноамплітудні коливання. Побудовано карту резонансних мод пластини та встановлено оптимальні точки прикладення збудження. Запропоновано архітектуру лабораторної установки з широкосмуговим керуванням та замкненим контуром стабілізації амплітуди. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності процесів різання, зменшення зносу інструменту та дослідження фізичних механізмів взаємодії інструмента з матеріалом.

**Ключові слова:** нановібрації; сила Лоренца; пружні хвилі; твердий сплав; ультразвук; різальний інструмент; широкосмуговий збуджувач.

**Abstract:** This paper considers the physical principles and engineering concept of a broadband nanoscale mechanical vibration generator for cemented carbide cutting inserts over a wide frequency range. The use of electromagnetic excitation based on the Lorentz force combined with the thermoelastic effect is substantiated as an efficient mechanism for generating vibrations without mechanical actuators. The conditions for excitation of volumetric elastic waves in WC-Co material are analyzed and the parameters enabling nanoscale oscillations are determined. A resonance map of the insert is constructed and optimal excitation points are identified. A laboratory setup architecture with broadband control and closed-loop amplitude stabilization is proposed. The obtained results can be applied to improve machining efficiency, reduce tool wear, and investigate physical mechanisms of tool–material interaction under vibration-assisted conditions.

**Keywords:** *nanoscale vibrations; Lorentz force; elastic waves; cemented carbide; ultrasound; cutting tool; broadband exciter.*

## ВСТУП.

Сучасні дослідження в галузі металообробки показують, що накладання ультразвукових та широкосмугових механічних коливань на різальний інструмент дозволяє суттєво знизити сили різання, зменшити знос інструменту та покращити якість обробленої поверхні [1, 2]. Явище, відоме як *ultrasonic assisted cutting*, набуло широкого розповсюдження у прецизійному виробництві. Водночас для дослідження фізичних механізмів впливу коливань різної частоти на процес різання необхідні спеціалізовані стенди, здатні збуджувати нановібрації у широкому діапазоні частот безпосередньо у матеріалі різального інструменту [3].

Твердосплавні різальні пластини (ТРП) з WC-Co є стандартним об'єктом дослідження у трибології ріжучого інструменту. Їхня висока щільність ( $\approx 15\,000\text{ кг/м}^3$ ) та модуль Юнга ( $\approx 550\text{ ГПа}$ ) визначають швидкість розповсюдження пружних хвиль на рівні  $6000\text{ м/с}$ , що забезпечує унікальну карту резонансних мод у діапазоні до  $3\text{ МГц}$  [4]. Збудження контрольованих наноамплітудних коливань у таких пластинах без механічних приводів є актуальною інженерною задачею, яка потребує нових фізичних підходів [5].

Традиційно для збудження ультразвукових коливань застосовують п'єзоелектричні актуатори або магнітострикційні перетворювачі. Однак реалізація широкосмугового режиму від  $10\text{ Гц}$  до  $3\text{ МГц}$  єдиною системою є нетривіальним завданням. Перспективним є використання принципу сили Лоренца, коли модульований змінний струм, що протікає через об'єкт у полі постійного магніту, безпосередньо генерує механічні коливання [6, 7]. Такий підхід отримав назву *Lorentz microshaker* і широко застосовується у MEMS-системах [8].

Метою даної роботи є дослідження фізичних механізмів збудження наноамплітудних коливань у твердосплавній різальній пластині  $20\times 10\times 5\text{ мм}$  та розроблення концепції лабораторної установки з діапазоном частот  $10\text{ Гц} - 3\text{ МГц}$ .

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Основним фізичним механізмом збудження коливань обрано силу Лоренца, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі:

$$F = I \cdot L \cdot B,$$

де  $I$  — струм через провідник, А;  $L$  — ефективна довжина провідника у полі, м;  $B$  — магнітна індукція, Тл. При модуляції струму за законом  $I(t) = I_0 \sin(2\pi ft)$  виникає осцилююча механічна сила з частотою  $f$ . Використання меандрового провідника ( $N$  сегментів) збільшує ефективну довжину до  $L_{\text{еф}} = N \cdot L$ , що дозволяє збільшити силу збудження у  $N$  разів.

При  $N = 20$  та  $L = 1$  мм ефективна довжина становить 20 мм, а сила при  $B = 0,8$  Тл,  $I = 0,1$  А складає  $F \approx 1,6$  мН.

Оскільки пластина WC-Co є масивним тілом (маса  $m \approx 15$  г), рухати її як ціле за допомогою сили Лоренца фізично неможливо — розрахункова амплітуда руху тіла при  $f = 1$  МГц складає порядку  $10^{-16}$  м. Тому реальний механізм впливу полягає в інжекції об'ємних пружних хвиль у матеріал пластини через вібраційну голку або хвилевід [9].

Швидкість пружних хвиль у матеріалі WC-Co:

$$v = \sqrt{E/\rho} \approx 6000 \text{ м/с.}$$

Аналіз резонансних мод пластини  $20 \times 10 \times 5$  мм виконано за формулою  $f_n = nv / (2L)$ . Результати наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Карта основних резонансних мод пластини WC-Co  $20 \times 10 \times 5$  мм

| Напрямок | Розмір, мм | Мода $n=1$ , кГц | Мода $n=2$ , кГц |
|----------|------------|------------------|------------------|
| Довжина  | 20         | 150              | 300              |
| Ширина   | 10         | 300              | 600              |
| Товщина  | 5          | 600              | 1200             |

Ключова перевага методу Лоренца полягає в тому, що теоретична смуга частот обмежена лише електронікою, а не механічними резонансами приводу. Додатковим фізичним ефектом є термопружне збудження: змінний струм нагріває провідник, спричиняючи термічні деформації у біметалічній консольній балці. Для балки Al/Si при нагріванні на  $\Delta T = 1\text{--}5$  К досягаються амплітуди деформації 10–200 нм. Об'єднання обох ефектів — електромагнітного і термопружного — дозволяє розширити амплітудний діапазон без збільшення струму.

В табл. 1 представлена порівняльна оцінка трьох типів драйверів для задачі збудження коливань ТРП.

Таблиця 2. Порівняльна характеристика драйверів коливань

| Тип драйвера        | Амплітуда, нм | $F_{\max}$ , МГц | Складність | Смуга, декади |
|---------------------|---------------|------------------|------------|---------------|
| Лоренца (Lorentz)   | 1–50          | 3+               | Середня    | 5             |
| Магнітострикція     | 10–200        | 0,2              | Висока     | 4             |
| П'єзoeлектрик (PZT) | 1–100         | 5                | Низька     | 5             |

Запропонована архітектура лабораторної установки включає: DDS-генератор (AD9834/AD9959), широкосмуговий RF-підсилювач, котушку Лоренца у магнітному зазорі NdFeB ( $B = 0,7\text{--}1$  Тл, зазор 3–5 мм), акустичний конусний хвилевід (Ti,  $l = 40$  мм,  $D_{\text{вх}} = 10$  мм  $\rightarrow D_{\text{вих}} = 1$  мм) та лазерний доплерівський віброметр з роздільною здатністю 0,1 нм. Для подолання проблеми резонансних стрибків амплітуди реалізовано замкнений контур керування: датчик вимірює амплітуду, мікроконтролер

коригує струм підсилювача, стабілізуючи коливання в межах  $\pm 3\%$  в усьому робочому діапазоні [10].

Очікувані характеристики системи: діапазон 10 Гц – 3 МГц; амплітуда 0,1–200 нм; сила контакту 0,1–1 Н; стабільність амплітуди  $\pm 3\%$ ; чутливість вимірювача 0,1 нм.

## ВИСНОВКИ.

1. Встановлено, що переміщення ТРП WC-Co  $20 \times 10 \times 5$  мм як жорсткого тіла за допомогою сили Лоренца у робочому діапазоні частот фізично неможливе через велику масу ( $\approx 15$  г). Ефективним є збудження об'ємних пружних хвиль у матеріалі пластини через акустичний хвилевід.

2. Побудовано карту резонансних мод пластини: критичні частоти 150, 300, 600, 1200 та 1800 кГц — саме в цих точках досягається максимальна амплітуда коливань ріжучої кромки. Оптимальною точкою прикладення збудження є протилежний від ріжучої кромки торець пластини.

3. Запропоновано поєднання електромагнітного та термопружного механізмів збудження, що дозволяє досягти амплітуди 10–500 нм при струмі 10–50 мА без великих механічних приводів.

4. Розроблено концепцію лабораторної установки з замкненим контуром керування амплітудою. Стабільність  $\pm 3\%$  у діапазоні 10 Гц – 3 МГц досягається динамічним регулюванням струму драйвера на основі сигналу лазерного доплерівського віброметра.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Rinaldi G., Commandè L., Scalise L. *Vibration-assisted machining of hard-to-cut materials: a review. Journal of Manufacturing Processes.* 2023. Vol. 101. P. 1112–1136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.052>.
2. Ying N., Zhigang D., Zhuji J. *A review on ultrasonic assisted machining of engineering ceramics. Journal of Manufacturing Processes.* 2022. Vol. 84. P. 345–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.024>.
3. Bleicher F., Wiesinger G., Kumpf C., Finkeldei D., Baumann C., Lechner C. *Vibration suppression of an elder single-flute end mill by adapting the process parameters. CIRP Annals.* 2018. Vol. 67(1). P. 393–396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.020>.
4. Bartarya G., Choudhury S. K. *State of the art in hard turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 2022. Vol. 53(1). P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103862>.
5. Jamshidi H., Nategh M. J. *Theoretical and experimental investigation of the frictional behavior of the tool-chip interface in ultrasonic-vibration assisted turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 2021. Vol. 65. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.09.008>.
6. Algami A. S., Khir M. H. M., Dennis J. O., et al. *A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices. Nanoscale Research Letters.* 2021. Vol. 16. P. 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>.
7. Liu B., Liang L., Ma L. *A broadband Lorentz force MEMS magnetometer with a permanent magnet configuration. Sensors and Actuators A: Physical.* 2023. Vol. 354. Art. 114260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114260>.

8. Kovalevskyy S. Intelligent control systems for mechanical engineering technology tasks. *Міжнародний науково-технічний журнал «Штучний інтелект»*. 2024. № 4(101). С. 218–227. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.04.218>.
9. Shen X., Zhang D., Duan J. et al. Elastic wave propagation and vibration characteristics of diamond-shaped metastructures. *Smart Materials and Structures*. 2021. Vol. 30. Art. 055017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abee9a>.
10. Rembe C., Dräbenstedt A. Optical-scanning vibrometer with a high-speed microscope lens and a laser Doppler distance sensor. *Review of Scientific Instruments*. 2020. Vol. 91. Art. 015113. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5130650>.

УДК 004.65:620.179:519.25

**Ковалевський С.В.<sup>1</sup>, Побережець В.Я.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна;  
<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна).

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТРУКТУРНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ У СИСТЕМАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ SQL-БАЗ ЕНТРОПІЙНИХ ПРОФІЛІВ**

**Анотація:** У роботі запропоновано метод автоматизованої ідентифікації структурного стану матеріалів у системах неруйнівного контролю з використанням програмних засобів на базі C# та оптимізованих SQL-сховищ даних. Як діагностичний критерій обрано ентропію Шеннона, що дозволяє кількісно оцінити ступінь впорядкованості матеріалу на основі аналізу його спектрального відгуку. Розроблено підхід до формування бази ентропійних профілів із використанням складеної індексації за ключовими параметрами, зокрема значенням ентропії, частотою та амплітудою спектрального піка. Проведено експериментальні дослідження для різних типів матеріалів, у результаті яких встановлено характерні значення ентропії для феромагнітних та діелектричних середовищ. Показано, що застосування індексованих SQL-запитів забезпечує високу швидкість класифікації матеріалів у режимі реального часу. Отримані результати можуть бути використані для створення інтелектуальних систем технічної діагностики та моніторингу стану матеріалів у промислових умовах.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль; ентропія Шеннона; SQL-бази даних; спектральний аналіз; ідентифікація матеріалів; C#; діагностика.

**Abstract:** This paper proposes a method for automated identification of the structural state of materials in non-destructive testing systems using software tools based on C# and optimized SQL data storage. Shannon entropy is used as a diagnostic criterion, enabling quantitative evaluation of material order based on spectral response analysis. An approach to constructing a database of entropy profiles is developed using composite indexing by key parameters such as entropy value, peak frequency, and amplitude. Experimental studies for various materials are conducted, establishing characteristic entropy values for ferromagnetic

*and dielectric media. It is shown that the use of indexed SQL queries ensures high-speed classification of materials in real-time conditions. The obtained results can be applied to the development of intelligent diagnostic systems and monitoring of material conditions in industrial environments, improving reliability, processing speed, and decision-making efficiency in automated non-destructive evaluation systems.*

**Keywords:** *non-destructive testing; Shannon entropy; SQL databases; spectral analysis; material identification; C#; diagnostics.*

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ В ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ.**

Сучасний розвиток машинобудування та матеріалознавства вимагає впровадження високоточних методів неруйнівного контролю, здатних об'єктивно оцінювати структурний стан матеріалів у реальному часі. Традиційні статистичні підходи, що базуються на аналізі математичного сподівання чи дисперсії, часто виявляються недостатніми для повного опису складних структурних змін, особливо в умовах комбінованого магніто-резонансного впливу [1, 2, 3].

Використання ентропії Шеннона як універсальної міри інформаційної невизначеності дозволяє ідентифікувати «спектральні відбитки» матеріалів, проте практичне застосування цього підходу стикається з низкою технічних викликів [4, 5, 6]: 1) Висока обчислювальна складність: Розрахунок ентропійних показників для великих масивів діагностичних даних потребує ефективних алгоритмічних рішень на мовах високого рівня (наприклад, C#); 2) Проблема швидкої ідентифікації: Необхідність миттєвого порівняння отриманого сигналу з еталонними профілями вимагає розробки спеціалізованих структур баз даних; 3) Оптимізація збереження даних; Велика кількість діагностичних параметрів створює навантаження на системи збереження, що зумовлює потребу в оптимізації SQL-запитів та використанні ефективної індексації для забезпечення роботи системи в режимі реального часу;

Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням є створення автоматизованої системи, яка інтегрує ентропійний аналіз із оптимізованими ІТ-технологіями для підвищення точності та швидкодії технічної діагностики.

## **ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ.**

Для автоматизації розрахунків розроблено програмний модуль, який обчислює ентропію Шеннона на основі нормалізованого спектра потужності сигналу. Основна перевага використання C# полягає у швидкості обробки масивів даних, отриманих після швидкого перетворення Фур'є (FFT).



```
// Метод для розрахунку ентропії Шеннона
0 references
public double CalculateShannonEntropy(double[] powerSpectrum)
{
    double entropy = 0;
    double sumPower = powerSpectrum.Sum();

    foreach (var p in powerSpectrum)
    {
        if (p > 0)
        {
            double probability = p / sumPower; // Нормалізація
            entropy -= probability * Math.Log(probability, 2);
        }
    }
    return entropy;
}
```

Рисунок 1. Метод для розрахунку ентропії Шеннона в C#.

Для миттєвої ідентифікації матеріалу в системах реального часу використано підхід із попередньо розрахованими «ентропійними профілями». Оптимізація пошуку досягається шляхом створення складеного індексу на три колонки, що забезпечує логарифмічну швидкість пошуку навіть у великих базах даних.

```
CREATE TABLE MaterialProfiles (
    ProfileID INT PRIMARY KEY,
    MaterialName NVARCHAR(50),
    EntropyValue FLOAT,
    PeakFrequency FLOAT,
    PeakAmplitude FLOAT,
    RecommendedModel NVARCHAR(100)
);

-- Оптимізація: індекс на 3 колонки для швидкого пошуку за діапазоном
CREATE INDEX idx_diagnostic_search
ON MaterialProfiles (EntropyValue, PeakFrequency, PeakAmplitude);
```

Рисунок 2. Структура таблиці та індексація в MSSQL.

В ході експериментів було отримано амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) для п'яти типів матеріалів. Встановлено, що спектральна ентропія є найбільш чутливим індикатором структурної впорядкованості.

Таблиця 1. Еталонні ентропійні профілі для SQL-бази.

| Матеріал    | Ентропія спектра (біт) | Частота піку (Гц) | Амплітуда піку | Рекомендований розподіл |
|-------------|------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|
| Сталь       | 8,91                   | 27,4              | 644,2          | Вейбулла, Гамма         |
| Мідь        | 10,51                  | 75,3              | 238,1          | Нормальний              |
| Дюралюміній | 10,94                  | 153,4             | 191,4          | Нормальний              |

|           |       |       |      |             |
|-----------|-------|-------|------|-------------|
| Текстоліт | 11,66 | 215,5 | 65,7 | Рівномірний |
| Оргскло   | 11,60 | 318,8 | 80,1 | Рівномірний |

Використання індексованих SQL-запитів дозволяє системі класифікувати матеріал за  $< 10$  мс, порівнюючи поточну ентропію з еталонними профілями. Для феромагнітних матеріалів (сталь) низька ентропія (8,91 біт) свідчить про високу впорядкованість доменів, тоді як для діелектриків високі значення ( $\sim 11,6$  біт) підтверджують хаотичний розподіл енергії по частотах.

## ВИСНОВКИ.

Доведено, що ентропія Шеннона є універсальним та чутливим критерієм для кількісного оцінювання інформаційної невизначеності діагностичних сигналів. Вона дозволяє ідентифікувати структурні зміни в матеріалах через аналіз їхніх «спектральних відбитків».

Встановлено чіткий взаємозв'язок між типом матеріалу та показником ентропії: 1) Феромагнітна сталь характеризується найнижчою спектральною ентропією (8,91 біт) завдяки високій впорядкованості внутрішньої структури та домінуванню резонансних частот; 2) Діелектричні матеріали (текстоліт, оргскло) демонструють максимальну ентропію (до 11,66 біт), що відповідає рівномірному розподілу енергії та високій інформаційній невизначеності відгуку;

Розроблений програмний модуль на базі C# забезпечує швидке обчислення ентропійних показників «на льоту», що дозволяє перетворити складні математичні моделі у прикладний інструмент неруйнівного контролю.

Застосування SQL-баз даних із використанням складених індексів за трьома ключовими параметрами (ентропія, частота, амплітуда) дозволяє мінімізувати час пошуку еталонного профілю в системі. Це забезпечує можливість класифікації стану матеріалу в режимі реального часу, що є критично важливим для автоматизованих промислових ліній.

Запропонований комплексний підхід відкриває нові перспективи для створення інтелектуальних систем моніторингу, які поєднують глибокий фізичний аналіз із сучасними методами оптимізації даних, підвищуючи надійність та швидкість прийняття діагностичних рішень.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Tomaschitz R. Multiply broken power-law densities as survival functions: An alternative to Pareto and lognormal fits. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2020. Vol. 541. Article 123188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123188>
2. Kovalevskyy S., Kovalevska O. New opportunities for processing materials in a strong magnetic fields. *Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка»*. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 4 (26). – С. 7-14.
3. Kovalevskyy S., Kovalevska O.: Identification and Technological Impact of Broadband Vibration on the Object. *Papers from the 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2021), September 7-10, 2021, Odessa, Ukraine. ABCM Series*

on Mechanical Sciences and Engineering. Lecture Notes in Networks and Systems, pp. 78-87. DOI 10.1007/978-3-030-91327-4\_8.

4. Christie D. C. Efficient estimation of directional wave buoy spectra using a reformulated Maximum Shannon Entropy Method: Analysis and comparisons for coastal wave datasets. Applied Ocean Research. 2024. Vol. 142. Article 103830. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103830>. ISSN 0141-1187.

5. Spencer N. A., Miller J. W. Strong uniform laws of large numbers for bootstrap means and other randomly weighted sums. Statistics & Probability Letters. 2024. Vol. 211. Article 110144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spl.2024.110144>

6. Ковалевський С. В., Побережець В. Я. Дослідження ентропійних оцінок діагностичних характеристик технологічних систем на основі ймовірнісних розподілів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 3. С. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-168-177>.

УДК 621.865.8:621.643

**Корендій В.М., Зелінський М.-П.Б., Гелетій В.М., Угрин Л.С.,  
Похмурська А.В. (Національний університет «Львівська політехніка»,  
м. Львів, Україна).**

## **ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО КОЛІСНОГО РОБОТА ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВСЕРЕДИНИ ТРУБОПРОВОДІВ**

**Анотація:** У роботі розроблено комплексну кінетостатичну та гібридну динамічну модель рушійної системи адаптивного внутрішньотрубного робота. Запропонована конструкція складається з двох модулів, що включають пантографний механізм пасивного центрування та кривошипно-повзунний привід з обгінними муфтами, що забезпечують інчворм-подібний рух. Побудовано математичний опис руху у вигляді кусково-неперервних рівнянь, які враховують зміну фаз контакту та перемикання кінематичних зв'язків. Проведено чисельне моделювання, яке підтвердило стійкість однонапрявленого переміщення робота в умовах обмеженого простору трубопроводу. Водночас встановлено виникнення значних інерційних навантажень у моменти перемикання фаз руху, що може призводити до перевантаження елементів конструкції. Отримані результати обґрунтовують необхідність інтеграції пружних або демпфувальних елементів у кінематичну схему приводу для зниження пікових навантажень і підвищення надійності системи. Розроблений підхід може бути використаний при проектуванні мобільних роботів для діагностики та обслуговування трубопроводів.

**Ключові слова:** внутрішньотрубний робот; кінетостатична модель; гібридна динаміка; інчворм-рух; обгінні муфти; інерційні навантаження; адаптивні системи.

**Abstract:** This paper presents a comprehensive kinetostatic and hybrid dynamic model of the propulsion system for a passively adaptive in-pipe robot. The proposed design consists of two modules incorporating a pantograph mechanism for passive centering and a slider-crank drive with freewheel clutches that enable inchworm-type locomotion. A mathematical formulation of motion is developed in the form of piecewise-continuous equations accounting

*for phase transitions and changes in kinematic constraints. Numerical simulations confirm the stability of unidirectional motion within confined pipeline environments. However, significant inertial loads are observed during phase switching, which may lead to structural overloading of system components. The obtained results highlight the necessity of integrating compliant or damping elements into the drive mechanism to reduce peak dynamic loads and improve system reliability. The proposed modelling framework can be applied in the design of mobile robotic systems for inspection, maintenance, and diagnostics of pipeline infrastructure under constrained operating conditions.*

**Keywords:** in-pipe robot; kinetostatic model; hybrid dynamics; inchworm locomotion; freewheel clutches; inertial loads; adaptive systems.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Структурна цілісність трубопровідних мереж є критичним фактором для безперервної та безпечної експлуатації підприємств енергетичного, хімічного та муніципального секторів промисловості. Для проведення регулярного неруйнівного контролю, діагностики стану внутрішніх поверхонь та запобігання небезпечним витокам все частіше застосовуються автономні внутрішньотрубні інспекційні роботи. Вони виступають як ефективна та надійна альтернатива ручній праці в обмежених, токсичних і небезпечних середовищах. Протягом останніх десятиліть парадигма проектування таких робототехнічних систем змістилася у бік високоадаптивних, автономних модульних гібридних роботизованих платформ.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Проблематика математичного моделювання нестандартних режимів локомоції мобільних роботів активно досліджується. У цьому контексті надзвичайно важливим є комплексне розкриття різних аспектів кінематики й динаміки вібраційних та внутрішньотрубних робототехнічних систем. Базові принципи кінетостатичного аналізу рушійної системи мобільного робота для інспектування труб та розподіл зусиль між тяговими модулями ґрунтовно закладено у праці [1]. Окрім цього, концептуальні засади динамічного моделювання пасивно адаптивного робота з однонапрямленим рухом докладно представлено у дослідженні [2].

Важливі аспекти поведінки подібних систем із кусково-неперервними характеристиками також висвітлено у низці споріднених публікацій. Зокрема, моделювання умов переміщення вібраційних роботів розглянуто в [3], а комп'ютерна симуляція кусково-неперервного руху колісних систем у трубопроводах проаналізована в роботі [4]. Усі ці роботи формують надійне теоретичне підґрунтя для розроблення загальної гібридної динаміки багатомодульних вібраційних робототехнічних апаратів.

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на прогрес у дослідженнях просторових механізмів пасивної адаптації та принципів роботи обгінних муфт, синтез повноцінної та уніфікованої гібридної динамічної моделі для робота типу «гусінь» із єдиним центральним кривошипно-повзунним приводом залишається невирішеним завданням. Бракує математичного апарату, здатного адекватно описувати перехідну динаміку, почергове зміщення інерційних мас і, найголовніше, жорсткі ударні навантаження під час миттєвого перемикавання станів (спрацювання муфт вільного ходу) у циклі макроскопічного переміщення. Відсутність таких інструментів критично обмежує можливості проектування зносостійких інспекційних комплексів.

## **Цілі статті та постановка задачі.**

Головною метою дослідження є розроблення комплексної кінетостатичної та гібридної динамічної моделі рушійної системи новітнього пасивно адаптивного внутрішньотрубного робота притискного типу зі стратегією пересування типу «гусінь». Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання: 1) Описати концептуальну архітектуру симетричного двомодульного робота з підпружиненим пантографним механізмом центрування та єдиним центральним кривошипно-повзунковим приводом. 2) Сформулювати кінематичну базу та граничні обмеження ідеальних обгінних муфт під час фаз стискання і розширення бази робота. 3) Вивести кусково-неперервні рівняння руху системи на основі диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду, встановивши ефективний момент інерції, відцентрові складові та узагальнені сили. 4) Здійснити чисельне моделювання системи для аналізу макроскопічних характеристик руху, внутрішньої динаміки та оцінки екстремальних перехідних ударних навантажень.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Запропонована механічна архітектура робота (рис. 1) являє собою симетричне модульне компонування, що складається з двох ідентичних тягових модулів: переднього (маса  $m_1$ ) та заднього (маса  $m_2$ ). Основою системи пасивної адаптації є важільний пантографний (ножицеподібний) механізм, розміщений на кожному з модулів. Ця кінематична схема забезпечує суворе позиціонування робота на поздовжній осі труби. Унікальною властивістю пантографа є здатність зберігати осі коліс паралельними до поздовжньої осі робота незалежно від кута розкриття важелів при зміні діаметра трубопроводу. Ця характеристика фундаментально унеможливорює ефект «самозаклинювання» (автоблокування) під час руху. Нормальна сила притискання генерується блоками попередньо стиснутих пружин із вбудованими демпферами, що відповідно до закону тертя Кулона-Амонтона визначає тягову спроможність системи.

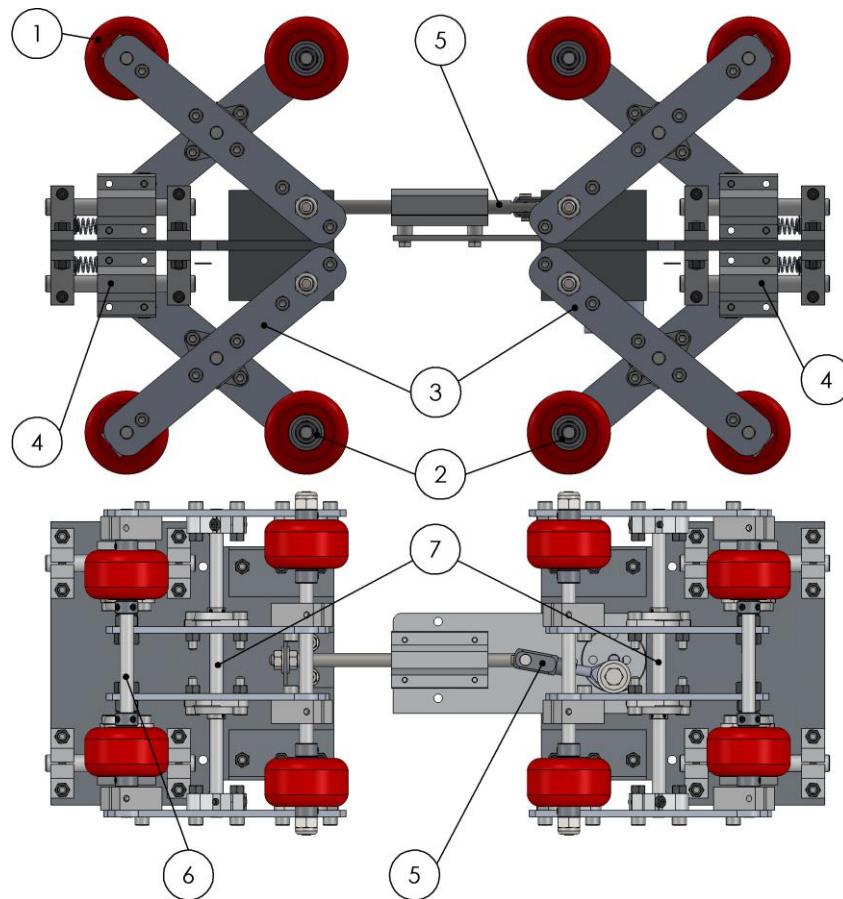


Рисунок 1. Загальний вигляд експериментального макета робота

Розроблений робот використовує єдиний центральний активний кривошипно-повзунний механізм, що розташований між модулями. Цей механізм перетворює обертальний рух вала електродвигуна на зворотно-поступальні коливання модулів один відносно одного (зміну відстані між їхніми центрами). Ключовим інноваційним рішенням є застосування ідеальних обгінних муфт, інтегрованих в усі колеса. Вони відіграють роль механічних діодів: дозволяють колесам вільно котитися лише вперед і миттєво блокують їх під час спроби руху назад. Відповідно, макроскопічний рух робота поділяється на дві почергові фази: Фаза 1 (стиснення). Кривошипно-повзунний механізм стягує модулі. Передній модуль  $m_1$  відчуває зусилля, що штовхає його назад, проте його муфти миттєво блокуються, перетворюючи його на нерухомий опорний якор ( $\dot{x}_1 = 0$ ). Одночасно, задній модуль  $m_2$  вільно підтягується механізмом уперед. Фаза 2 (розширення). Привід розштовхує модулі. Відстань між ними збільшується. Задній модуль  $m_2$  відчуває поштовх назад, фіксується своїми муфтами і стає нерухомим якорем ( $\dot{x}_2 = 0$ ). Відштовхуючись від нього, передній модуль  $m_1$  виштовхується вперед.

Для виведення рівнянь руху побудовано еквівалентну 2D кінематичну схему (рис. 2). Узагальненою координатою є кут повороту кривошипа  $\varphi$ . Припускаючи, що довжина шатуна  $L$  значно більша за радіус кривошипа  $r$ , відстань між модулями задано рівнянням:  $s_{rel}(\varphi) \approx L + r \cdot \cos(\varphi)$ .

Відносна швидкість модулів обчислюється через передавальну функцію:

$$\dot{s}_{rel} = -r \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\varphi}.$$

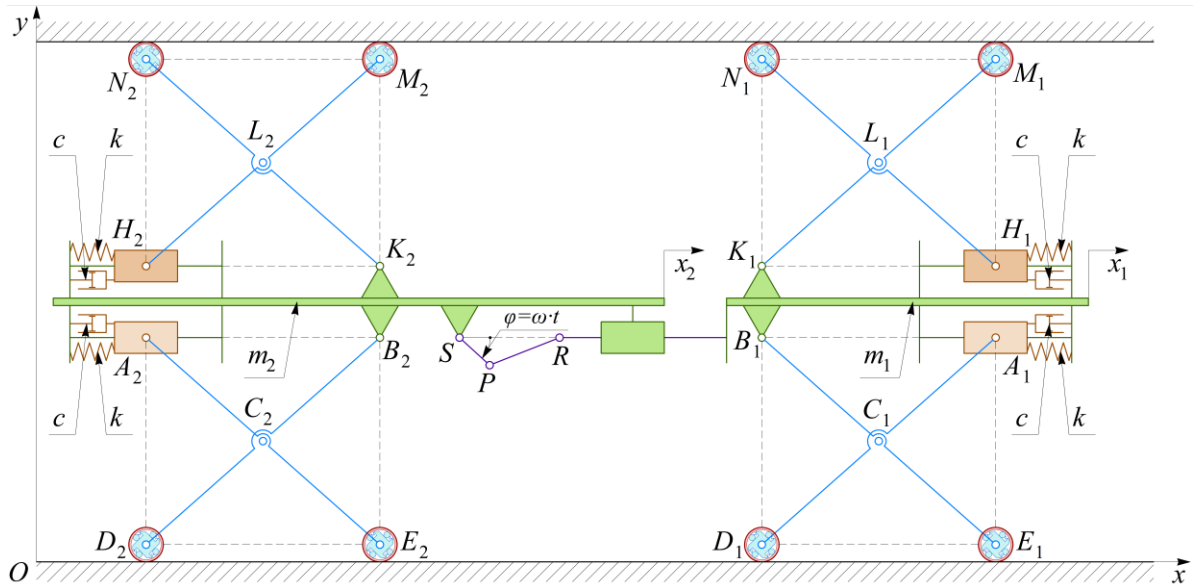


Рисунок 2. Кінематична схема механічної системи робота

Використовуючи рівняння Лагранжа другого роду, отримано гібридну математичну модель у вигляді єдиного кусково-неперервного диференціального рівняння:

$$I_{eff}(\varphi) \cdot \ddot{\varphi} + C_{eff}(\varphi, \dot{\varphi}) = Q_{total}(\varphi).$$

Змінна ефективна інерція  $I_{eff}(\varphi)$ , відцентровий доданок  $C_{eff}(\varphi, \dot{\varphi})$  та узагальнена активна сила  $Q_{total}(\varphi)$  є кусковими функціями, що перемикаються залежно від знаку  $\dot{s}_{rel}$ . Зокрема, для фази стиснення ( $\dot{s}_{rel} < 0$ ) ефективна інерція  $I_{eff}(\varphi) = I_S + m_2 \cdot r^2 \cdot \sin^2(\varphi)$ , відцентровий доданок  $C_{eff}(\varphi, \dot{\varphi}) = m_2 \cdot r^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2$ , а узагальнена сила  $Q_{total}(\varphi) = M - F_{r2} \cdot r \cdot \sin(\varphi)$ , де  $I_S$  – момент інерції приводу,  $M$  – крутний момент електродвигуна,  $F_{r2}$  – опір коченню. Для фази розширення ( $\dot{s}_{rel} > 0$ )  $I_{eff}(\varphi) = I_S + m_1 \cdot r^2 \cdot \sin^2(\varphi)$ ,  $C_{eff}(\varphi, \dot{\varphi}) = m_1 \cdot r^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2$ ,  $Q_{total}(\varphi) = M + F_{r1} \cdot r \cdot \sin(\varphi)$ . Цей підхід строго враховує взаємне переміщення інерційних мас при перемиканні між різними фазами руху.

Через розривність математичної моделі під час фазових переходів, чисельне інтегрування виконувалося в середовищі Wolfram Mathematica із застосуванням спеціалізованого алгоритму "StiffnessSwitching". Симуляція повністю підтвердила реалізацію переміщення робота типу «гусінь». Графіки макроскопічних переміщень переднього ( $x_1(t)$ ) та заднього ( $x_2(t)$ ) модулів мають яскраво виражений монотонно зростаючий «східчастий» характер (рис. 3а). Аналіз швидкостей довів ідеальну роботу муфт: модулі просуваються строго по черзі, а імпульси швидкостей ніколи не перекриваються у часі.



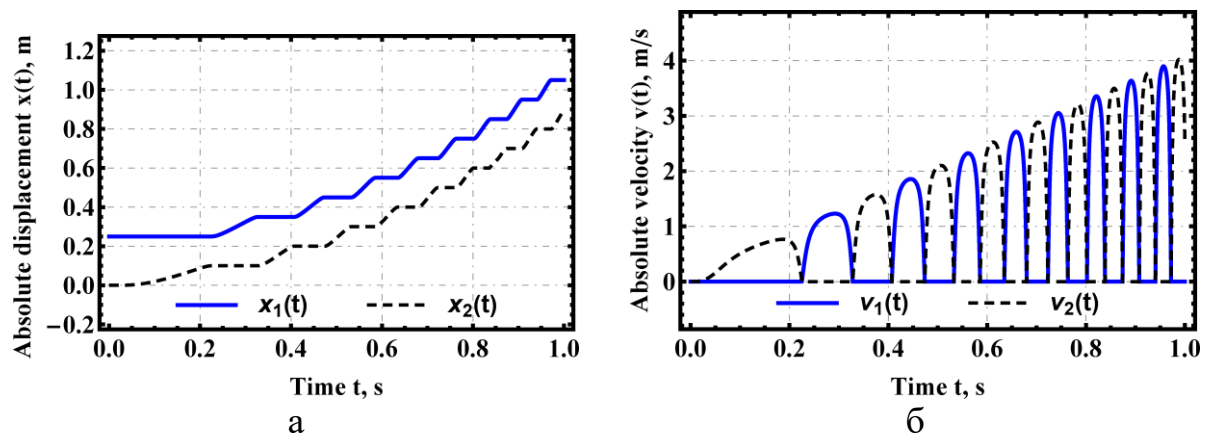


Рисунок 3. Часові залежності переміщень (а) та швидкостей (б) модулів робота

Однак кінетостатичний аналіз абсолютних прискорень виявив серйозну інженерну проблему. У точках фазових переходів (коли швидкість перетинає нуль) генеруються екстремальні перехідні піки пришвидшень, що сягають колосальних  $\pm 1000 \text{ м/с}^2$ . Це прямий математичний наслідок припущення про ідеальну жорсткість ланок та миттєве спрацювання неголономних в'язей (нескінченний ривок). З інженерної точки зору ці результати переконливо доводять, що побудова фізичного макета робота виключно на жорстких деталях швидко призведе до його втомного руйнування (зрізання осей, поломки шатунів та муфт) під впливом жорстких інерційних ударів.

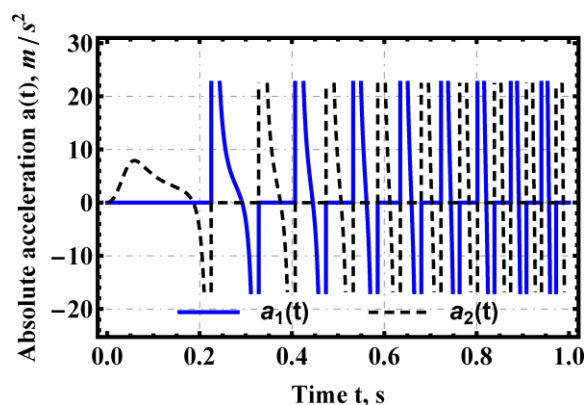


Рисунок 4. Часові залежності пришвидшень модулів робота

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

Розроблено та верифіковано комплексну гібридну кінетостатичну модель рушійної системи пасивно адаптивного робота. Інтеграція кривошипно-повзунного приводу з обгінними муфтами успішно і надійно трансформує обертовий рух вала електродвигуна у стабільний макроскопічний рух типу «гусінь» із чітким східчастим профілем переміщення.



Підтверджено ефективність важільного пантографного механізму для пасивного центрування робота всередині труби. Завдяки постійному збереженню паралельності осей коліс принципово усувається небезпека аварійного автоблокування (самозаклинювання) під час проходження звужень.

Дослідження ідеалізованої динамічної моделі виявило суворі віброударні обмеження системи. Миттєве блокування обгінних муфт (неголономних в'язей) генерує екстремальні інерційні удари та піки пришвидшень, що наближаються до  $\pm 1000 \text{ м/с}^2$ . Побудова фізичного прототипу на базі абсолютно жорстких ланок без урахування цих явищ неминуче призведе до стрімкого втомного руйнування конструкції механізму.

Перспективи подальших досліджень вимагають обов'язкового штучного введення механічної податливості (пружності) у кінематичний ланцюг. Наступні розробки повинні враховувати торсіонні демпфери у трансмісії та використання еластично-податливих обгінних муфт. Це дозволить суттєво пом'якшити ударні навантаження і розширить шляхи для створення повноцінного лабораторного експериментального прототипу робота.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Korendiy V., Yaniv O., Vilchynskiy T., Piharev V. Kinetostatic analysis of the propulsion system for a mobile in-pipe inspection robot // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник*. – 2025. – Вип. 59. – С. 10–25. <https://doi.org/10.23939/istcipa2023.59.010>
2. Korendiy V., Gurey V., Zelinskyi M., Heletiy V., Lanets O., Protasov R. Dynamic modeling of a passively adaptive in-pipe robot with inchworm locomotion // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2026. – Vol. 12, No 1. – P. 50–66. <https://doi.org/10.23939/ujmeme2026.01.050>
3. Korendiy V., Kachur O., Kyrychuk V., Markovych B. Mathematical modeling and computer simulation of locomotion conditions of vibration-driven robots // *Mathematical Modeling and Computing*. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – P. 1211–1220. <https://doi.org/10.23939/mmc2024.04.1211>
4. Korendiy V., Kotsiumbas O., Borovets V., Gurey V., Predko R. Mathematical modeling and computer simulation of the wheeled vibration-driven in-pipe robot motion // *Vibroengineering Procedia*. – 2022. – Vol. 44. – P. 1–7. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22832>

**Корендій В.М., Качур О.Ю., Пилип М.В., Карпин Р.Б.** (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна).

## **ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ПІКОВИХ МОМЕНТІВ І МОДЕЛЮВАННЯ «СТРЕС-ТРАЄКТОРІЙ» МАНІПУЛЯТОРА TELEMAX EVO PLUS**

**Анотація:** У статті розглянуто проблеми оцінювання пікових приводних моментів і чисельного моделювання «стрес-траєкторій» для маніпулятора Telex Evo Plus у процесі виконання складних технологічних операцій. Показано, що застосування спрощених кінематичних підходів призводить до суттєвого недооцінювання динамічних пікових навантажень у приводах, що може негативно впливати на надійність і безпеку роботи системи. Запропоновано підхід до побудови повної кінематико-динамічної моделі маніпулятора з урахуванням матриці інерції, матриці Коріоліса та вектора гравітаційних сил. Така модель дозволяє адекватно описати динамічні процеси, що виникають під час руху, та визначити реальні значення приводних моментів. Особливу увагу приділено моделюванню «стрес-траєкторій» як інструменту аналізу критичних режимів роботи маніпулятора. Отримані результати можуть бути використані для підвищення точності оцінювання навантажень, оптимізації траєкторій руху та забезпечення безпечного планування місії роботизованих систем спеціального призначення.

**Ключові слова:** маніпулятор; динамічне моделювання; пікові моменти; стрес-траєкторії; матриця інерції; матриця Коріоліса; робототехніка.

**Abstract:** This paper examines the challenges of estimating peak actuator torques and numerically modelling “stress trajectories” for the Telex Evo Plus manipulator during complex operational tasks. It is shown that simplified kinematic approaches significantly underestimate dynamic peak loads in actuators, which may adversely affect system reliability and operational safety. An approach to developing a full kinematic-dynamic model of the manipulator is proposed, taking into account the inertia matrix, the Coriolis matrix, and the gravity vector. Such a model enables accurate representation of dynamic processes occurring during motion and allows determination of realistic actuator torque values. Special attention is given to modelling “stress trajectories” as a tool for analyzing critical operating modes of the manipulator. The obtained results can be applied to improve load estimation accuracy, optimize motion trajectories, and ensure safe mission planning for specialized robotic systems operating under demanding conditions.

**Keywords:** manipulator; dynamic modelling; peak torques; stress trajectories; inertia matrix; Coriolis matrix; robotics.

### **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Маніпулятор наземного роботизованого комплексу Telex Evo Plus експлуатується в умовах підвищеного ризику, де виконуються операції з важкими вантажами та на великих вильотах стріли. Це породжує низку технічних проблем: виникнення пікових приводних моментів, підвищені інерційні та коріолісові навантаження, ризику перегріву та механічного

руйнування приводів, а також загроза втрати стійкості платформи. Існуючі підходи до планування траєкторій часто обмежуються кінематичними моделями і не дають адекватної оцінки динамічних піків у реальних «стрес-траєкторіях».

Ключові аспекти проблеми: 1) Невідповідність кінематичних оцінок динамічним вимогам – планування без урахування матриці інерцій  $M(q)$ , матриці Коріоліса  $C(q, \dot{q})$  та вектора гравітації  $G(q)$  призводить до недооцінки пікових моментів. 2) Невизначеність масо-інерційних параметрів ланок і вантажу ускладнює точну оцінку навантажень. 3) Взаємодія маніпулятора і шасі (перерозподіл маси, фліпери) змінює умови стійкості під час маневрів. 4) Практичні обмеження приводів (максимальні моменти, теплові ліміти, люфт редукторів) вимагають реалістичних граничних оцінок для безпечного планування місії.

Проблема поєднує класичні задачі механіки багатозв'язних систем (побудова матриці інерцій, обчислення Якобіанів, формування Christoffel-символів) з прикладними завданнями робототехніки: калібрування параметрів, чисельне моделювання «стрес-траєкторій» та розробка алгоритмів планування і контролю з урахуванням обмежень приводів. Практичні роботи з експлуатації наземних роботизованих комплексів (НРК) показують, що без інтегрованої кінематико-динамічної моделі неможливо гарантувати надійність у критичних сценаріях, а наукові дослідження в галузі ідентифікації параметрів, оптимізації траєкторій і адаптивного керування дають методичну базу для вирішення цих задач.

Результатом даного дослідження має стати інструментальна методика для оцінки і прогнозування пікових моментів у приводах, що дозволить: коректно підбирати приводи і редуктори, формувати безпечні режими експлуатації, зменшувати ризики аварій і простоїв, а також підвищувати ефективність виконання місій за рахунок оптимізованих траєкторій і адаптивного керування.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Останні дослідження у галузі кінематико-силового моделювання маніпуляторів та аналізу навантажень зосереджені на трьох взаємопов'язаних напрямках: 1) точна побудова кінематичних моделей і символна генерація виразів  $M(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$ ,  $G(q)$  для багатозв'язних систем з 6-ма ступенями вільності; 2) чисельне моделювання «стрес-траєкторій» з урахуванням змінного корисного навантаження, тертя та динаміки платформи; 3) експериментальна ідентифікація параметрів і розробка алгоритмів планування і контролю з обмеженнями на приводні моменти.

У роботі [1], присвяченій системам виявлення вибухонебезпечних об'єктів, розглядаються практичні вимоги до НРК та роль маніпуляторів у операціях із розмінування; автори підкреслюють необхідність інтегрованих моделей для безпечного планування місій. Дослідження [2] з проєктування системи керування для маніпуляторів-розміновувачів

демонструє застосування робастних алгоритмів і мультифізичного аналізу приводів, що важливо при оцінці пікових моментів і теплових обмежень приводів. Аналітичний розгляд кінематики маніпуляторів з 6-ма ступенями вільності із сферичним зап'ястям дає методичну базу для коректної D-H параметризації та побудови Якобіанів, необхідних для формування матриці інерцій і обчислення моментів [3]. Оцінка та експериментальна перевірка прототипів роботів-розміновувачів показують як конструктивні особливості платформи (вильоти, розташування центрів мас) впливають на пікові навантаження і ризики перекидання [4]. Праця [5] з контролю сил при двонаправленому керуванні демонструє підходи до обмеження і регулювання контактних сил, що корисно при розробці стратегій обмеження приводних моментів у «стрес-траєкторіях» маніпулятора.

Загалом, у роботах [1]-[5] підкреслюються такі практичні підходи: використання енергетичних методів (рівнянь Лагранжа) для отримання повної динамічної моделі; застосування символьних обчислень і CAS-середовищ для автоматичного виводу матриць і Якобіанів; чисельна перевірка пікових моментів на типових «стрес-траєкторіях»; порівняння аналітичних результатів з експериментальними або прототипними вимірами. Загальна тенденція – інтеграція моделювання з практичними вимогами до приводів і стійкості платформи, а також акцент на калібруванні моделі під реальні масо-інерційні параметри.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на численні публікації за даною тематикою, зокрема [1-5], залишаються ключові невирішені питання, що обмежують практичну застосовність існуючих моделей: відсутність експериментально підтверджених масо-інерційних параметрів ланок і типових вантажів ускладнює точну оцінку пікових моментів; неузгодженість простих статичних оцінок і результатів чисельного моделювання потребує чіткого визначення діапазонів застосовності кожного підходу; недостатньо враховано динамічну взаємодію маніпулятора з шасі (перерозподіл маси, фліпери) та її вплив на стійкість; у моделях не інтегровані нелінійні ефекти приводів (люфт редукторів, насичення моменту, теплові обмеження) і складні характеристики тертя; відсутні стендові випробування або HiL-тести для калібрування і верифікації моделі; не сформульовано й не вирішено задачу оптимального планування траєкторій з явними обмеженнями на моменти, енергію та стійкість; і, нарешті, бракує адаптивних або робастних стратегій керування, які гарантували б обмеження приводних моментів при змінній або невідомій масі вантажу.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою статті є розробка та верифікація повної кінематико-динамічної моделі маніпулятора Telemax Evo Plus з 6-ма ступенями вільності для коректної оцінки пікових приводних моментів під час «стрес-траєкторій» і обґрунтування безпечних режимів експлуатації.

Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі: побудувати D-H параметризацію та символні вирази матриць перетворень і Якобіанів; сформулювати через них матрицю інерцій  $M(q)$ , матрицю Коріоліса  $C(q, \dot{q})$  і вектор гравітації  $G(q)$ ; реалізувати чисельну модель у Wolfram Mathematica і провести моделювання типових «стрес-траєкторій» з варіацією корисного навантаження та тертя; виконати верифікацію моделі через статичні та енергетичні тести і порівняння з рекурсивними методами; розробити практичні рекомендації щодо обмежень моментів, підбору приводів і стратегій керування для зниження ризиків аварійних ситуацій.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розвиток безпілотних наземних транспортних засобів для завдань розмінування та роботи з небезпечними матеріалами розпочався ще у 1960–1970-х роках. Однак, сучасна генерація мобільних робоутів на кшталт Telemax Evo Plus (рис. 1) являє собою якісний стрибок у здатності виконувати складні маніпуляційні операції в небезпечних для людини умовах. Робот розроблений компанією Telerob GmbH (Німеччина), яка спеціалізується на розробці систем дистанційного керування механічними пристроями. У 2018 році Telerob була придбана компанією AeroVironment Inc. (США), що розширило можливості комерціалізації та технічної підтримки системи.

Типові сценарії застосування Telemax Evo Plus включають: виявлення, нейтралізація та утилізація вибухонебезпечних пристроїв; робота з хімічно небезпечними речовинами, їх транспортування та ізоляція; операції в умовах радіаційного, хімічного чи біологічного зараження; спеціальні операції правоохоронних органів у середовищах високого ризику.

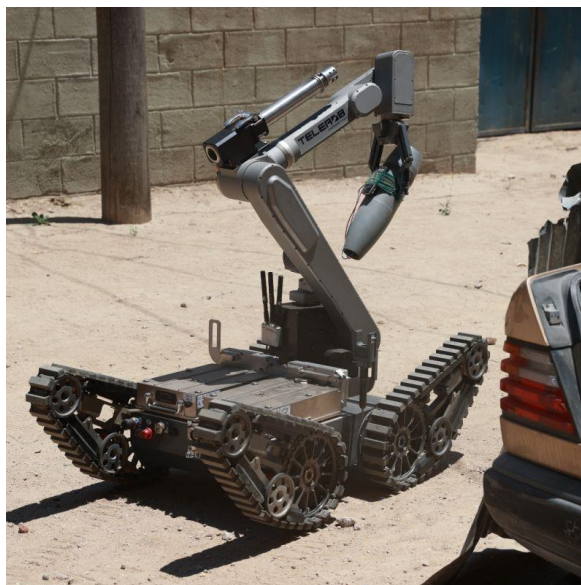


Рисунок 1. Приклад використання робота Telemax Evo Plus для розмінування



Мобільна основа робота (рис. 2) складається з наступних елементів. Чотири гусеничні модулі – кожний з них приводиться незалежним електродвигуном постійного струму та обладнаний редуктором для передачі крутного моменту на гусеницю. Система автоматичного вирівнювання – кожна гусениця має керований елемент, що виступає спереду і ззаду. Ці елементи можуть бути незалежно орієнтовані, що дозволяє роботу: долати сходи висотою до 400 мм; переходити щілини шириною до 500 мм; підніматися на схили крутизною 45°; утримувати стійку рівновагу на нерівному ґрунті. Автоматична система керування стійкістю – мікропроцесорна система постійно контролює положення шасі та розраховує необхідні кути поворотів фліперів для забезпечення стійкості, особливо при роботі маніпулятора з великих вильотів. Також робот оснащений системою автоматичної зміни інструментів, що дозволяє оператору дистанційно замінювати схоплювачі, інструменти або сенсори без необхідності повернення робота на базу.

Маніпулятор Telemax Evo Plus (рис. 3) являє собою відкритий кінематичний ланцюг, складений з послідовно з'єднаних ланок. Кінематична структура може бути представлена як: Основа → Шарнір 1 → Ланка 1 → Шарнір 2 → ... → Шарнір 6 → Кінцевий ефектор. Маніпулятор має 6 ступенів вільності, які розподіляються як: 3 ступені для позиціонування (переміщення кінцевого ефектора в просторі X, Y, Z); 3 ступені для орієнтації (обертання кінцевого ефектора для забезпечення потрібної орієнтації інструменту).

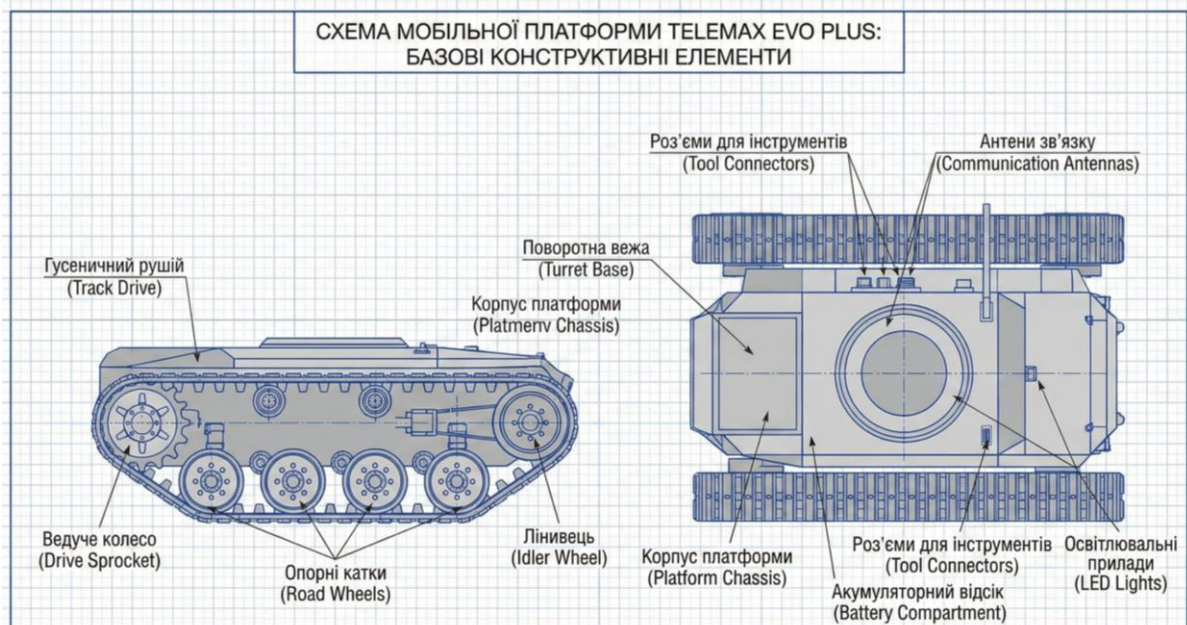


Рисунок 2. Конструкція мобільної платформи робота Telemax Evo Plus

Робоча зона маніпулятора визначається фізичними обмеженнями шарнірів та конструкцією ланок. Для Telemax Evo Plus розрізняють:

1. Досяжна робоча зона – множина всіх точок у просторі, які може досягти кінцевий ефектор при будь-якій орієнтації.

2. Гарантована робоча зона – більш вузька зона, у якій кінцевий ефектор може досягти будь-якої точки з довільної початкової конфігурації без проходження через сингулярні конфігурації.

3. Декстеритетна зона – область, де маніпулятор має високу маневреність та достатню швидкість руху.

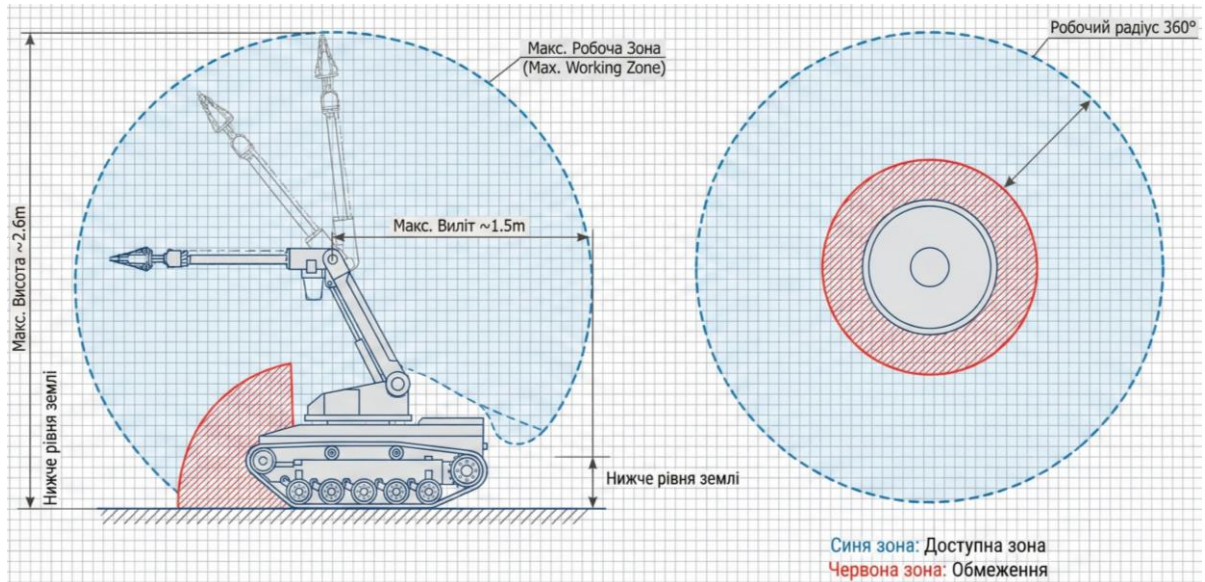


Рисунок 3. Загальний вигляд та робоча зона маніпулятора Telemax Evo Plus

### Проблеми оцінювання пікових моментів і моделювання «стрес-траєкторій» маніпулятора Telemax Evo Plus.

Оцінювання пікових моментів і моделювання «стрес-траєкторій» маніпулятора Telemax Evo Plus ускладнюється низкою технічних факторів: невизначеністю масо-інерційних параметрів ланок і вантажів, що призводить до похибок у матриці інерцій  $M(q)$  і, як наслідок, у прогнозах моментів; наявністю нелінійних ефектів приводів (люфт редукторів, насичення моменту, температурні обмеження) і складних моделей тертя; динамічною взаємодією маніпулятора з рухомою платформою та зміною стійкості при великих вильотах; впливом коріолісових і перехідних ефектів під час швидких маневрів; а також браком експериментальної верифікації моделі (стендові або HIL-випробування) для калібрування і підтвердження пікових навантажень – усе це ускладнює формулювання надійних обмежень на приводи і розробку безпечних траєкторій у реальних умовах.

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

Для надійної оцінки пікових моментів необхідна інтегрована кінематико-динамічна модель, що враховує масо-інерційні невизначеності, тертя та нелінійності приводів. Без експериментальної верифікації (стендові або HIL-тести) моделі залишаються недостатньо надійними для

формування жорстких обмежень приводів і гарантування стійкості платформи.

Перспективи подальших досліджень включають: 1) Експериментальна ідентифікація параметрів – стендові та НІЛ-випробування для калібрування масо-інерційних параметрів ланок і типових вантажів. 2) Моделювання нелінійностей приводів – включення люфту редукторів, насичення моменту, температурних ефектів і складних моделей тертя. 3) Оптимальне планування з обмеженнями – розробка алгоритмів траєкторій, що явно враховують обмеження на моменти, енергію та критерії стійкості платформи. 4) Адаптивні та робастні стратегії керування – контролери, які гарантують обмеження приводних моментів при змінній або невідомій масі вантажу. 5) Інтеграція маніпулятора і шасі – моделі взаємодії з рухомою платформою (перерозподіл маси, фліпери) для оцінки ризику перекидання під час маневрів. 6) Валідація у реальних сценаріях – польові випробування в типових умовах застосування (розмінування, робота з небезпечними речовинами) для перевірки практичності рекомендацій.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Pakhnyts I., et al. System for Detection and Identification of Potentially Explosive Objects // *Information Technology and Security*. – 2022. – Vol. 10, No. 2. – P. 15–28.
2. Karim F., Ahmed B., Hassan M. Sliding Mode Control Design for EOD Robot Manipulator and Multiphysic Analysis // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 128, No. 5–8. – P. 2315–2328.
3. Marques J. F., Silva F. J., Oliveira P. Kinematics Analysis of 6-DoF Articulated Robot with Spherical Wrist // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2021. – Vol. 142. – P. 103823.
4. Gutierrez M., Lopez J. C., Ramos R., Mendez A. Analysis and Evaluation of a EOD Robot Prototype // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 42895–42910.
5. Hernández-Ortiz Ó., González-Moscardo A., Soto-Villalobos J. A Simple Approach for the Force Control of Bilateral Teleoperated Manipulators // *Control Engineering Practice*. – 2020. – Vol. 104. – P. 104609.

УДК 629.33.048

**Корендій В.М., Федунішин Н.М., Пасіка В.Р.** (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна).

#### **УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕХАНІЗМ РУЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРЬОМА ПЕДАЛЯМИ АВТОМОБІЛЯ: СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ ТА КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ**

**Анотація:** У роботі обґрунтовано структуру шарнірно-важільного механізму для ручного керування трьома педалями автомобіля однією рукою, що є актуальним для підвищення доступності транспортних засобів для осіб з обмеженими



можливостями. Виконано структурний синтез механізму з урахуванням вимог до компактності, ергономічності та надійності функціонування. Отримано аналітичні залежності, що описують кінематичні параметри системи та дозволяють визначити зв'язок між переміщенням керуючого важеля та кутами повороту педалей. Проведено чисельне моделювання, результати якого підтвердили працездатність механізму та забезпечення необхідного діапазону кутів повороту педалей у межах  $24^{\circ}$ ... $64^{\circ}$ . Розроблено тривимірну модель механізму у програмному середовищі SolidWorks, що дозволяє оцінити компоновку та взаємодію елементів. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні допоміжних систем керування транспортними засобами та вдосконаленні існуючих технічних рішень.

**Ключові слова:** шарнірно-важільний механізм; ручне керування; педалі автомобіля; структурний синтез; кінематичний аналіз; ергономіка; SolidWorks.

**Abstract:** This paper substantiates the structure of a hinge-lever mechanism for one-handed manual control of three vehicle pedals, which is relevant for improving vehicle accessibility for people with limited mobility. Structural synthesis of the mechanism is performed, taking into account requirements for compactness, ergonomics, and operational reliability. Analytical relationships describing the kinematic parameters of the system are obtained, enabling determination of the relationship between the control lever displacement and pedal rotation angles. Numerical simulations confirm the operability of the mechanism and the required range of pedal rotation angles within  $24^{\circ}$ ... $64^{\circ}$ . A three-dimensional model of the mechanism is developed in the SolidWorks environment, allowing evaluation of layout and interaction between structural elements. The obtained results can be applied in the design of assistive vehicle control systems and improvement of existing engineering solutions in automotive ergonomics and adaptive control technologies.

**Keywords:** hinge-lever mechanism; manual control; vehicle pedals; structural synthesis; kinematic analysis; ergonomics; SolidWorks.

## Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.

В умовах зростання кількості осіб з порушеннями опорно-рухового апарату, зокрема внаслідок бойових дій в Україні, гостро постає проблема забезпечення таких водіїв безпечними та зручними засобами керування автомобілем. Стандартна конфігурація ножних педалей (акселератор, гальмо, зчеплення) є непридатною для людей з обмеженою рухливістю ніг, що унеможлиблює їхню незалежну мобільність і створює загрозу безпеці дорожнього руху.

Аналіз науково-технічної та патентної літератури [1]–[5] свідчить, що існуючі механізми ручного керування педалями мають суттєві недоліки: переважна більшість призначена лише для двох педалей (гальмо та акселератор), що обмежує їх застосування лише в автомобілях з автоматичною коробкою передач або в електромобілях. Окремі конструкції для трьох педалей вимагають використання обох рук водія, що безпосередньо знижує безпеку руху через неможливість одночасного перемикання передач.

Таким чином, існує науково-практичне протиріччя: з одного боку, потреба в ергономічному та безпечному ручному керуванні трьома педалями однією рукою, а з іншого – відсутність відповідних механізмів у сучасному машинобудуванні. Вирішення цієї проблеми потребує структурного синтезу та кінематичного аналізу нового багатоланкового шарнірно-важільного механізму, що є завданням даної роботи. Отримані результати мають безпосереднє практичне значення для створення адаптованих транспортних засобів для осіб з інвалідністю та розвитку інклюзивного автотранспорту.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз сучасного стану проблеми ручного керування автомобільними педалями показує, що більшість відомих технічних рішень спрямована на керування лише двома педалями – акселератором і гальмом. Так, у патенті [1] запропоновано систему з планетарним зубчастим механізмом, яка забезпечує високу точність дозування зусиль, однак не передбачає роботи з педаллю зчеплення. Патент [2] описує ручний пристрій, що дає змогу фіксувати положення педалей, але також обмежений двома педалями. У розробці [3] реалізовано можливість утримання педалей однією рукою, проте конструкція не охоплює зчеплення, що унеможливорює її використання на автомобілях з механічною коробкою передач.

Інші відомі рішення, хоча й демонструють різноманітні підходи до ручного керування, також мають суттєві недоліки. Патент [4] містить оригінальну двовісну конструкцію для керування акселератором і гальмом, але її адаптація до різних моделей автомобілів є складною, а керування зчепленням взагалі відсутнє. У публікації [5] представлено регульований за висотою блок керування, що дозволяє налаштовувати чутливість педалей індивідуально, однак цей пристрій, як і попередні, призначений лише для двох педалей. Таким чином, усі розглянуті аналоги [1]–[5] не забезпечують можливості одночасного ручного керування трьома педалями (акселератор, гальмо, зчеплення) однією рукою.

На відміну від них, у статті [6] авторами запропоновано принципово новий багатоланковий шарнірно-важільний механізм, який дозволяє водієві однією рукою керувати одразу трьома педалями.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на запропоноване удосконалення конструкції механізму ручного керування трьома педалями, залишаються невирішеними такі аспекти загальної проблеми: відсутність експериментального підтвердження працездатності розробленого механізму на реальному

транспортному засобі; необхідність адаптації геометричних параметрів механізму до різних моделей автомобілів (з різним розташуванням педальних вузлів); потреба в дослідженні динамічних характеристик (зусиль на рукоятці, швидкості спрацьовування педалей, вібраційних навантажень) для забезпечення плавності ходу та комфорту водіння; відсутність стандартизованих методик налаштування та сертифікації таких пристроїв для використання особами з інвалідністю; а також недостатнє вивчення ергономічних факторів (тривале утримання рукоятки, втомлюваність м'язів руки, швидкість реакції при аварійному гальмуванні). Вирішення цих завдань потребує подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою даної статті є обґрунтування структури удосконаленого багатоланкового шарнірно-важільного механізму для ручного керування трьома педалями автомобіля однією рукою водія та виконання його кінематичного аналізу для визначення основних параметрів руху педалей за різних керуючих впливів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: виконати структурний синтез запропонованого механізму, вивести аналітичні залежності для визначення координат ланок та кутів повороту педалей, здійснити чисельне моделювання кінематичних характеристик, а також розробити 3D-модель пристрою та сформулювати рекомендації щодо його практичної реалізації.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

У результаті патентного огляду та структурного синтезу запропоновано новий багатоланковий шарнірно-важільний механізм для ручного керування трьома педалями автомобіля (акселератор, гальмо, зчеплення) однією рукою. Механізм (рис. 1) складається з восьми рухомих ланок ( $n = 8$ ), п'яти кінематичних пар V класу ( $p_5 = 5$  – повзун  $B_3$  та чотири циліндричні шарніри  $O_1, O_2, O_3, O_4$ ) та шести пар III класу ( $p_3 = 6$  – сферичні шарніри  $B_2, B_3, B_4, A_2, A_3, A_4$ ). За формулою Малишева обчислено ступінь вільності:

$$W = 6n - 5p_5 - 3p_3 = 6 \cdot 8 - 5 \cdot 5 - 3 \cdot 6 = 48 - 25 - 18 = 5.$$

Три з цих ступенів відповідають обертанню тяг  $B_2A_2$ ,  $B_3A_3$  та  $B_4A_4$  навколо власних осей, що не впливає на рух педалей. Узагальненими координатами обрано кут нахилу рукоятки  $\varphi_1$  та відстань  $l_{O_1B_3}$  (положення повзуна гальма).

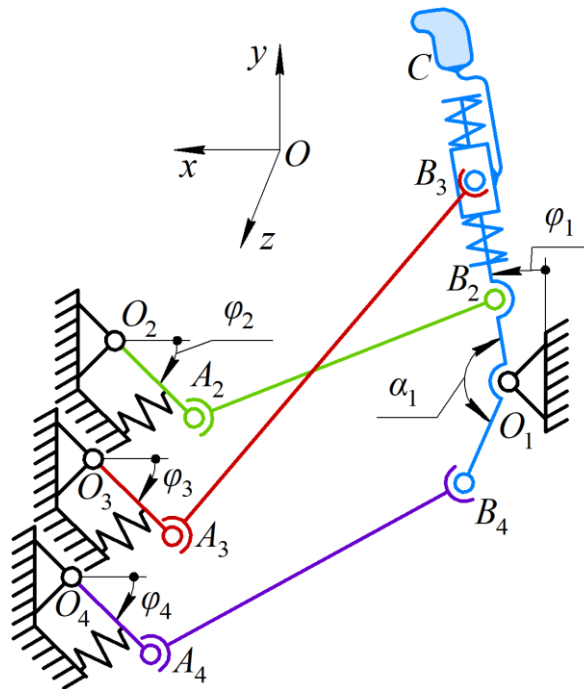


Рисунок 1. Структурна схема запропонованого механізму

Для кінематичного аналізу виведено рівняння руху сферичних шарнірів  $B_2, B_3, B_4$ :

$$x_{B_2} = x_{O_1} + l_{O_1 B_2} \sin \varphi_1, y_{B_2} = y_{O_1} + l_{O_1 B_2} \cos \varphi_1, z_{B_2} = \text{const};$$

$$x_{B_3} = x_{O_1} + l_{O_1 B_3} \sin \varphi_1, y_{B_3} = y_{O_1} + l_{O_1 B_3} \cos \varphi_1, z_{B_3} = \text{const};$$

$$x_{B_4} = x_{O_1} + l_{O_1 B_4} \sin(\alpha + \varphi_1), y_{B_4} = y_{O_1} + l_{O_1 B_4} \cos(\alpha + \varphi_1), z_{B_4} = \text{const},$$

де  $\alpha = 180^\circ$ . Координати шарнірів  $A_2, A_3, A_4$  (з'єднання штовхачів з педалями) знаходяться шляхом розв'язання систем двох рівнянь замкнених векторних контурів для кожної педалі, наприклад для педалі акселератора:

$$\{(x_{A_2} - x_{B_2})^2 + (y_{A_2} - y_{B_2})^2 + (z_{A_2} - z_{B_2})^2 - l_{A_2 B_2}^2 = 0,$$

$$\{(x_{A_2} - x_{O_2})^2 + (y_{A_2} - y_{O_2})^2 + (z_{A_2} - z_{O_2})^2 - l_{A_2 O_2}^2 = 0.$$

Аналогічні системи записано для педальей гальма (6) та зчеплення (7).

Кути повороту педальей  $\varphi_i$  ( $i = 2, 3, 4$ ) визначаються як

$$\varphi_i = \arctg \frac{y_{O_i} - y_{A_i}}{x_{O_i} - x_{A_i}}.$$

Чисельне моделювання у Wolfram Mathematica (при заданих геометричних параметрах) дозволило отримати наступні графічні залежності. При зміні кута  $\varphi_1$  від  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$  (рис. 2, б) кут педалі акселератора  $\varphi_2$  зростає з  $24^\circ$  до  $64^\circ$ , а кут педалі зчеплення  $\varphi_4$  спадає з  $64^\circ$  до  $24^\circ$ , що забезпечує узгоджене перемикання передач. Траєкторії шарнірів  $A_2$  та  $A_4$  (рис. 2, а) мають дугоподібну форму з діапазоном переміщень по вертикалі приблизно від  $-236$  до  $-161$  мм та від  $-300$  до  $-205$  мм відповідно.

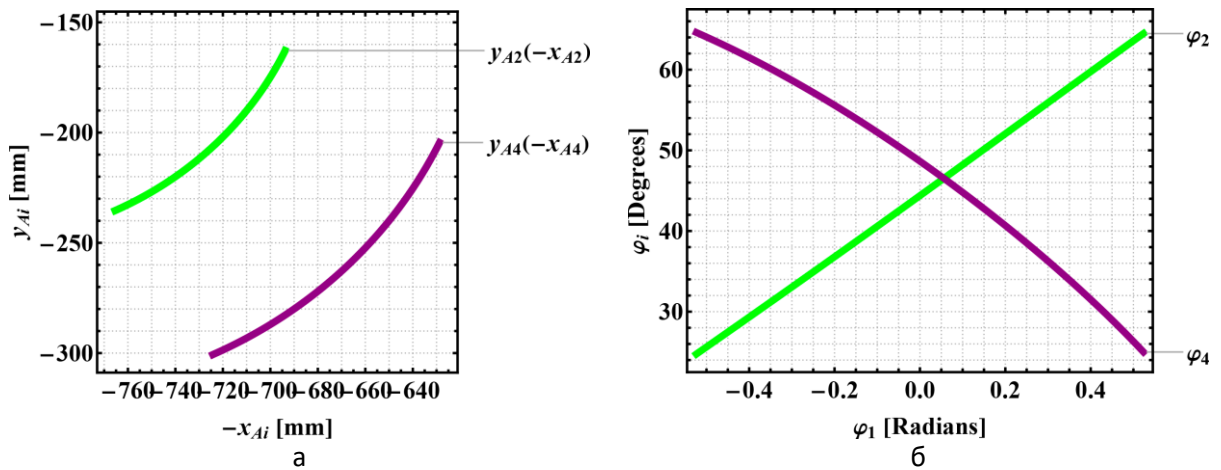


Рисунок 2. Кінематичні характеристики педалей акселератора та зчеплення: а – траєкторії шарнірів, що з'єднують педалі з тягами; б – залежності кутів повороту педалей від кута нахилу рукоятки керування

Для гальма (рис. 3, а) встановлено, що переміщення повзуна  $l_{O_1B_8}$  змінюється від 110 мм (при  $\varphi_1 = -30^\circ$ ) до 420 мм (при  $\varphi_1 = +30^\circ$ ), а кут повороту педалі гальма  $\varphi_3$  (рис. 4, а) варіюється в тих самих межах  $24^\circ \dots 64^\circ$ . Траєкторія шарніра  $A_3$  (рис. 4, б) проходить між точками з координатами (690; -380) мм (нижнє положення) та (546; -232) мм (верхнє положення).

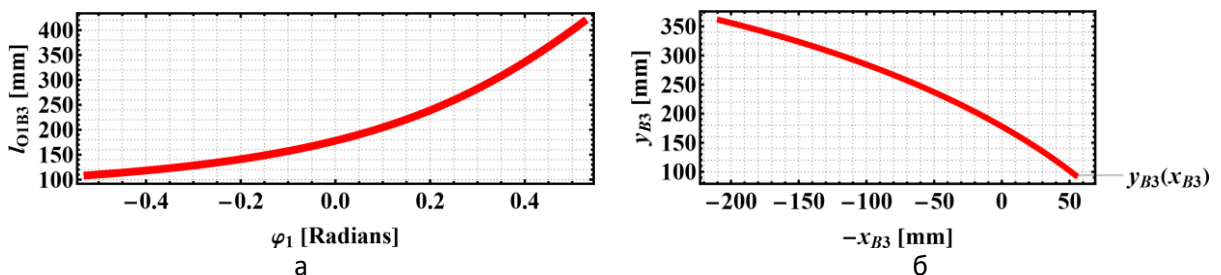


Рисунок 3. Кінематичні характеристики рукоятки гальма:  
а – залежність переміщення повзуна рукоятки від її кута нахилу;  
б – траєкторія повзунка рукоятки гальма

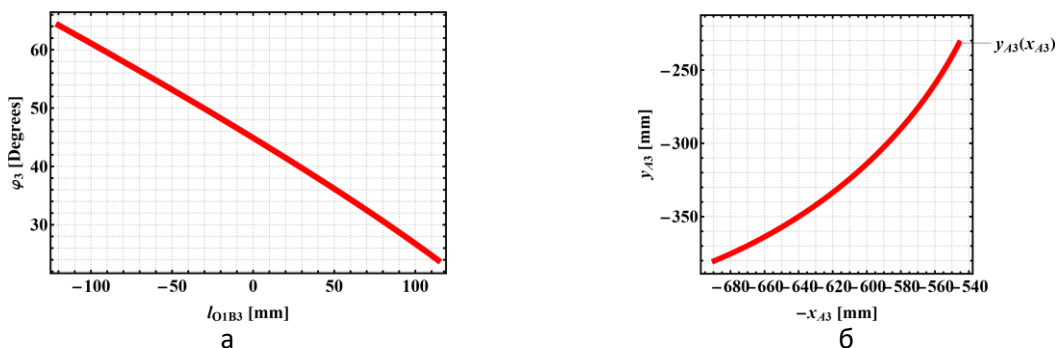


Рисунок 4. Кінематичні характеристики педалі гальма:  
а – залежність кута повороту педалі гальма від положення повзуна рукоятки; б – траєкторія шарніра педалі гальма

На основі проведених розрахунків у програмному продукті SolidWorks розроблено 3D-модель механізму (рис. 5). Основні конструктивні елементи: рукоятка 1, закріплена на повзуні 16, яка може вільно переміщуватися вздовж напрямної, стискаючи пружини 2 і 15; храповий механізм 12 дозволяє фіксувати рукоятку в будь-якому кутовому положенні без постійного утримання рукою; сферичні шарніри 3, 6, 13 з'єднують тяги 4 (гальмо), 5 (акселератор) та 7 (зчеплення) з відповідними педалями через шарніри 8, 9, 10. Принцип роботи: натискання рукоятки вперед активує педаль акселератора та відпускає зчеплення; потяг рукоятки на себе – вимикає зчеплення та відпускає «газ»; вертикальне натискання (вниз) – активує гальмо. Завдяки такому компонованню водій однією рукою може повністю керувати трьома педалями, що значно підвищує безпеку та доступність керування для осіб з обмеженими фізичними можливостями.

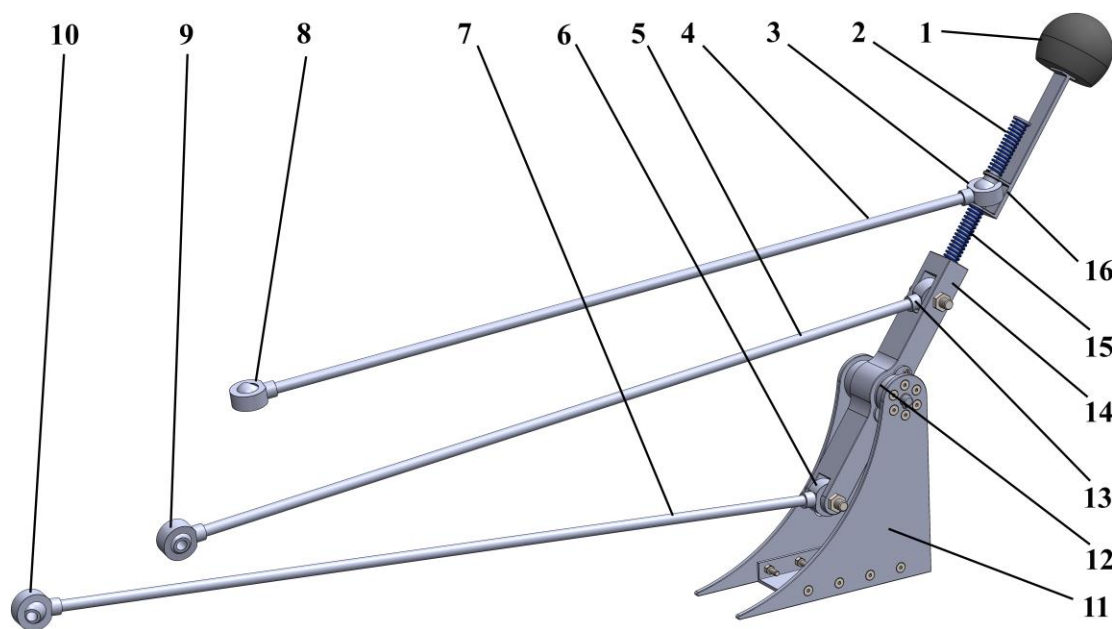


Рисунок 5. 3D-модель удосконаленого механізму ручного керування трьома педалями автомобіля

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

У результаті виконаної роботи обґрунтовано структуру удосконаленого шарнірно-важільного механізму для ручного керування трьома педалями автомобіля (акселератор, гальмо, зчеплення) однією рукою водія. На відміну від більшості існуючих аналогів, які забезпечують роботу лише з двома педалями або вимагають використання обох рук, запропонований механізм має п'ять ступенів вільності (з урахуванням обертання тяг навколо поздовжніх осей) і дозволяє реалізувати повний цикл керування автомобілем з механічною коробкою передач. Кінематичний аналіз підтвердив, що при зміні кута нахилу рукоятки в діапазоні  $-30^\circ \dots +30^\circ$  кути повороту педалей змінюються в межах  $24^\circ \dots 64^\circ$ , чого достатньо для надійного спрацьовування вузлів

акселератора, гальма та зчеплення. Розроблена 3D-модель механізму у програмному продукті SolidWorks наглядно демонструє його конструктивну реалізацію з використанням сферичних шарнірів, храпового фіксатора та пружинного поворотника, що забезпечує зручність і безпеку керування для осіб з обмеженими фізичними можливостями.

Подальші дослідження передбачають виготовлення експериментального прототипу розробленого механізму та його стендові випробування для визначення реальних динамічних характеристик (зусилля на рукоятці, час спрацьовування педалей, вібраційна стійкість). Також необхідно провести адаптацію геометричних параметрів механізму до різних моделей автомобілів (з різним компонованням педальних вузлів) та розробити методику налаштування пристрою під індивідуальні антропометричні дані водія. Окремим напрямом є ергономічні дослідження тривалого використання пристрою (втомлюваність м'язів руки, швидкість реакції при аварійному гальмуванні), що дозволить підвищити комфорт та безпеку водіння для людей з інвалідністю. Результати роботи можуть бути використані інженерами та дослідниками при створенні серійних систем ручного керування для адаптованого автотранспорту.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Nolan K. P., Wong V., Knight C. T. System for actuating vehicle brake and accelerator pedals by hand : *патент US 11,815,930 B1. США. 2023. (in English).*
2. Birkelund M. Clickable hand control device in a vehicle : *патент US 9,969,401 B2. США. 2018. (in English).*
3. Park Y.-I. An apparatus for assisting driving : *патент KR 2022-0142332 A. Південна Корея. 2022. (in Korean).*
4. Knon B. Operating device of a motor vehicle for the manual operation of an accelerator pedal and a brake pedal : *патент DE 10 2015 213 131 A1. Німеччина. 2017. (in German).*
5. Xinguang L. Control device for automobile manual driving : *патент CN 106427564 A. Китай. 2016. (in Chinese).*
6. Korendiy V., Fedunyshyn N., Kozub V. Justifying the structure of the improved mechanism for manual control of motor vehicles' pedals. *Transport Technologies. 2024. Vol. 5, No. 2. P. 75–87. <https://doi.org/10.23939/t2024.02.075>*

**Косарєв В.С., Чучин О.В., Хмарський Д.П.** (Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПОЕТАПНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ З ФЛАНЦЕМ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**Анотація:** У роботі виконано теоретичний аналіз процесу поетапного холодного видавлювання порожнистих деталей типу «стакан з фланцем» із використанням методу скінчених елементів. Моделювання процесу здійснено у програмному середовищі DEFORM 2D з урахуванням реальних умов деформування заготовки. Показано, що традиційні технології комбінованого зворотно-радіального видавлювання супроводжуються неповним заповненням фланцевої зони та утворенням дефектів типу «простріл». Запропоновано застосування поетапного видавлювання, що забезпечує більш рівномірний розподіл матеріалу та покращення якості формоутворення. У ході дослідження проаналізовано викривлення ділильної сітки, розподіл інтенсивності деформацій та напружень у поперечному перерізі заготовки. Отримані результати підтверджують ефективність поетапного підходу та дозволяють оцінити напружено-деформований стан матеріалу на різних стадіях процесу. Результати можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів холодного видавлювання та підвищення якості деталей.

**Ключові слова:** холодне видавлювання; поетапне деформування; метод скінчених елементів; DEFORM 2D; напружено-деформований стан; фланець; дефекти формоутворення.

**Abstract:** This paper presents a theoretical analysis of the step-by-step cold extrusion process of hollow parts such as a “cup with a flange” using the finite element method. The process is simulated in the DEFORM 2D software environment, taking into account realistic deformation conditions of the billet. It is shown that traditional combined backward–radial extrusion is characterized by incomplete filling of the flange zone and the formation of defects such as breakthrough. The application of a step-by-step extrusion method is proposed to ensure more uniform material flow and improved forming quality. The study analyzes the distortion of the division grid, as well as the distribution of strain intensity and stress intensity within the cross-section of the deforming billet. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach and provide insight into the stress-strain state at different stages of the process. These findings can be applied to optimize technological parameters of cold extrusion and improve the quality of manufactured parts.

**Keywords:** cold extrusion; step-by-step forming; finite element method; DEFORM 2D; stress-strain state; flange; forming defects.

У промисловості широко застосовуються порожнисті деталі, в тому числі з фланцем, які, як правило, виготовляються обробкою різанням. Разом з тим, подібні деталі можна виготовляти в процесах холодного видавлювання, забезпечуючи при цьому високу якість поверхні та доволі високу точність розмірів, що зменшує або повністю виключає необхідність у додатковій обробці різанням [1, 2].

Найбільш поширеним (традиційним) способом видавлювання є



поздовжнє (зворотнє та пряме), для якого характерна течія металу вздовж осі симетрії. Тому деталі, які можуть бути виготовлені поздовжнім видавлюванням, відзначаються простотою форми [1].

Комбінування схем поздовжнього і поперечного (радіального та бокового) видавлювання дозволяє виготовляти більш складні за формою деталі (наприклад, з фланцями або відростками) [2, 4].

Метою даної роботи є теоретичні дослідження процесу поетапного холодного видавлювання деталі «Стакан з фланцем» за допомогою методу скінчених елементів в програмі DEFORM 2D та порівняння цього процесу з традиційним способом виготовлення цих деталей комбінованим зворотно-радіальним видавлюванням.

Теоретичний аналіз виготовлення холодним видавлюванням деталі типу стакан з фланцем був зроблений за допомогою методу скінчених елементів в програмі DEFORM 2D. Дана програма є ефективним інструментом проведення комп'ютерних експериментів із процесами видавлювання у порівнянні з реальними експериментами, завдяки швидкості розрахунків, відсутності потреби в виготовленні штампового оснащення та застосування обладнання [4].

В якості заготовки використовувалась циліндрична заготовка з алюмінієвого сплаву Al 1100 Cold (рис. 1) з наступними розмірами: діаметр  $D = 36$  мм ( $D = 2R$ ); висота  $L = 32$  мм. Інші граничні умови для скінчено елементного аналізу: модуль Юнга – 68900 МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,33; початкова температура заготовки – 20°C. Тертя на поверхнях контакту заготовки, яка деформується, з інструментами враховувалось згідно закону Зібеля ( $\mu = 0,08$ ).

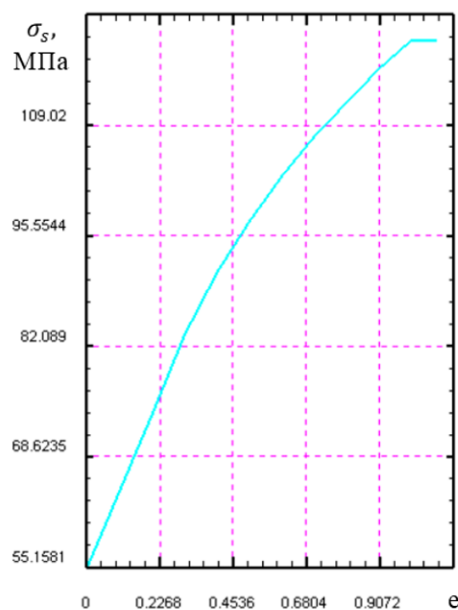


Рисунок 1. Діаграма істинних напружень текучості для алюмінієвого сплаву Al 1100 Cold

Традиційно деталь «Стакан з фланцем» виготовляють комбінованим зворотно-радіальним видавлюванням (рис. 2) за рахунок переміщення тільки верхнього пуансону з швидкістю  $V_1 = 1$  мм/с при ході  $S = 21$  мм.

У процесі деформування матеріал заготовки витікає одночасно у напрямку поздовжньої вісі пуансону (утворюється стінка стакану) і радіальному напрямку (формується фланець).

При цьому не заповнення матеріалом заготовки фланцевої зони можна спостерігати вже на початкових стадіях видавлювання. Недостатній об'єм матеріалу заготовки для утворення фланцю призводить до утворення дефекту типу простріл (рис. 2).

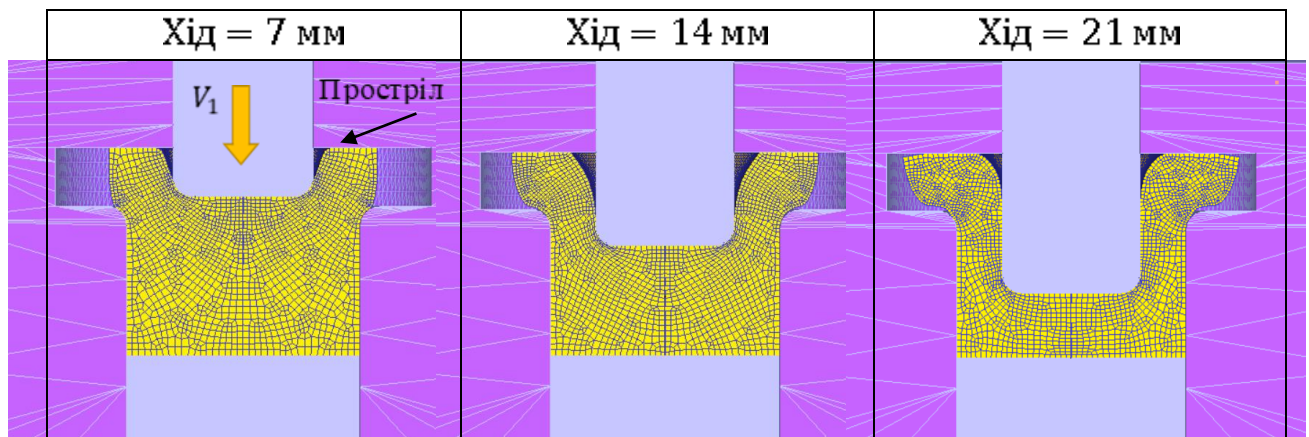


Рисунок 2. Викривлення ділильної сітки на різних стадіях комбінованого зворотно-радіального видавлювання деталі «Стакан з фланцем»

Для вирішення зазначеної проблеми запропонований спосіб поетапного видавлювання деталі «Стакан з фланцем» (рис. 3), який передбачає розбивку процесу формоутворення на окремі стадії, що дозволяє більш керовано здійснювати перерозподіл матеріалу заготовки.

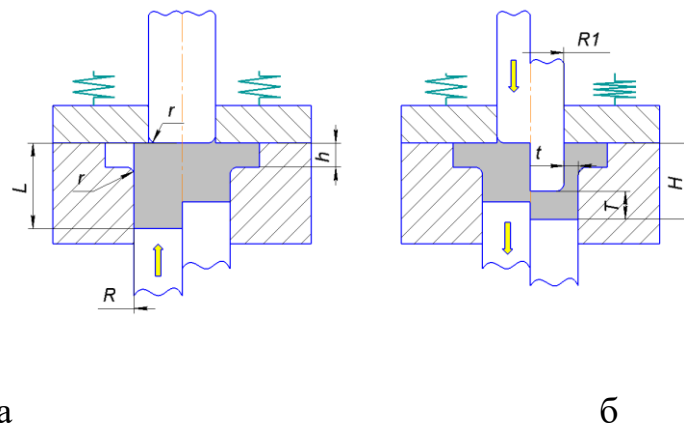


Рисунок 3. Схеми видавлювання деталі «Стакан з фланцем» на початковій (а) та кінцевій (б) стадіях

Значення геометричних розмірів наступні (див. рис. 3): радіус заготовки  $R = 18$  мм; радіус верхнього пуансону  $R1 = 12,6$  мм; радіус округлення інструментів  $r = 3$  мм; товщина дна стакану  $T = 6$  мм; товщина стінки стакану  $t = 5,4$  мм; висота фланцю  $h = 9$  мм, висота деталі  $H = 29$  мм.

На схемах рис. 3 позначені: 1 – заготовка; 2 та 3 – відповідно верхній та нижній пуансони; 4 та 5 – відповідно верхня та нижня напівматриці; 6 – деталь.

На першій стадії виготовлення деталі «Стакан з фланцем» (див. рис. 3,а) завдяки переміщенню нижнього пуансону 3 на величину  $S = 14$  мм з швидкістю  $V_1 = 1$  мм/с (верхній пуансон 2 при цьому нерухомий) відбувається формоутворення фланцю без дефектів та затисків.

На другій стадії (див. рис. 3,б) переміщуються одночасно в одному напрямку пуансон 2 на величину  $S = 17$  мм з швидкістю  $V_1 = 1$  мм/с та пуансон 3 на величину  $S = 6$  мм з швидкістю  $V_2 = 0,36$  мм/с. В результаті отримали деталь «Стакан з фланцем» без будь-яких дефектів.

Аналіз викривлення ділильної сітки, розподілу інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  та інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , (МПа) в перетині заготовки, яка деформується, представлений на рис. 4.

Результати аналізу показали, що наприкінці початкової стадії видавлювання в зоні фланцю стакану дефекти відсутні, максимальне значення інтенсивності деформації  $\epsilon_i = 2,0$  та максимальне значення інтенсивності напружень  $\sigma_i = 130$  МПа зосереджені біля верхньої частини фланцю.

Результати аналізу наприкінці кінцевої стадії видавлювання показали, що отримана деталь «Стакан з фланцем» з потрібними кінцевими розмірами і без дефектів, максимальні значення інтенсивності деформації  $\epsilon_i = 2,5$  зосереджені біля верхньої частини фланцю та на внутрішній поверхні отвору стакану, а максимальні значення інтенсивності напружень  $\sigma_i = 136$  МПа зосереджені в донній частині стакану.

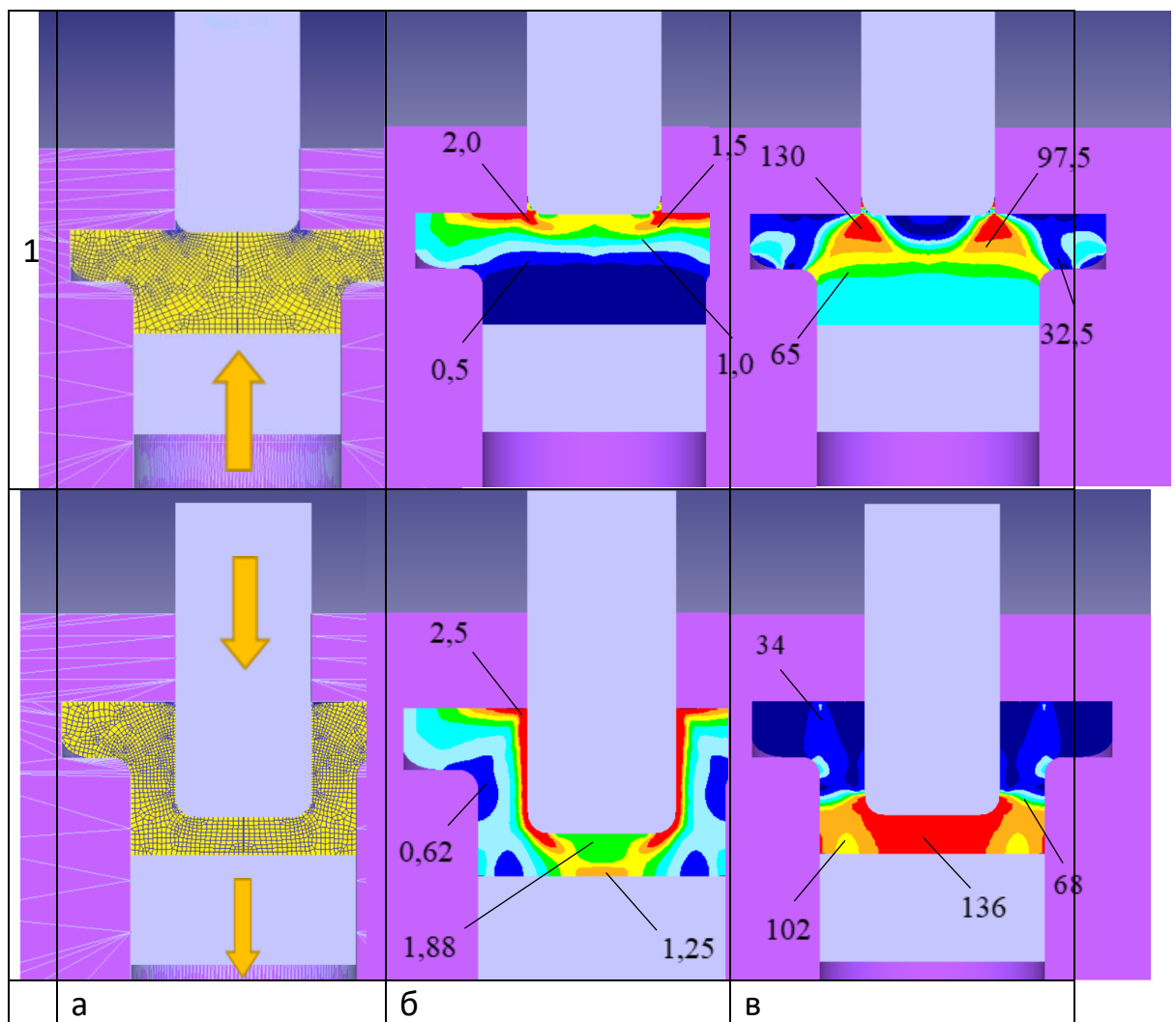


Рисунок 4. Викривлення ділильної сітки (а), розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  (б), розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , МПа (в) в перетині заготовки, яка деформується, на початковій (1) та кінцевій (2) стадіях

## ВИСНОВКИ

Для теоретичних досліджень процесу виготовлення холодним видавлюванням деталі «Стакан з фланцем» з алюмінієвого сплаву Al 1100 Cold була використана програма DEFORM 2D, яка базується на методі скінченних елементів. При виготовленні деталі «Стакан з фланцем» традиційним комбінованим зворотно-радіальним видавлюванням виникають різні дефекти.

Бездефектне виготовлення цих деталей стало можливим завдяки використанню способу поетапного видавлювання деталі: на першій стадії завдяки переміщенню тільки нижнього пуансону формується фланець, а на другій стадії завдяки переміщенню одночасно в одному напрямку двох пуансонів формується повністю деталь «Стакан з фланцем».

Результати теоретичного аналізу способу поетапного видавлювання

деталі «Стакан з фланцем» показали, що максимальні значення інтенсивності деформації  $\varepsilon_i = 2,5$  зосереджені біля верхньої частини фланцю та на внутрішній поверхні отвору стакану, а максимальні значення інтенсивності напружень  $\sigma_i = 136$  МПа зосереджені в донній частині стакану. Знання цієї інформації в практичній діяльності на виробництві дозволять підвищити якість виробництва деталей «Стакан з фланцем» та зробити вибір відповідного матеріалу для інструментів.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Алієва Л. Технологічні можливості комбінованого радіально-поздовжнього екструзійного процесу / Лейла Алієва, Христина Гончарук // XVIII Міжнародна наукова конференція Нові технології та досягнення в металургії, матеріалознавство та виробнича інженерія. – Серія: Монографії. – №68. – Ченстохова, 2017. – С. 102–107.
2. Алієва Л. І. Технологічні можливості процеси комбінованого радіально-продольного видавлювання / Л. І. Алієва // Технологічні системи. – 2017. – №1 (78). – С. 31–40. – URL: [http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78\\_4.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2017/files/ts78_4.pdf).
3. Алієва Л. І. Процеси комбінованого деформування і видавлювання // Обробка матеріалів тиском : сб. науч. тр. – Краматорськ : ДГМА, 2016. – №1 (42). – С. 100–108.
4. Алієва Л. І., Алієв І. С., Грудкіна Н. С., Малій Х. В. Моделювання процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання деталей з фланцем // Обробка матеріалів тиском. – 2019. – № 1 (48).

УДК 004.8:623.4:621

**Костира С.В., Шумлянський С.В., Будз В.П.** (Науково-дослідний центр Держспецтрансслужби, Дніпро, Україна).

#### ЗАСТОСУВАННЯ SPOTLIGHT AI У СИСТЕМАХ РОБОТИЗОВАНОГО НЕТЕХНІЧНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

**Анотація:** Система *Spotlight AI* є сучасним програмним рішенням, яка використовує алгоритми штучного інтелекту для аналізу зображень аерофотознімків отриманих з безпілотних літальних апаратів та з дистанційно керованих платформ. Система використовує нейронні мережі, які здатні виявляти характерні ознаки вибухонебезпечних предметів. Обробка великих масивів геопросторових даних дозволяє створювати детальні карти ризику, які значно підвищують ефективність нетехнічного обстеження територій та прискорюють процес гуманітарного розмінування. При цьому система не замінює фахівця з розмінування, а виступає допоміжним інструментом для оцінки небезпеки на основі аналізу отриманих даних. Інтеграція результатів роботи *Spotlight AI* у геоінформаційні системи забезпечує прозорість та чітке документування процесу обстеження забруднених територій. Це дозволяє оптимізувати використання необхідних ресурсів та підвищити рівень безпеки для фахівців з розмінування.

**Ключові слова:** гуманітарне розмінування, штучний інтелект, безпека фахівців з розмінування, вибухонебезпечні предмети, *Spotlight AI*, аерофотознімки.

**Abstract:** *The Spotlight AI system is a modern software solution that utilizes artificial intelligence algorithms to analyze aerial imagery obtained from unmanned aerial vehicles and remotely piloted platforms. The system employs neural networks capable of detecting characteristic features of explosive hazards. Processing large sets of geospatial data allows for the creation of detailed risk maps, which significantly increase the efficiency of non-technical surveys and accelerate the humanitarian demining process. At the same time, the system does not replace a demining expert but acts as an auxiliary tool for hazard assessment based on data analysis. Integrating Spotlight AI outputs into geographic information systems ensures transparency and clear documentation of the survey process for contaminated areas. This optimizes resource allocation and enhances the safety level for demining specialists.*

**Keywords:** *humanitarian demining, artificial intelligence, demining specialist safety, explosive hazards, Spotlight AI, aerial imagery.*

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

З початку повномасштабної агресії РФ проти України понад 170 000 км<sup>2</sup> української території забруднені вибухонебезпечними предметами. Тому постала необхідність у впровадженні роботизованих систем у процеси гуманітарного розмінування. Традиційні методи обстеження території повільні і потребують значних часових та людських ресурсів. Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), сенсорних систем та технологій штучного інтелекту відкриває нові можливості для автоматичного збору та обробки даних. Відповідно до вимог International Mine Action Standards, ключовим етапом є аналіз даних для підтримки прийняття рішень, що визначає актуальність використання програмного забезпечення Spotlight AI.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Сучасні наукові дослідження у сфері протимінної діяльності спрямовані на інтеграцію роботизованих платформ, геоінформаційних систем та алгоритмів машинного навчання [1]. Особлива увага приділяється використанню БПЛА для отримання аерофотознімків та їх подальшої обробки за допомогою штучного інтелекту. У роботах вітчизняних і зарубіжних авторів підкреслюється необхідність створення систем підтримки прийняття рішень, які здатні аналізувати великі обсяги даних [2]. Проте практичне застосування таких рішень, як Spotlight AI, у структурі нетехнічного обстеження залишається недостатньо висвітленим.

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на швидкий розвиток різноманітних роботизованих технологій, залишається відкритим питання ефективної інтеграції AI-систем у процеси протимінної діяльності. Недостатньо досліджена їх роль у нетехнічному обстеженні, відсутні оцінки ефективності роботи, тому необхідно чітко встановити взаємодію між фахівцем з розмінування та автоматизованими системами. Крім того, не визначений потенціал

використання подібних рішень у складі комплексних роботизованих платформ.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою роботи є визначення можливостей застосування Spotlight AI у системах роботизованого нетехнічного обстеження територій.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Обмеження ручного нетехнічного обстеження територій.** У системі гуманітарного розмінування нетехнічне обстеження є основним етапом, який визначає подальші дії при розмінуванні. Воно передбачає збір, узагальнення та аналіз інформації стосовно потенційного забруднення територій вибухонебезпечними предметами без застосування технічних засобів пошуку. Як правило, цей процес включає опитування місцевого населення, аналіз архівних і бойових даних, вивчення картографічних матеріалів та візуальний огляд місцевості. Незважаючи на свою важливість, такий підхід має ряд обмежень, що впливають на його результативність.

Ефективність ручного обстеження безпосередньо залежить від якості отриманої інформації. Свідчення місцевих жителів можуть бути неповними або неточними, особливо якщо бойові дії відбувалися тривалий час тому. Також слід враховувати, що фахівці з нетехнічного обстеження постійно працюють в умовах значного інформаційного навантаження. Обробка великих обсягів різноманітних даних (свідчення очевидців, карти, фото, спостереження) вимагає високої концентрації уваги, яка знижується з часом і підвищує ймовірність помилок, або пропуску важливої інформації.

Також суттєвим обмеженням є повільність проведення нетехнічного обстеження. Великі території, особливо сільськогосподарські угіддя та лісові масиви зі складним рельєфом, потребують значного часу для повноцінного аналізу. У результаті цей процес може затягнутися на тижні або місяці, що ускладнює оперативне прийняття відповідних рішень щодо відновлення територій і це має важливе значення.

Окремо слід відзначити питання безпеки. Навіть на етапі нетехнічного обстеження фахівці перебувають у потенційно небезпечному середовищі. За відсутності повної інформації про рівень загрози це створює додаткові ризики для життя персоналу. Отже, існуючі обмеження ручного підходу обумовлюють необхідність впровадження сучасних технологічних рішень, здатних підвищити швидкість, точність і безпечність обстеження.

**Використання БпЛА та принцип роботи застосунку Spotlight AI.** Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності обстеження територій є використання БпЛА. За допомогою БпЛА збираються оперативні геопросторові дані шляхом аерофотозйомки, завдяки чому можна швидко охопити значні площі з високою деталізацією. Отримані зображення дають змогу виявляти зміни рельєфу (окопи та бліндажі), сліди

вибухів, залишки техніки, а також інші непрямі ознаки, які можуть свідчити про наявність вибухонебезпечних предметів [3].

Основною перевагою застосування БпЛА є можливість дистанційного обстеження. Це дозволяє отримувати інформацію про потенційно небезпечні або важкодоступні ділянки без безпосереднього перебування фахівців у зоні ризику. Крім того, сучасні безпілотні платформи здатні забезпечувати регулярний моніторинг територій, що дозволяє оперативно оновлювати дані.

Однак значні обсяги отриманої інформації потребують застосування ефективних інструментів. Для цього використовується система Spotlight AI, яка здатна в автоматичному режимі аналізувати зображень із використанням штучного інтелекту. Принцип роботи (рис. 1) системи полягає у багатоступеневій обробці даних, яка дозволяє перетворити необроблені візуальні матеріали у структуровану аналітичну інформацію.

На початковому етапі здійснюється завантаження та підготовка даних. Зображення проходять геоприв'язку, корекцію якості та уніфікацію параметрів, завдяки чому забезпечується їх придатність для подальшого аналізу. Наступним етапом є застосування алгоритмів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, які були навчені на великих наборах даних, що містять приклади як небезпечних, так і безпечних об'єктів.

У процесі аналізу система виявляє характерні ознаки, пов'язані з потенційною мінно-вибуховою небезпекою. До них належать порушення структури ґрунту, геометрично впорядковані аномалії, сліди інженерної діяльності, залишки боєприпасів або техніки. Алгоритми здатні виявляти навіть малопомітні деталі, які складно ідентифікувати під час ручного аналізу.

Завершальним етапом є формування результатів у вигляді ймовірнісної оцінки ризику. Кожній ділянці місцевості присвоюється відповідний рівень небезпеки, після чого отримана інформація візуалізується у вигляді карт ризику. Такі карти можуть інтегруватися у геоінформаційні системи та використовуватися для планування подальших робіт, визначення пріоритетів та оптимізації маршрутів [4].

**Підвищення безпеки та ефективності обстеження територій.** Завдяки інтеграції застосунку Spotlight AI з БпЛА забезпечується суттєве підвищення безпеки фахівців, які залучені до процесу розмінування. Основною перевагою є можливість дистанційного проведення первинного обстеження – це дозволяє мінімізувати перебування фахівців у небезпечній зоні. Попередня оцінка ризиків, отримана за допомогою аналізу даних, дозволяє більш ретельно планувати подальші дії та знижує потенційні загрози.

Важливим моментом є значне підвищення швидкості обстеження забруднених територій. Завдяки автоматизованому аналізу великих обсягів даних значні площі можуть бути оброблені у стислі терміни. Це має особливе значення в умовах необхідності швидкого відновлення



сільськогосподарської діяльності, інфраструктури та інших критично важливих об'єктів. Скорочення часу обстеження безпосередньо впливає на загальну ефективність процесу розмінування [5].

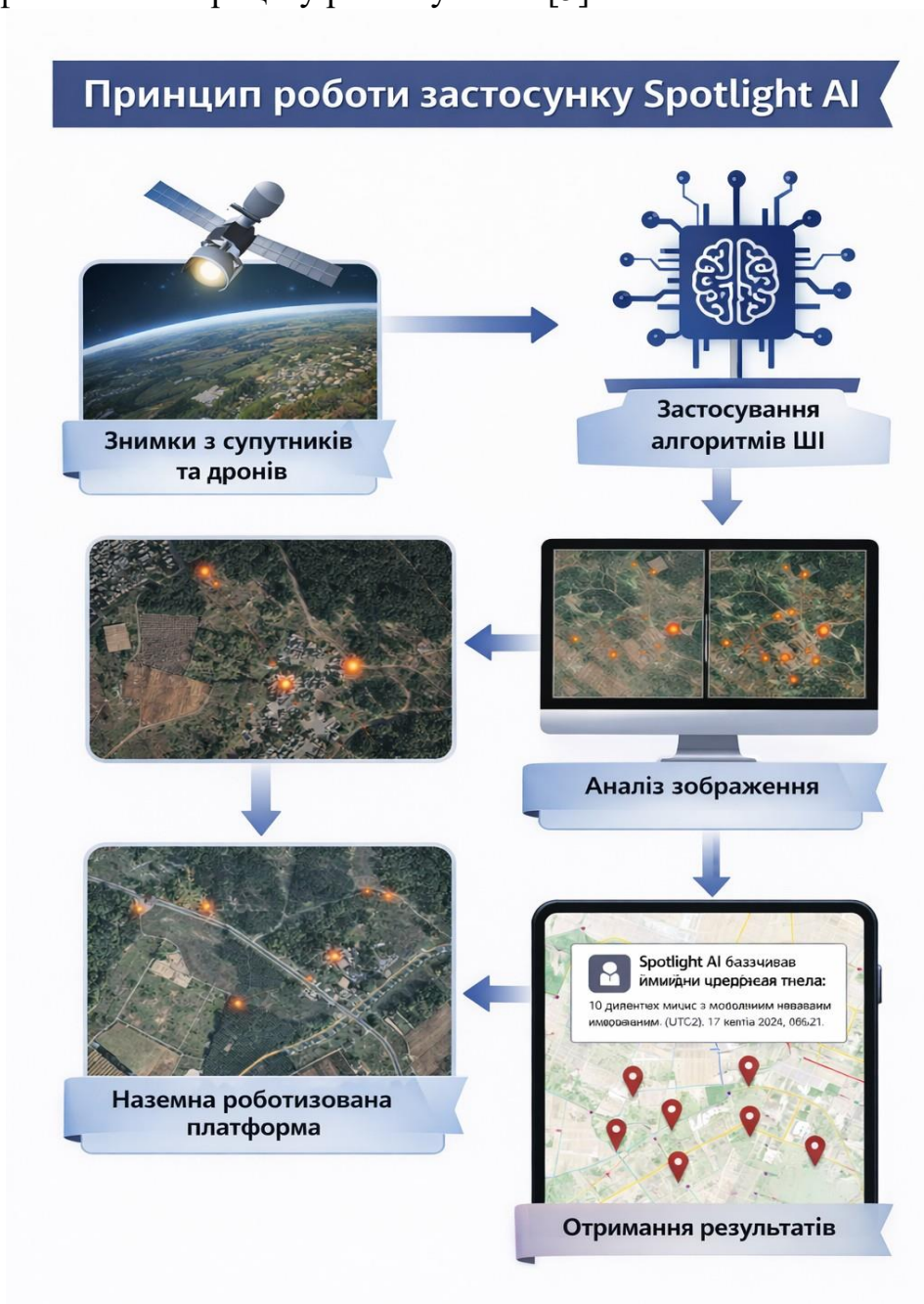


Рисунок 1. Принцип роботи застосунку Spotlight AI

**Підвищення безпеки та ефективності обстеження територій.** Завдяки інтеграції застосунку Spotlight AI з БпЛА забезпечується суттєве підвищення безпеки фахівців, які залучені до процесу розмінування. Основною перевагою є можливість дистанційного проведення первинного обстеження – це дозволяє мінімізувати перебування фахівців у небезпечній зоні. Попередня оцінка ризиків, отримана за допомогою аналізу даних, дозволяє більш ретельно планувати подальші дії та знижує потенційні загрози.

Важливим моментом є значне підвищення швидкості обстеження забруднених територій. Завдяки автоматизованому аналізу великих обсягів даних значні площі можуть бути оброблені у стислі терміни. Це має особливе значення в умовах необхідності швидкого відновлення сільськогосподарської діяльності, інфраструктури та інших критично важливих об'єктів. Скорочення часу обстеження безпосередньо впливає на загальну ефективність процесу розмінування [5].

Застосування Spotlight AI в інтеграції з БпЛА та роботизованими платформами дозволяє досягти високого рівня виявлення потенційно небезпечних об'єктів. Алгоритми штучного інтелекту здатні працювати з великими обсягами даних без втрати якості. Виявлення навіть незначних ознак потенційної небезпеки підвищує точність оцінки та зменшує ризик пропуску загроз.

## ВИСНОВКИ

В результаті дослідження встановлено, що використання Spotlight AI у поєднанні з роботизованими платформами відповідає сучасним вимогам автоматизації процесів гуманітарного розмінування. Використання даного програмного забезпечення дозволяє пришвидшити процес нетехнічного обстеження території, підвищити ефективність аналізу даних та зменшити ризики для фахівців з розмінування.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією AI-систем у автономні роботизовані комплекси, удосконаленням алгоритмів обробки зображень та розширенням їх функціональних можливостей.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Хоменко Є. В., Костиця С. В., Будз В. П. Нетехнічне обстеження територій, імовірно забруднених вибухонебезпечними предметами: методологія, класифікація, контроль якості та перспективи розвитку // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2025. №. 4. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2025-4-10853>
2. Клименко В., Шепіль К., Поливанюк В. Використання БпЛА з метою виявлення та ідентифікації вибухонебезпечних предметів. Діджиталізація науки як виклик сьогодення: матеріали IX міжнародної студентської наукової конференції (3 жовтня 2025 р., м. Харків). Харків: МНЛ, 2005. С. 118–120. URL: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/2092>
3. Кім Дж.-Х.; Квон Г.-Р. Виявлення протипіхотних мін на рівні зображення за допомогою глибокого навчання на довгохвильових інфрачервоних зображеннях. Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Iss. 15. P. 8613. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15158613>
4. Safe Pro AI Completes United Nations Development Programme's Purchase Order for Artificial Intelligence Minefield Analysis in Ukraine. 2024. September 5. URL: <https://safeprogroup.com/safe-pro-ai-completes-united-nations-development-programmes-purchase-order-for-artificial-intelligence-minefield-analysis-in-ukraine>.
5. Zito E. Spotlight AI improves demining ops in Ukraine. GAT-Report. 2025. November 4. URL: <https://www.gat.report/75760/spotlight-ai-improves-demining-ops-in-ukraine>.

**Кривошея В.Р.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна).

## **РОЗРОБКА МОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛІВ РОБОТИЗОВАНОГО НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ В РІЗНИХ УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ**

**Анотація:** У роботі запропоновано концепцію універсального модульного роботизованого наземного комплексу, що базується на автономному енергетичному ядрі з можливістю швидкої заміни функціональних модулів і типів ходової частини. Розглянуто принцип побудови системи за модульною архітектурою з використанням уніфікованих інтерфейсів підключення, що реалізують підхід «підключи та працюй». Такий підхід забезпечує оперативну адаптацію комплексу до змінних умов експлуатації, включаючи складний рельєф і різноманітні завдання у польових умовах. Проаналізовано переваги модульної конструкції порівняно з традиційними монофункціональними платформами, зокрема підвищення гнучкості застосування, спрощення технічного обслуговування та зменшення витрат протягом життєвого циклу. Особливу увагу приділено можливості швидкої заміни функціональних елементів, що підвищує живучість системи. Отримані результати можуть бути використані при створенні універсальних роботизованих платформ для задач безпеки, рятувальних операцій та інженерного забезпечення.

**Ключові слова:** роботизований наземний комплекс; модульна конструкція; Plug-and-Play; універсальна платформа; ходова частина; багатофункціональність; адаптивність.

**Abstract:** This paper proposes a concept of a universal modular robotic ground complex based on an autonomous power core with the capability for rapid replacement of functional modules and chassis types. The system architecture is designed using a modular approach with unified interfaces implementing the Plug-and-Play principle. This enables rapid adaptation of the platform to changing operational conditions, including complex terrain and diverse mission tasks in field environments. The advantages of the modular design over traditional monofunctional platforms are analyzed, including improved flexibility, simplified maintenance, and reduced life cycle costs. Special attention is given to the ability to quickly replace functional components, which enhances system survivability and operational readiness. The proposed approach supports efficient utilization of robotic systems in safety, emergency response, and engineering applications. The results demonstrate the feasibility of developing adaptive robotic platforms capable of performing multiple tasks under varying environmental and operational conditions.

**Keywords:** robotic ground complex; modular design; Plug-and-Play; universal platform; chassis system; multifunctionality; adaptability.

Сучасний етап розвитку робототехніки характеризується стрімким впровадженням роботизованих наземних комплексів (РНК) у сфери, що потребують виконання небезпечних або рутинних завдань: від логістики та моніторингу довкілля до гуманітарного розмінування та евакуації. Проте, незважаючи на технологічний прогрес, більшість існуючих систем

залишаються монофункціональними - вони жорстко спроектовані під конкретний тип задач.

Головна суперечність полягає в тому, що умови експлуатації РНК постійно змінюються, а конструкція комплексів залишається статичною. Це призводить до низької економічної ефективності: для кожної нової задачі замовник змушений купувати окрему платформу. Відсутність уніфікованих модульних вузлів створює проблемою, де ремонт у польових умовах або швидка зміна функціонала (наприклад, заміна маніпулятора на вантажний відсік) стає неможливою без заводського втручання.

Вона корелює з державними пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, зокрема в частині створення новітніх технологій транспортування, систем подвійного призначення та автономних інтелектуальних систем. Дослідження базується на теоріях системного аналізу, теорії механізмів і машин та методах оптимізації конструкцій.

Актуальність для реального сектору зумовлена необхідністю зниження вартості життєвого циклу робототехніки.

Для промисловості та логістики впровадження модульних вузлів дозволяє масштабувати виробництво та спростити сервісне обслуговування.

Для ДСНС та безпекового сектору модульність забезпечує взаємозамінність деталей у критичних умовах, де від швидкості відновлення працездатності комплексу залежить успіх операції.

Економічний аспект переходу до концепції "підключи та працюй" дозволяє створювати багатofункціональні комплекси, які адаптуються до різних умов застосування (пересічена місцевість, міська забудова, промислові зони) шляхом простої заміни функціональних модулів.

Сучасний стан розвитку комерційної робототехніки свідчить про перехід від монофункціональних пристроїв до універсальних модульних платформ. Найбільш релевантним практичним втіленням цієї концепції, на яке спирається дане дослідження, є розробки компанії Yarbo Inc (рис. 1).



Рисунок 1. Концепція багатofункціонального роботизованого комплексу Yarbo

## Ключові аспекти розробки Yarbo:

Принцип системи «базова платформа + навісне обладнання» базується на універсальному гусеничному тягачі, що містить основний акумуляторний блок, обчислювальний модуль та систему для здування листя.

Швидкозмінні модулі реалізовано механічну систему фіксації, яка дозволяє протягом декількох хвилин трансформувати комплекс зі снігоприбирача у газонокосарку або інший садовий агрегат.

Уніфікація інтерфейсів а саме використання єдиного порту для передачі енергії та сигналів керування на робочі органи різної потужності.

Аналіз практичної реалізації платформи Yarbo (рис. 1) дозволяє зробити висновок про високу життєздатність модульного підходу, проте виявляє низку технічних бар'єрів, які потребують наукового вирішення.

Попри успішну комерціалізацію платформи Yarbo Inc. та підтвердження життєздатності концепції «базова платформа + навісне обладнання», залишається низка критичних науково-технічних питань, які не отримали достатнього висвітлення у відкритих публікаціях та потребують вирішення для створення універсальних РНК.

Основними невирішеними аспектами є:

1. **Відсутність універсальності базових платформ:** Більшість сучасних РНК розробляються під конкретне вузьке завдання, що змушує операторів утримувати великий парк різнотипної техніки замість однієї адаптивної системи.
2. **Складність польового ремонту та обслуговування:** Традиційні монолітні конструкції не дозволяють проводити швидку заміну пошкоджених вузлів без спеціалізованого інструменту, що критично знижує живучість комплексу в зоні виконання завдань.
3. **Проблема сумісності інтерфейсів:** На сьогодні бракує уніфікованих стандартів для механічного та електронного поєднання модулів (підключи та працюй), що перешкоджає швидкій інтеграції нових типів корисного навантаження від різних виробників.
4. **Обмежена адаптивність до зміни умов середовища:** Існуючі системи важко переналаштувати під різний тип ґрунту, рельєфу або кліматичних умов без повної перебудови ходової частини чи системи енергоживлення.

Розробка модульної конструкції вузлів забезпечує перехід від вузькоспеціалізованих систем до універсальних платформ, здатних миттєво адаптуватися до зміни завдань у польових умовах. Впровадження уніфікованих інтерфейсів за принципом підключи та працюй дозволяє оперативно змінювати функціонал та проводити швидкий ремонт без складного обладнання, що суттєво підвищує живучість комплексу. Такий підхід мінімізує витрати на логістику та виробництво, створюючи гнучку й ефективну базу для подальшої інтеграції автономних систем управління.

**Мета роботи:** Розробити модульну конструкцію вузлів роботизованого наземного комплексу, що забезпечує швидку адаптацію платформи до виконання різних типів завдань та спрощує її технічне обслуговування в польових умовах.

**Постановка задачі:**

1. **Проаналізувати** наявні технічні рішення та виявити критичні недоліки монолітних конструкцій РНК.
2. **Провести морфологічний аналіз** можливих структурно-конструктивних рішень стикувальних вузлів для вибору раціонального варіанта компоновання.
3. **Розробити принципові схеми компоновання** вузлів, що визначають взаємодію між енергетичним ядром та змінними робочими органами.

Сучасний етап розвитку роботизованих наземних комплексів (РНК), проаналізований на прикладі платформи Yarbo Inc (Рис. 1), підтверджує ефективність концепції «базова платформа + навісне обладнання» для цивільного сектору. Проте, аналіз умов експлуатації РНК у сферах подвійного призначення, ДСНС та логістики на пересіченій місцевості виявляє критичний недолік існуючих комерційних платформ: статичність ходової частини. Монолітна конструкція рушія (колісного або гусеничного) суттєво обмежує адаптивність комплексу. Наприклад, гусенична платформа, ефективна на м'яких ґрунтах або снігу, стає економічно нерентабельною та малоефективною при необхідності тривалого руху по асфальтованих дорогах, де колісний рушій забезпечує вищу швидкість та менші енерговитрати. Головна наукова суперечність полягає в тому, що для досягнення справжньої універсальності необхідно модулювати не лише робочі органи, а й саму систему пересування. Це вимагає перегляду архітектури РНК і переходу від концепції «платформи-носія» до концепції «універсального енергетичного ядра» з повною інваріантністю ходової частини та корисного навантаження.

На основі проведеного морфологічного аналізу та з метою розв'язання виявлених суперечностей, у даному дослідженні запропоновано архітектуру Універсального модульного РНК (Рис. 2). Ключовою відмінністю даної схеми є виділення центрального ядра як автономного енерго-інформаційного модуля. Це ядро містить основний акумуляторний блок, обчислювальний модуль системи керування, навігаційне обладнання та засоби зв'язку. Воно спроектоване як стандартизований блок, позбавлений власного інтегрованого рушія, але оснащений уніфікованими інтерфейсами з'єднання.



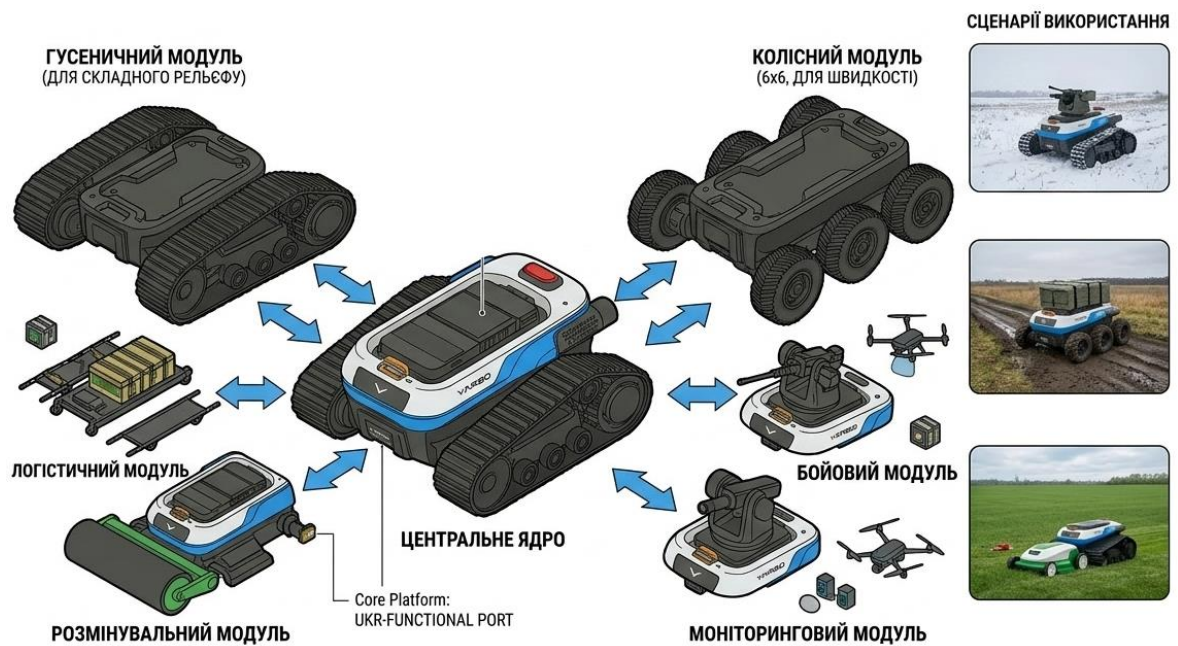


Рисунок 2. Концептуальна схема модульної архітектури РНК зі змінними типами рушіїв та функціонального навантаження

Запропонована схема (Рис. 2) демонструє дворівневу систему трансформації. На першому рівні відбувається адаптація до умов середовища шляхом вибору типу рушія. Центральне ядро може бути інтегроване або в «Гусеничний модуль» (для завдань на складному рельєфі, багнюці, снігу), або в «Колісний модуль (6x6)» (для швидкісного переміщення по дорогах з твердим покриттям або в міській забудові). На другому рівні здійснюється адаптація до цільового завдання шляхом підключення функціональних модулів до єдиного порту. Схема візуалізує можливість миттєвої трансформації комплексу під потреби логістики (евакуація, доставка), гуманітарного розмінування, бойового застосування або моніторингу довкілля (включно з базуванням БПЛА). Така архітектура перетворює РНК на гнучку, масштабовану систему, де базова платформа залишається незмінною, а її функціонал та прохідність змінюються в польових умовах без заводського втручання.

Реалізація запропонованої концепції вимагає розробки уніфікованого механічного, енергетичного та інформаційного інтерфейсу, що діє за принципом підключи та працюй. На відміну від системи Yarbo (Рис. 1), яка використовує різні порти для механічної фіксації та передачі енергії, у даній роботі запропоновано комбінований стикувальний вузол. Механічне з'єднання базується на геометрії швидкознімних фланців із системою автоматичного замикання підпружиненими пальцями, що забезпечує жорсткість конструкції та сприйняття динамічних навантажень. Такий підхід забезпечує повну взаємозамінність деталей у критичних умовах та спрощує сервісне обслуговування, оскільки ремонт зводиться до швидкої заміни пошкодженого модуля, а не всього комплексу. Це підтверджує актуальність розробки для реального сектору, зокрема ДСНС та

безпекового сектору, де швидкість відновлення працездатності є критичною.

У ході виконання роботи проведено комплексний аналіз та розроблено концепцію модульної архітектури роботизованого наземного комплексу (РНК), яка базується на принципі повної інваріантності ходової частини та функціонального навантаження. За результатами дослідження сформульовано наступні висновки:

1. **Теоретичне обґрунтування:** Доведено, що перехід від монолітних конструкцій до системи «універсального енергетичного ядра» є критичною необхідністю для сучасних РНК. Це дозволяє подолати головну суперечність між статичністю конструкції та динамічністю умов експлуатації, забезпечуючи економічну ефективність за рахунок зниження вартості життєвого циклу техніки.
2. **Конструкторське рішення:** Розроблено схему дворівневої трансформації (Рис. 2), яка дозволяє адаптувати комплекс як до типу поверхні (заміна гусеничного рушія на колісний), так і до цільового завдання (модулі розмінування, логістики, моніторингу) в польових умовах.
3. **Практичне значення:** Впровадження такої системи забезпечує високу живучість РНК у критичних умовах (ДСНС, безпековий сектор), оскільки вихід з ладу одного вузла (наприклад, пошкодження колеса або маніпулятора) не вимагає заміни всього дороговартісного комплексу, а вирішується швидкою заміною пошкодженого модуля.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі зосереджені на наступних аспектах:

- Динамічний аналіз: Моделювання стійкості та керованості РНК при зміні центра мас під час встановлення важких функціональних модулів на різні типи шасі.
- Інтелектуалізація: Розробка алгоритмів автоматичного переналаштування системи керування (PID-регуляторів), що самостійно адаптуватимуться до змінених масово-інерційних характеристик комплексу після заміни модулів.
- Матеріалознавство: Дослідження зносостійкості контактних груп енерго-інформаційного порту в умовах інтенсивного вібраційного навантаження та впливу агресивних середовищ.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. YARBO. YARBO. URL: <https://www.yarbo.com/> (дата звернення: 15.03.2026).



**Кузнєцов В.К.<sup>1</sup>, Скосар В.Ю.<sup>2</sup>, Бурилова Н.В.<sup>2</sup>, Бурилов С.В.<sup>2</sup>**

(<sup>1</sup> Україна, м. Дніпро, Дніпровський національний університет ім. Олеси Гончара; <sup>2</sup> Україна, м. Дніпро, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України).

## **ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ**

**Анотація:** У роботі досліджено можливість створення оптичного датчика магнітного поля на основі рідких кристалів із додаванням феромагнітних наночастинок складу NdFeB. Обґрунтовано актуальність розробки чутливих сенсорів для контролю магнітних полів у транспортних системах, зокрема електромобілях і магнітолевітаційних поїздах. Проаналізовано існуючі підходи до створення магніточутливих рідкокристалічних матеріалів та показано обмеження їх чутливості. Запропоновано використання феронематиків на основі нематичного рідкого кристалу 6CB із домішками наночастинок NdFeB, що характеризуються високим магнітним моментом. Розглянуто фізичні механізми взаємодії магнітних частинок із рідкокристалічною матрицею та наведено теоретичні оцінки полів переорієнтації на основі аналізу вільної енергії системи. Показано, що запропонований матеріал дозволяє знизити поріг чутливості датчика до рівня  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  Тл. Отримані результати підтверджують перспективність створення оптичних сенсорів нового покоління для візуалізації слабких магнітних полів у технічних системах.

**Ключові слова:** рідкі кристали; феронематики; магнітне поле; наночастинок NdFeB; оптичний датчик; магнітооптичні ефекти; чутливість.

**Abstract:** This paper investigates the feasibility of developing an optical magnetic field sensor based on liquid crystals doped with ferromagnetic nanoparticles of NdFeB composition. The relevance of creating highly sensitive sensors for monitoring magnetic fields in transport systems, including electric vehicles and maglev trains, is substantiated. Existing approaches to designing magnetically sensitive liquid crystal materials are analyzed, and their sensitivity limitations are identified. The use of ferronematics based on the nematic liquid crystal 6CB with NdFeB nanoparticles characterized by a high magnetic moment is proposed. The physical mechanisms of interaction between magnetic particles and the liquid crystal matrix are considered, and theoretical estimates of reorientation fields are provided based on the free energy analysis of the system. It is shown that the proposed material enables a reduction in the sensor sensitivity threshold to the level of  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  T. The obtained results confirm the perspective of developing next-generation optical sensors for visualization of weak magnetic fields in technical systems.

**Keywords:** liquid crystals; ferronematics; magnetic field; NdFeB nanoparticles; optical sensor; magneto-optical effects; sensitivity.

### **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Для контролю величини магнітного поля в транспортних засобах, насамперед в електромагнітному транспорті – електромобілях, магнітолевітаційних поїздах – потрібні чутливі датчики. Це також важливо з точки зору безпеки пасажирських та вантажних перевезень..

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Датчики магнітного поля знаходять застосування у багатьох галузях господарства, включаючи транспорт, енергетику, хімічну промисловість та ін. Вони використовуються для визначення положення і швидкості об'єктів, у навігаційних системах, промисловій автоматизації та діагностиці обладнання. Також такі датчики застосовуються для моніторингу струмів, виявлення дефектів і забезпечення безпеки технічних систем. З іншого боку, датчики на основі рідких кристалів (РК) сьогодні застосовуються в елементах електронної техніки, у тому числі, у рідкокристалічних дисплеях [1]. Однак, для створення датчиків магнітного поля звичайні РК не використовуються тому, що мають дуже низьку чутливість до зовнішнього магнітного поля і можуть реєструвати тільки досить сильні поля порядку  $10^{-1}$  Тл [2]. Одним із технічних рішень є розробка «магніточутливого рідкого кристала» на основі простої водяної дисперсії (суспензії) магнітних нанострижнів, які здатні швидко реагувати на зовнішні магнітні поля [3]. Недоліком цього рішення є те, що водяна суспензія, яка фактично є звичайною магнітною рідиною, за відсутності поля переходить у ізотропний стан і втрачає властивості рідкого кристалу. Більш ефективним рішенням є створення композитних феромагнітних матеріалів шляхом додавання до РК анізотричних (стержневих, пластинчастих або дископодібних) магнітних мікро- та наночастинок [4-5]. Такі матеріали вже синтезовано на основі нематичних рідких кристалів з магнітними частинками складів  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$  та ін. [6-8]. Вони отримали назву феронематики (ФН), їх орієнтаційним порядком вдається управляти магнітним полем  $\sim 10^{-2}$  Тл.

Іншим перспективним магніточутливим матеріалом може служити ФН на основі рідкого кристалу 6СВ, з магнітними частинками, які відповідають складу рідкісноземельних магнітів:  $\text{NdFeB}$ . Враховуючи підвищений інтерес до супермагнітів на основі рідкісноземельних металів [9] і розвиток технологій отримання магнітних наночастинок [10], цей напрямок може виявитися найбільш пріоритетним для створення датчиків магнітного поля на рідких кристалах.

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Існує потреба у створенні чутливих датчиків магнітного поля, у тому числі для електромагнітного транспорту, які також могли б візуалізувати поле на поверхні деталей та в салоні транспортного засобу.

**Цілі статті та постановка задачі.** Продемонструвати можливість створення датчика магнітного поля на основі рідких кристалів з порогом чутності  $\sim 10^{-4} \div 10^{-3}$  Тл.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Автори продовжують дослідження зі створення композитів рідких кристалів 6СВ з магнітними мікро- та наночастинами, які відповідають складу рідкісноземельних магнітів  $\text{NdFeB}$ . Мезофаза (фаза рідкого

кристалу) РК існує в певному проміжку температур, зокрема у 6СВ мезофаза існує в діапазоні від 14.5 до 29 °С. Інші РК характеризуються діапазонами існування мезофаз, які можуть відрізнятися від 6СВ.

Перевірка ефективності нового датчика може бути реалізована експериментально за допомогою твіст-структури, згідно рис. 1, тут використані наступні позначення: 1 – джерело неполяризованого світла; 2 – поляризатор; 3 – перша поверхня комірки; 4 – РК з феромагнітними частинками; 5 – друга поверхня комірки; 6 – аналізатор (який схрещений з поляризатором 2); 7 – система реєстрації, запису та аналізу оптичного сигналу. Поляризатор 2 задає вертикальну площину поляризації світла, тоді як аналізатор 6 пропускає лише світло з горизонтальною площиною поляризації. Поверхня 3 задає вертикальний напрямок директора РК, тоді як поверхня 5 задає горизонтальний напрямок директора РК. Якщо на РК 4 не діє магнітне поле, то така твіст-структура добре пропускати світло. Якщо на РК 4 діє магнітне поле, то воно буде переорієнтувати феромагнітні наночастинки. Завдяки орієнтаційному зв'язку анізотричних наночастинок з рідким кристалом це призведе до повороту директора (оптичної осі) РК і суттєвому зниженню інтенсивності світла на виході 7. Причому при вихідній твіст закрутці рідкого кристала цей ефект буде спостерігатися при будь-якому напрямку зовнішнього магнітного поля. Після вимкнення магнітного поля РК повернеться у вихідний стан, заданий поверхнями 3, 5 комірки.

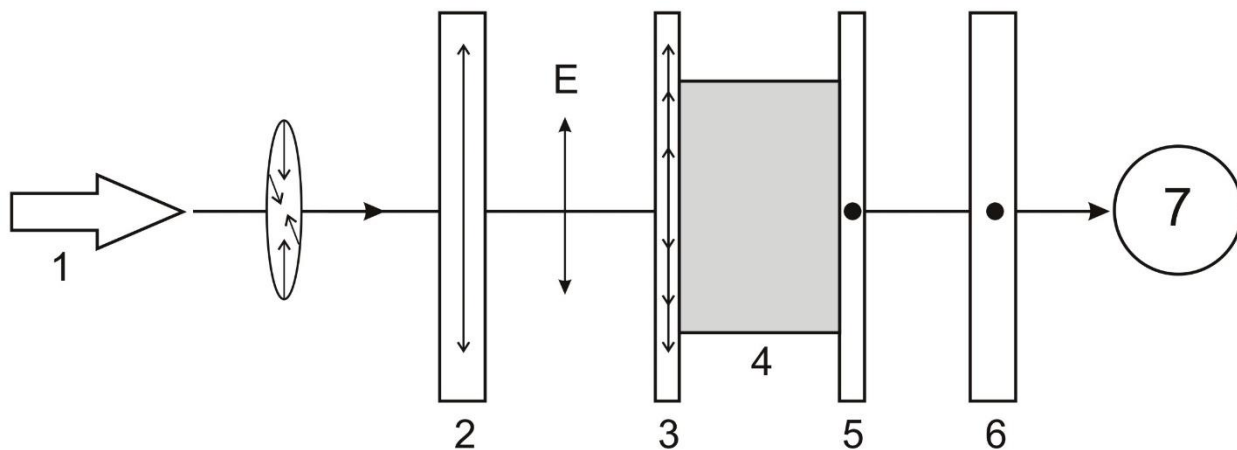


Рисунок 1. Схема експерименту з твіст-структурою на основі РК з феромагнітними частинками.

Для теоретичної оцінки магнітооптичного ефекту нового матеріалу будемо використовувати вираз для повного функціоналу вільної енергії ФН  $F = \int f dV$  з об'ємною густиною

$$f = f_{уп} + f_{дп} + f_{квл} + f_{ор} + f_{ен}. \quad (1)$$

Обговоримо вклади, що входять до виразу (1). Вклад  $f_{уп}$  описує енергію пружних деформацій нематичної матриці. В так званому одноконстантному наближенні [2] він має вигляд

$$f_{уп} = \frac{K}{2} \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial z} \right)^2 \right] = \frac{K}{2} \left( \frac{\partial n_i}{\partial x_k} \right)^2, \quad (2)$$

тут  $\mathbf{n}$  – директор,  $K$  – середній модуль пружності РК.

Наступний доданок  $f_{дп}$  відповідає дипольній взаємодії магнітних ферочастинок із зовнішнім полем

$$f_{дп} = -M_s \phi \cdot (\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}), \quad (3)$$

тут  $M_s$  – намагніченість насичення матеріалу наночастинок,  $\phi$  – об'ємна концентрація твердої фази,  $\mathbf{m}$  – одиничний вектор намагніченості ФН,  $\mathbf{B}$  – вектор індукції зовнішнього магнітного поля.

Доданок  $f_{квп}$  описує діамагнітну квадрупольну взаємодію нематичної матриці із зовнішнім полем

$$f_{квп} = -\frac{\chi_a}{2\mu_0} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{B})^2, \quad (4)$$

де  $\chi_a$  – діамагнітна анізотропія нематичної матриці,  $\mu_0$  – магнітна стала.

Внесок  $f_{ор}$  відповідає орієнтаційній взаємодії анізотричних наночастинок з рідким кристалом

$$f_{ор} = -A \phi \cdot (\mathbf{m} \cdot \mathbf{n})^2, \quad (5)$$

тут коефіцієнт  $A$  має розмірність густини вільної енергії, його значення залежить від форми і розмірів наночастинок, а також від густини  $W$  енергії зчеплення молекул нематика з поверхнею останніх. Для циліндричних (стержневих) частинок діаметром  $d$  даний коефіцієнт дорівнює  $A = (W/d)$ .

Останній доданок у виразі (1) описує внесок від ентропії змішування

$$f_{EH} = \frac{k_B T}{v} \phi \ln \phi, \quad (6)$$

де  $k_B$  – постійна Больцмана,  $T$  – температура,  $v$  – об'єм окремої наночастинок. Зазначимо, що за відсутності магнітного поля енергетичному мінімуму ентропійного вкладу відповідає однорідний розподіл магнітних частинок у твіст-структурі експериментальної комірки.

Використовуючи вирази (1) – (6) вже на даному етапі дослідження для комірки товщиною  $D$  можна оцінити поля переорієнтації і необхідні умови виникнення орієнтаційних ефектів. Зокрема для чистого РК поле переорієнтації знаходиться з балансу енергії пружних деформацій (2) і діамагнітного квадрупольного вкладу (4)

$$(K/D^2) \approx (\chi_a B^2 / \mu_0), \quad (7)$$

Це дає з точністю до коефіцієнта  $\pi$  поле магнітного переходу Фредерікса в чистому РК

$$B_{PK} \sim D^{-1} \sqrt{\mu_0 K / \chi_a}. \quad (8)$$

Для рідкого кристалу 6CB з параметрами  $K \approx 5$  пН,  $\chi_a \approx 10^{-6}$  і типових комірок завтовшки  $D \approx 50$  мкм з формули (8) отримуємо  $B \sim 5 \cdot 10^{-2}$  Тл.

Поле переорієнтації магнітних частинок у нематичній матриці при їх рівномірному розподілі визначається з балансу енергій (2) та (3)

$$(K/D^2) \approx \phi M_s B, \quad (9)$$

що дає

$$B_{\phi H} \sim (K / \phi M_s D^2). \quad (10)$$

Приймаючи для намагніченості насичення наночастинок NdFeB значення  $M_s \sim 10^4 \div 10^5$  А/м отримуємо, що навіть за дуже малих об'ємних концентраціях твердої фази  $\phi \sim 10^{-4}$  поля переорієнтації частинок досягають необхідних значень чутливості приладу.  $B_{\phi H} \sim 2 \cdot (10^{-4} \div 10^{-3})$  Тл. Однак, даний результат ще не означає перебудови твіст-структури ФН, оскільки для цього необхідно досягти достатньо сильного орієнтаційного зв'язку частинок з нематичною матрицею. Необхідні умови такого зв'язку визначаються із балансу енергій (2) і (5)

$$(K/D^2) \approx A\phi, \quad (11)$$

що для частинок стрижневої форми накладає умову на нижнє значення енергії зчеплення

$$W_{\text{МН}} \sim (Kd / D^2 \phi). \quad (12)$$

Для наночастинок діаметром  $d \sim 50$  нм отримуємо  $W_{\text{МН}} \sim 10^{-6}$  Дж/м<sup>2</sup>. Експериментальні дослідження ФН із наночастинками інших феромагнітних складів демонструють, що такі значення енергії зчеплення досягаються шляхом обробки наночастинок поверхнево-активними речовинами.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Таким чином, представлені результати показують, що новий матеріал на основі рідкого кристалу 6CB з мікро- та наночастинками NdFeB повинен мати більш високу чутливість до магнітних полів, ніж його аналоги [6-8] з частинками Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO(OH) та ін. Якщо аналоги спроможні реєструвати поля  $\sim 10^{-2}$  Тл, то новий матеріал зможе підвищити чутливість датчиків магнітного поля до  $10^{-4} \div 10^{-3}$  Тл.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Що таке LCD (рідкокристалічний дисплей)? Apr 18, 2024. [Електронний ресурс]. URL: <https://ua.touchlcddisplay.com/info/what-is-lcd-liquid-crystal-display-98709231.html> (дата звернення 31.03.2026 р.).
2. The Static and Dynamic Continuum Theory of Liquid Crystals: A Mathematical Introduction / I. W. Stewart; Taylor & Francis. London, 2004. 351 p.
3. Створено рідкі кристали, що реагують на магнітне поле. 27 червня 2014 р. [Електронний ресурс]. URL: [https://ko.com.ua/sozdany\\_zhidkie\\_kristally\\_reagiruyushhie\\_na\\_magnitnoe\\_pole\\_105859#:~:text=Магнитные%20наностержни%20также%20можно%20использовать%20для%20изготовления,жидких%20кристаллов%2C%20ориентацию%20которых%20можно%20фиксировать%20полностью](https://ko.com.ua/sozdany_zhidkie_kristally_reagiruyushhie_na_magnitnoe_pole_105859#:~:text=Магнитные%20наностержни%20также%20можно%20использовать%20для%20изготовления,жидких%20кристаллов%2C%20ориентацию%20которых%20можно%20фиксировать%20полностью) (дата звернення 31.03.2026 р.).
4. Модифікація холестеричних рідких кристалів активними нанодомішками для елементів електронної техніки: монографія / М. В. Вісьтак, З. Ю. Готра, О. Є. Сушинський; ред.: З. Ю. Готра; Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, 2014. 291 с.
5. Skosar V., Burylova N., Voroshilov O., Burylov S. Development of an optical temperature sensor on liquid crystals. Sci. innov., 19 (5), (2023). P.34-42. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.034>.
6. Kopčanský P., Gdovinová V., Burylov S., Burylova N., Voroshilov A., Majorošová J., Agresti F., Zin V., Barison S., Jadżyn J., Tomašovičová N. The influence of goethite nanorods on structural transitions in liquid crystal 6CHBT. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 459 (2018), P.26-32. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.086>
7. Tomašovičová N., Gdovinová V., Burylov S., Tarasov A., Burylova N., Voroshilov A., Kovac J., Kopčanský P., Jadżyn, J. Magnetic Freedericksz transition in a ferronematic liquid crystal doped with spindle magnetic particles. Journal of Molecular Liquids, 267 (2018), P.390-397. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.106>
8. Burylov S., Petrov D., Lackova V., Zakutanska K., Burylova N., Voroshilov A., Skosar V., Agresti F., Kopčanský P., Tomašovičová N. Ferromagnetic and antiferromagnetic liquid crystal suspensions: Experiment and theory. Journal of Molecular Liquids, 321(2021), 114467. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114467>
9. The Environmental Impact Of Neodymium Magnets (07.04.2023). [Електронний ресурс]. URL: <https://www.greatmagtech.com/info/the-environmental-impact-of-neodymium-magnets-81078752.html> (дата звернення 31.03.2026 р.).
10. Poudyal N., Ping Liu J. Advances in nanostructured permanent magnets research. Journal of Physics D: Applied Physics, 46(4), (2013). 043001.

УДК 004.94:658.5:621

**Ліснічий М.А., Ковалевський С.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна)

### ПРО СТВОРЕННЯ AI-CAD/CAM/CAE СИСТЕМИ ДЛЯ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Анотація:** У статті розглянуто концепцію створення інтегрованої AI-CAD/CAM/CAE системи для машинобудівного виробництва в умовах цифрової трансформації промисловості. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку систем

автоматизованого проектування, виробництва та інженерного аналізу, а також роль штучного інтелекту у підвищенні їх ефективності. Розглянуто архітектуру багаторівневих AI-систем, що включають генеративне проектування, машинне навчання, цифрові двійники та інтеграцію з CAM і CAE модулями. Особливу увагу приділено застосуванню нейронних мереж, великих мовних моделей та інтелектуальних копілотів у виробничих процесах. Проаналізовано економічну ефективність впровадження AI-рішень, зокрема показники ROI, зниження витрат і підвищення продуктивності. Визначено ключові виклики інтеграції штучного інтелекту в існуючі виробничі системи та запропоновано підходи до їх подолання. Отримані результати свідчать про перспективність створення інтелектуальних CAD/CAM/CAE платформ як основи майбутнього машинобудівного виробництва.

**Ключові слова:** штучний інтелект; CAD/CAM/CAE; генеративне проектування; цифровий двійник; машинне навчання; інтелектуальне виробництво; Industry 4.0.

**Anstract:** This paper considers the concept of developing an integrated AI-CAD/CAM/CAE system for mechanical engineering production in the context of industrial digital transformation. Current trends in the development of computer-aided design, manufacturing, and engineering analysis systems are analyzed, along with the role of artificial intelligence in enhancing their efficiency. The architecture of multi-level AI systems is examined, including generative design, machine learning, digital twins, and integration with CAM and CAE modules. Special attention is given to the application of neural networks, large language models, and industrial copilots in manufacturing processes. The economic efficiency of implementing AI solutions is analyzed, including ROI indicators, cost reduction, and productivity improvement. Key challenges of integrating artificial intelligence into existing production systems are identified, and approaches to overcoming them are proposed. The results demonstrate the перспективність of developing intelligent CAD/CAM/CAE platforms as a foundation for next-generation mechanical engineering production systems.

**Keywords:** artificial intelligence; CAD/CAM/CAE; generative design; digital twin; machine learning; intelligent manufacturing; Industry 4.0.

## Вступ.

Сучасне машинобудівне виробництво переживає фундаментальну трансформацію, зумовлену стрімким розвитком технологій штучного інтелекту (ШІ) та їх інтеграцією з традиційними системами автоматизованого проектування, виробництва та інженерного аналізу. Створення AI-CAD/CAM/CAE систем стає не просто конкурентною перевагою, а необхідною умовою виживання підприємств у глобальному конкурентному середовищі.

За оцінками аналітиків, ринок програмного забезпечення для автоматизованого виробництва (CAM) зростає з 3,40 млрд доларів США у 2024 році до 5,70 млрд доларів до 2030 року, демонструючи середньорічний темп зростання (CAGR) 9,0% [1]. Водночас ринок комп'ютерно-інженерних систем (CAE) оцінюється у 15,25 млрд доларів США у 2024 році і прогнозується досягти 27,51 млрд доларів до 2035 року при CAGR 5,51% [2]. Ці показники свідчать про масштабну цифрову трансформацію галузі, де штучний інтелект відіграє ключову роль.

## **Еволюція CAD/CAM/CAE систем та роль штучного інтелекту.**

Традиційні системи автоматизованого проектування (CAD) створювали цифрові моделі майбутніх виробів, системи автоматизованого виробництва (CAM) перетворювали ці моделі в керуючі програми для верстатів з ЧПК, а системи інженерного аналізу (CAE) дозволяли віртуально тестувати вироби. Протягом останніх десятиліть ці системи еволюціонували від окремих спеціалізованих інструментів до інтегрованих платформ, що забезпечують безперервний цифровий потік від концепції до готового виробу [3].

У 2024-2026 роках найбільш помітним трендом стала інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання в CAD/CAM/CAE системи. Алгоритми машинного навчання тепер аналізують величезні обсяги даних для оптимізації параметрів проектування, прогнозування потенційних дефектів та пропозиції коригувань ще до початку виробництва [4]. ШІ забезпечує динамічне коригування параметрів проектування під час процесу моделювання, гарантуючи оптимальну продуктивність. Результатом стало збільшення ефективності виробництва на 30% та зменшення операційних витрат на 20% [4].

Особливу увагу заслуговує концепція генеративного проектування (generative design), яка представляє собою AI-керований процес створення оптимізованих конструкцій виробів. Інженери задають специфічні параметри — такі як матеріали, вага, вимоги до продуктивності та методи виробництва, а штучний інтелект досліджує тисячі варіантів проектування, пропонуючи різноманітні оптимізовані рішення, які часто виходять за межі того, що могли б розглянути інженери-люди [5]. Генеративне проектування не лише допомагає оптимізувати вироби, але й узгоджується з різними методами виробництва, включаючи 3D-друк, CNC-обробку та традиційні методи [5].

## **Архітектура AI-CAD/CAM/CAE систем.**

Сучасні AI-CAD/CAM/CAE системи базуються на багаторівневій архітектурі, що включає декілька ключових компонентів. На рівні проектування ШІ покращує інструменти CAD через алгоритми генеративного проектування, які можуть автономно генерувати численні ітерації дизайну на основі заданих обмежень та цілей [6]. Це дозволяє інженерам швидко досліджувати інноваційні проектні рішення, які можуть бути неочевидними при використанні традиційних методів.

Моделі машинного навчання можуть аналізувати величезні обсяги даних з попередніх проектів для прогнозування результатів продуктивності, оптимізації використання матеріалів та виявлення потенційних проблем на ранніх етапах процесу проектування [6]. У сфері адитивного виробництва, алгоритми штучного інтелекту можуть генерувати кілька наборів варіантів проектування на основі матеріалів,



навантажень та умов навколишнього середовища, створюючи таким чином легкі та високоміцні автомобільні деталі.

Важливою складовою є застосування нейронних мереж, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN) та генеративно-змагальних мереж (GAN). Відповідно до сучасних досліджень, оптимізація може бути організована через інтеграцію CAD-CAE, що дозволяє використовувати автоматизований цикл проектування-аналізу-перепроєктування та сурогатне моделювання для досягнення ефективності та високої якості рішення [7]. Генеративно-змагальні мережі та нейронні мережі на основі штучного інтелекту є одними з методів, які прокладають шлях через вісім фокусованих досліджень [7].

### **Ключові технології та інновації 2024-2026 років.**

Одним з найбільш трансформаційних досягнень останніх років стало впровадження великих мовних моделей (LLM) у виробничі процеси. Компанії розробили промислові копілоти — розмовні інтерфейси, вбудовані в програмне забезпечення для обслуговування, які дозволяють технікам ставити складні запитання про стан обладнання і отримувати миттєві, технічно точні відповіді [8]. Siemens Industrial Copilot, представлений на CES 2025, приносить ШІ безпосередньо на виробничий цех, дозволяючи операторам задавати складні питання про стан машин [8].

Технологія цифрових двійників (digital twins) набула особливої актуальності. За прогнозами Simio, технологія цифрових двійників продемонструє адаптивність та прогнозованість у 2025 році, а ринковий розмір очікується досягти десятків мільярдів доларів [9]. З даними як рушійною силою, модель, яка поєднує віртуальне та фактичне, стане основним елементом інтелектуального виробництва. Цифрові двійники використовують дані датчиків у реальному часі для взаємодії з фізичними системами для досягнення двостороннього зворотного зв'язку та прогнозованого обслуговування інформаційної взаємодії [9].

Важливим напрямком стала інтеграція CAD/CAM програмного забезпечення з передовими технологіями 3D-друку. У 2024 році фокус змістився в бік багатоматеріального друку — програмне забезпечення CAD/CAM тепер підтримує одночасне використання кількох матеріалів у межах однієї роботи друку, дозволяючи створювати складні багатофункціональні компоненти [4]. Інновації у 3D-друку скоротили час прототипування до 40%, забезпечуючи швидку ітерацію та більш гнучкі коригування проектування [4].

### **Практичне застосування AI-CAM систем.**

У сфері автоматизованого виробництва найбільш значущі результати демонструє впровадження AI-асистентів для CAM програмування. CAM Assist для Mastercam, який став доступним у всьому світі у липні 2024 року, вже використовується щодня приблизно в 1000 механічних цехах по всьому світу [10]. Побудований на основі десятирічної розробки, він

підтримує компоненти як з трьома осями, так і з 3+2 осями, зазвичай виконуючи близько 80% генерації траєкторії інструменту для деталей 3+2 [10]. Це дозволяє програмістам рухатися по робочому процесу швидше, з меншим ручним втручанням.

Компанія Up2parts розробила програмне забезпечення на основі ШІ для підтримки малих та середніх виробників. На початку 2024 року компанія почала співпрацю з Mastercam для подальшої розробки AutoCAM, зосереджуючись на автоматизації робочих процесів CAM [10]. Їхні ключові пропозиції включають автоматизоване котирування в Up2parts Calculation, яке забезпечує швидші та точніші оцінки, та програмування CAM з використанням ШІ в AutoCAM, призначене для скорочення ручних робочих процесів.

LimitlessCNC розробляє інтерактивного копілота на основі ШІ, який безперешкодно інтегрується в програмне забезпечення CAM для автоматизації та оптимізації робочих процесів CNC. Всередині Mastercam він діє як AI CAM агент, який адаптується до специфічних для клієнта даних — таких як допуски деталей, обмеження машин та можливості інструментів — навчаючись на історичних програмах [10]. Замість того, щоб витрачати години на створення траєкторій інструментів, налаштування операцій або перепрограмування схожих, але трохи різних деталей, користувачі Mastercam можуть використовувати LimitlessCNC для автоматичного генерування, оптимізації та адаптації траєкторій безпосередньо в межах їхніх існуючих робочих процесів.

### **Економічна ефективність та ROI AI-систем.**

Впровадження ШІ у виробництво демонструє значну економічну ефективність. AI-кероване прогнозоване обслуговування зазвичай генерує ROI 300-500% шляхом мінімізації незапланованих простоїв та оптимізації інтервалів обслуговування [11]. Моделі машинного навчання постійно аналізують дані датчиків для прогнозування відмов, дозволяючи втручання до виникнення збоїв. Виробники, які впроваджують ці системи, зазвичай досягають зниження витрат на обслуговування на 5-10% та покращення доступності активів на 10-20% [11].

Повномасштабна AI-інфраструктура для контролю якості забезпечує ROI 200-300% через значне зменшення дефектів та прискорення циклів інспекції. Вона надає вищу точність та послідовність порівняно з ручними перевітками і покращує загальну якість продукту [11]. Передові моделі ШІ для оптимізації ланцюга постачання та інвентаризації забезпечують ROI 150-250%, запобігаючи дефіциту запасів та керуючи всіма етапами ланцюгів постачання [11].

За даними досліджень, ШІ може знизити витрати на обслуговування виробництва на 25-40%. Більше того, 78% виробничих підприємств, що використовують ШІ, повідомили про зменшення відходів, а їхні системи енергетичного менеджменту, керовані ШІ, досягли середньої економії енергії 12% [11]. Глобальна галузь ШІ у виробництві швидко зростає. У

2025 році вона оцінюється у 34,18 млрд доларів, але з поточним CAGR 35,3% досягне 155,04 млрд доларів США до 2030 року [11].

### **Виклики впровадження та стратегії їх подолання.**

Незважаючи на очевидні переваги, впровадження AI-CAD/CAM/CAE систем супроводжується певними викликами. Одним з найбільш значущих є інтеграція ІІІ у застарілі системи, що часто вимагає дорогих модернізацій інфраструктури та технічної експертизи [6]. Від закупівлі передового апаратного та програмного забезпечення до навчання персоналу — початкові інвестиції можуть бути значними.

Реалізація прогнозованого обслуговування вимагає високоякісних даних датчиків, і кількість помилкових тривог може збільшуватися [9]. Процес роботи моделей глибокого навчання споживає багато енергії. Дослідники з NC State наголошують на необхідності врахування обчислювальних та енергетичних витрат алгоритму протягом усього його життєвого циклу. У відповідь на ці проблеми галузь запропонувала стратегії, такі як прийняття стандартизації обміну даними, розробка пояснювального ІІІ та впровадження периферійних обчислень та моделей з низьким енергоспоживанням для підтримки надійності та сталості застосувань ІІІ [9].

Важливо правильно розпочати впровадження. Виробники можуть спиратися на своїх постачальників для отримання можливостей, якщо у них немає відповідних внутрішніх ресурсів. Потім критично важливо визначити правильні випадки використання, де буде видно найбільшу віддачу від інвестицій [12]. Компанії повинні визнати, що використання ІІІ вимагатиме певного управління змінами. Використання генеративного та агентного ІІІ подібне до додавання ще одного співробітника до команд працівників. При правильному впровадженні це може зробити кожного ефективнішим та продуктивнішим [12].

### **Висновки та перспективи розвитку.**

Створення AI-CAD/CAM/CAE систем для машинобудівного виробництва представляє собою не просто технологічну інновацію, а фундаментальну зміну парадигми проектування та виробництва. Інтеграція штучного інтелекту з традиційними системами автоматизації дозволяє досягти безпрецедентних рівнів ефективності, точності та гнучкості виробничих процесів.

Аналіз сучасних тенденцій показує, що до 2030 року щонайменше 30% фабрик керуватимуть системами управління централізовано через відкриті та прозорі платформи автоматизації, що допоможе значно скоротити витрати на інтеграцію та підвищити точність виробничих процесів [11]. Більше 40% виробників впровадять інструменти ІІІ для систем планування, де планування та управління ресурсами базуватимуться значною мірою на даних у реальному часі — статусах машин, доступності робочої сили та варіативності постачання [11].

Ключовими напрямками подальшого розвитку є вдосконалення алгоритмів генеративного проектування, розширення можливостей цифрових двійників, покращення інтеграції між CAD, CAM та CAE системами, а також розвиток хмарних платформ для співпраці. З прогресом технологій III механічне проектування поступово переходить до фази, керованої даними та моделями, сприяючи зростанню інтелектуальних, гнучких та стійких виробничих систем та вливаючи нову енергію в промислову революцію [9].

Переможцями в цю нову еру будуть виробники, які успішно навігують ці суперечності — використовують генеративний III не для заміни працівників, а для надання їм суперздібностей, розглядають сталість не як податок, а як метод зменшення відходів та енергетичних витрат. Платформа технічного обслуговування є мостом між технологом-людиною та когнітивною фабрикою. Зміцнюючи цей міст, промисловість забезпечує не лише обладнання, але й майбутнє виробництва [8].

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ.

1. Computer Aided Manufacturing Market Report 2025. MarketsandMarkets, November 2024. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/computer-aided-manufacturing-market-251259446.html> (дата звернення: 30.03.2026).
2. Cae Market Size, Share, Growth, Drivers and Forecast 2035. Market Research Future, November 2025. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/cae-market-22591> (дата звернення: 30.03.2026).
3. Borator C. CAD/CAM/CAE Systems in Modern Manufacturing: Key Advantages of Automation. CompanionLink, May 2025. URL: <https://www.companionlink.com/blog/2025/05/cad-cam-cae-systems-in-modern-manufacturing-key-advantages-of-automation/> (дата звернення: 30.03.2026).
4. 2024 CAD/CAM Innovations: A Comprehensive Overview. Cad Cam Cae News, December 2025. URL: <https://caddoctor.org/2024-cad-cam-innovations-a-comprehensive-overview/> (дата звернення: 30.03.2026).
5. How AI is Revolutionizing Manufacturing with Generative Design. IMAGINiT Technologies, September 2025. URL: <https://resources.imaginit.com/manufacturing-solutions-blog/how-ai-is-revolutionizing-manufacturing-with-generative-design> (дата звернення: 30.03.2026).
6. Next-generation manufacturing: leveraging AI for industrial innovation and growth. ScienceDirect, October 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835225007648> (дата звернення: 30.03.2026).
7. Enahoro O. M., Ekiugbo A. Evolution of CAD in Mechanical Engineering. Journal of Materials Engineering, Structures and Computation, 2025, Vol. 4, No. 3, pp. 122-137. URL: <https://journals.nipes.org/index.php/jmsc/article/download/1833/1189/4658> (дата звернення: 30.03.2026).
8. The Industrial Renaissance of 2025. MicroMain, November 2025. URL: <https://micromain.com/the-industrial-renaissance-of-2025/> (дата звернення: 30.03.2026).
9. Research on the Application of Artificial Intelligence in Mechanical Engineering Design Optimization. Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Intelligence and Intelligent Information Processing, 2025. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3778534.3778599> (дата звернення: 30.03.2026).
10. AI-Enabled Manufacturing Programs to Watch in 2025. Mastercam, January 2026. URL: <https://mastercam.com/news/blog/ai-enabled-manufacturing-programs-to-watch-in-2025> (дата звернення: 30.03.2026).

11. AI Adoption in Manufacturing: Insights, ROI Benchmarks & Trends. Tech-Stack, December 2025. URL: <https://tech-stack.com/blog/ai-adoption-in-manufacturing/> (дата звернення: 30.03.2026).
12. How Generative and Agentic AI Are Transforming Manufacturing. Association of Equipment Manufacturers (AEM), 2025. URL: <https://www.aem.org/news/how-generative-and-agentic-ai-are-transforming-manufacturing-solving-workforce-challenges-and-drivin> (дата звернення: 30.03.2026).

УДК 331.5.024

**Лісовий С.В.<sup>1</sup>, Шашко В.О.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Акціонерне товариство «СВІТЛО ШАХТАРЯ», Харків, Україна; <sup>2</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ РОЗВИТКУ ВНУТРІШНЬОГАЛУЗЕВОЇ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ ТА АУТСОРСИНГУ У МАШИНОБУДУВАННІ**

**Анотація:** У статті досліджено особливості інформаційної взаємодії машинобудівних підприємств в умовах розвитку внутрішньогалузевої спеціалізації та аутсорсингу. Проаналізовано проблеми інтеграції різнорідних інформаційних систем у процесі технічної підготовки виробництва, зокрема забезпечення узгодженості даних і організації міжпідприємницької взаємодії. Розглянуто сучасний комплекс програмних засобів, включаючи CAD, CAM, CAE, PLM та ERP-системи, що використовуються на різних етапах життєвого циклу продукції. Запропоновано концептуальну багаторівневу модель інтеграції інформаційних систем, яка передбачає формування єдиного інформаційного середовища з використанням інтеграційних механізмів, стандартизованих форматів даних і веб-орієнтованих сервісів доступу. Обґрунтовано принципи інтероперабельності, безперервності інформаційних потоків та інформаційної безпеки. Показано, що впровадження моделі дозволяє підвищити ефективність технічної підготовки виробництва, скоротити час обробки інформації та зменшити кількість помилок при передачі даних між учасниками виробничого процесу.

**Ключові слова:** машинобудування; аутсорсинг; інформаційні системи; CAD/CAM/CAE; PLM; ERP; інтеграція даних.

**Abstract:** This paper examines the features of information interaction among mechanical engineering enterprises in the context of intra-industry specialization and outsourcing development. The challenges of integrating heterogeneous information systems in the process of technical preparation of production are analyzed, particularly issues related to data consistency and inter-enterprise coordination. The modern set of software tools, including CAD, CAM, CAE, PLM, and ERP systems used across different stages of the product lifecycle, is considered. A conceptual multi-level model for integrating information systems is proposed, based on the formation of a unified information environment using integration mechanisms, standardized data formats, and web-oriented access services. The principles of interoperability, continuity of information flows, and information security are substantiated. It is shown that the implementation of the proposed model improves the

*efficiency of technical preparation of production, reduces information processing time, and minimizes data transfer errors between participants in the production process.*

**Keywords:** *mechanical engineering; outsourcing; information systems; CAD/CAM/CAE; PLM; ERP; data integration.*

В сучасних умовах глобалізації та цифровізації промисловості машинобудівні підприємства України стикаються з необхідністю підвищення ефективності технічної підготовки виробництва. Особливого значення набуває використання комп'ютерних систем для автоматизації процесів проєктування, планування та управління виробництвом. Додатково до цього розвиток внутрішньогалузевої спеціалізації та поширення аутсорсингу спричиняють трансформацію традиційних підходів до організації виробничих процесів. Поточна динаміка розвитку галузі вимагає інтеграції інформаційних систем підприємств та забезпечення єдиного цифрового середовища. Внаслідок цього проблема вдосконалення комп'ютерного забезпечення технічної підготовки виробництва стає більш актуальною як у науковому, так і у практичному аспектах.

Питання автоматизації підготовки виробництва розглядалися у працях багатьох вчених, які проводили дослідження, присвячені застосуванню CAD/CAM/CAE-систем у машинобудуванні, інтеграції PLM-систем [1], а також використанню ERP-рішень для управління виробничими процесами.

У роботах українських та зарубіжних авторів висвітлені питання цифровізації виробництва [2] та оптимізації технологічних процесів [1], але не зазначені механізми організації взаємодії між підприємствами в умовах аутсорсингу та кооперації за рахунок комплексної інтеграції програмних систем. Незважаючи на значний науковий доробок, існують невирішені аспекти, пов'язані з інтеграцією різнорідних інформаційних систем у межах кількох підприємств, забезпеченням узгодженості даних між учасниками виробничого процесу та адаптацією програмного забезпечення до умов аутсорсингових моделей. З метою усунення виявлених проблем інтеграції різнорідних інформаційних систем, забезпечення узгодженості даних та підвищення ефективності інформаційної взаємодії між підприємствами розроблено концептуальну багаторівневу модель інтеграції інформаційних систем у процесі технічної підготовки виробництва.

Мета статті полягає у дослідженні особливостей інформаційної взаємодії машинобудівних підприємств в умовах внутрішньогалузевої спеціалізації та аутсорсингу, а також у розробленні концептуальної моделі інтеграції інформаційних систем, спрямованої на формування єдиного цифрового середовища технічної підготовки виробництва.

Дослідження комп'ютерного забезпечення технічної підготовки виробництва дозволили виділити єдиний комплекс програмних засобів, які сучасні підприємства використовують при проєктуванні технологічних

процесів, виборі обладнання, нормуванні ресурсів та плануванні виробництва [3]:

- CAD-системи для проектування виробів;
- CAM-системи для розроблення технологічних процесів;
- CAE-системи для інженерного аналізу;
- PLM-системи для управління життєвим циклом продукції;
- ERP-системи для планування ресурсів підприємства.

В умовах внутрішньогалузевої спеціалізації окремі підприємства виконують вузькоспеціалізовані функції, що потребує ефективного обміну даними між ними. Аутсорсинг окремих етапів виробництва (наприклад, розробка конструкції, виготовлення деталей або обробка) призводить до необхідності створення інтегрованих інформаційних платформ, які будуть відповідати таким вимогам, як:

- відкритість та сумісність систем;
- стандартизація форматів даних (STEP, IGES тощо);
- можливість віддаленої взаємодії;
- забезпечення інформаційної безпеки.

Враховуючи вплив аутсорсингу на організацію інформаційних потоків, запропоновано модель інтеграції інформаційних систем підприємств у процесі технічної підготовки виробництва (ТПВ), що базується на використанні єдиного інформаційного середовища з централізованою базою даних та веб-орієнтованими інтерфейсами доступу. Це дозволить підвищити ефективність взаємодії між підприємствами та скоротити час підготовки виробництва.

Основою для формування архітектури інформаційної системи є визначення цільової моделі взаємодії, яка залежить від виду аутсорсингу. Загальна класифікація видів аутсорингу з точки зору спеціалізації контрагентів та обміну даними між ними може бути:

1. Аутсорсинг виготовлення деталей - головне підприємство здійснює проектування виробу в CAD-системі та передає конструкторську документацію підряднику через PLM-систему [4]; підрядник, у свою чергу, використовує CAM-систему для розроблення технологічного процесу обробки.

2. Контрактне виробництво вузлів - окремі вузли (наприклад, гідравлічні системи або електронні модулі) виробляються сторонніми компаніями, обмін даними здійснюється через стандартизовані формати (STEP), що забезпечує сумісність моделей.

3. Інжиніринговий аутсорсинг - підприємство передає частину інженерних розрахунків або моделювання спеціалізованим компаніям, які використовують CAE-системи, а результати інтегруються в загальну PLM-систему.

4. Логістичний аутсорсинг - організація постачання компонентів здійснюється через ERP-системи із залученням зовнішніх логістичних операторів, що дозволяє оптимізувати запаси та скоротити витрати.

Практика показує, що ефективна взаємодія базується на чіткій організації інформаційних потоків, стандартизації процесів і використанні єдиного програмного середовища. Виходячи з цього, пропонується визначити ключовими такі напрямки організації взаємодії, як:

1. Інтеграція інформаційних систем. Впровадження єдиних цифрових платформ або інтеграційних шлюзів між CAD/CAM/PLM/ERP-системами різних підприємств. Це забезпечує безперервність даних на всіх етапах життєвого циклу продукції.
2. Стандартизація даних і процесів. Використання міжнародних стандартів (STEP, ISO) для обміну технічною інформацією. Це мінімізує ризики помилок при передачі даних.
3. Розподілене управління проектами. Використання хмарних технологій для спільної роботи над проектами в реальному часі. Це особливо важливо для підприємств, що географічно розподілені.
4. Цифрові двійники та спільне моделювання. Створення цифрових моделей виробів і процесів, доступних для всіх учасників виробничого ланцюга. Це дозволяє проводити віртуальні випробування та узгодження.
5. Забезпечення інформаційної безпеки. Впровадження систем контролю доступу, шифрування даних та розмежування прав користувачів, що є критично важливим при роботі з підрядниками.
6. Контрактна та організаційна регламентація. Чітке визначення відповідальності сторін, форматів передачі даних, термінів виконання робіт і вимог до якості продукції.

Запропонована модель інтеграції інформаційних систем підприємств у процесі технічної підготовки виробництва в умовах аутсорсингу ґрунтується на багаторівневій архітектурі та передбачає інтеграцію функціонально різномірних інформаційних систем підприємств у межах єдиного інформаційного простору (рис. 1).

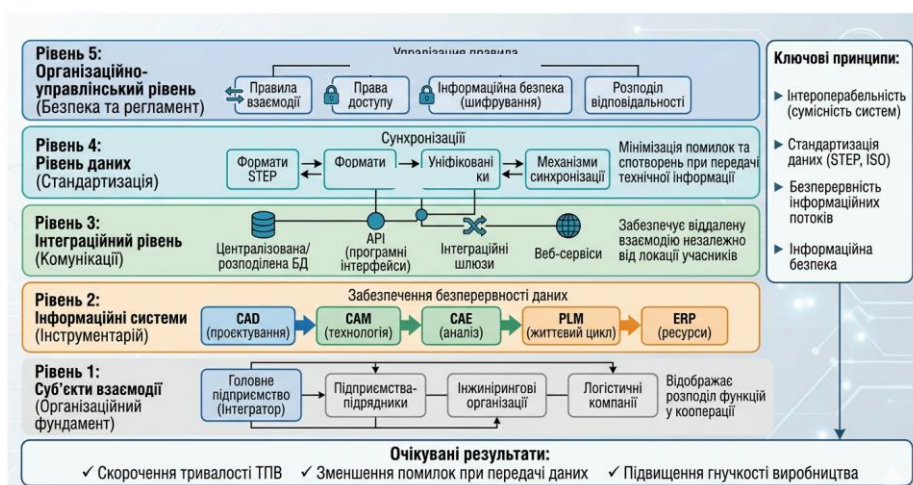


Рисунок 1. Багаторівнева модель інтеграції інформаційних систем у процесі ТПВ



На першому рівні моделі визначено суб'єкти взаємодії, до яких належать головне підприємство, що виконує функції інтегратора, а також підприємства-підрядники, інжинірингові та логістичні організації, залучені до виконання окремих етапів виробничого процесу. Така структура відображає сучасну практику розподілу функцій у межах кооперації та аутсорсингу.

Другий рівень моделі представлений сукупністю інформаційних систем, що забезпечують реалізацію процесів технічної підготовки виробництва, зокрема CAD-, CAM-, CAE-, PLM- та ERP-системами. Кожна з цих систем виконує спеціалізовані функції, однак у межах запропонованої моделі вони розглядаються як елементи єдиного інформаційного контуру, що забезпечує безперервність даних на всіх етапах життєвого циклу продукції.

Ключовим елементом моделі є інтеграційний рівень, який забезпечує взаємодію між інформаційними системами різних підприємств. На цьому рівні передбачається використання єдиного інформаційного середовища, що може бути реалізоване у вигляді централізованої або розподіленої бази даних, а також застосування інтеграційних механізмів, зокрема програмних інтерфейсів (API), обмінних шлюзів і веб-орієнтованих сервісів доступу до даних. Такий підхід дозволяє забезпечити оперативний обмін інформацією, незалежно від територіального розташування учасників виробничого процесу.

Важливим складником моделі є рівень даних, який передбачає стандартизацію форматів обміну інформацією (зокрема використання форматів STEP, IGES), уніфікацію довідників і класифікаторів, а також впровадження механізмів синхронізації даних між інформаційними системами. Це забезпечує узгодженість інформації та мінімізує ризики її спотворення або втрати під час передачі.

Організаційно-управлінський рівень моделі визначає правила та регламенти взаємодії між учасниками, включаючи розподіл відповідальності, визначення прав доступу до інформаційних ресурсів, а також впровадження заходів із забезпечення інформаційної безпеки. Це є необхідною умовою ефективного функціонування інтегрованого інформаційного середовища в умовах залучення зовнішніх контрагентів.

Функціонування моделі передбачає послідовну реалізацію процесів створення, передачі, обробки та інтеграції інформації. Зокрема, на етапі проєктування формується цифрова модель виробу в CAD-системі головного підприємства, яка передається через PLM-систему іншим учасникам у стандартизованому форматі. Підрядні організації здійснюють технологічну підготовку або інженерний аналіз із використанням CAM- та CAE-систем, після чого результати інтегруються в єдине інформаційне середовище. На завершальному етапі ERP-система забезпечує координацію ресурсів, планування виробництва та логістичне управління.

Запропонована модель базується на принципах інтероперабельності, стандартизації даних, безперервності інформаційних потоків, розподіленості обробки інформації та забезпечення інформаційної безпеки. Її реалізація дозволяє підвищити ефективність взаємодії між підприємствами, скоротити тривалість технічної підготовки виробництва, зменшити кількість помилок при передачі даних та забезпечити узгодженість дій усіх учасників виробничого процесу. Загалом організація взаємодії між підприємствами в умовах аутсорсингу обов'язково повинна базуватися на поєднанні сучасних інформаційних технологій, стандартизації та ефективного управління.

**Висновок.** У статті досліджено особливості інформаційної взаємодії машинобудівних підприємств в умовах розвитку внутрішньогалузевої спеціалізації та аутсорсингу. Встановлено, що ключовою проблемою є відсутність узгоджених механізмів інтеграції різнорідних інформаційних систем, що ускладнює обмін даними та знижує ефективність технічної підготовки виробництва.

У результаті дослідження розроблено концептуальну багаторівневу модель інтеграції інформаційних систем підприємств, яка базується на формуванні єдиного інформаційного середовища та включає рівні суб'єктів взаємодії, інформаційних систем, інтеграційної інфраструктури, даних і організаційного управління. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель враховує специфіку аутсорсингових взаємодій і забезпечує узгодженість інформаційних потоків між учасниками виробничого процесу.

Практичне значення моделі полягає у можливості підвищення ефективності технічної підготовки виробництва за рахунок скорочення часу обробки інформації, зменшення кількості помилок при передачі даних та підвищення рівня координації між підприємствами.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням прикладних механізмів реалізації моделі, зокрема із застосуванням технологій штучного інтелекту та цифрових двійників для оптимізації процесів технічної підготовки виробництва.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Brown A. *Digital Manufacturing Systems*. — London: Springer, 2021. — 540 p.
2. Іванов І. І. *Автоматизація технологічної підготовки виробництва*. — Київ: Наукова думка, 2018. — 256 с.
3. Петров П. П. *Інформаційні системи в машинобудуванні*. — Харків: ХНУРЕ, 2019. — 312 с.
4. Коваленко О. В. Використання PLM-систем у машинобудуванні // *Вісник машинобудування*. — 2022. — № 3. — С. 45–52

**Моравський Р.О., Левус Є.В.** (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна).

## **РОЗРОБКА МЕТОДУ ШИРОКОМОВНОЇ ПЕРЕДАЧІ КЕРУЮЧИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ В APACHE FLINK**

**Анотація:** У статті запропоновано метод адаптивного керування простежуваністю даних у системах потокової обробки на базі Apache Flink. Розглянуто проблему високого навантаження на обчислювальні ресурси, спричиненого збором метаданих про походження даних у розподілених конвеєрах. Запропонований підхід базується на використанні механізму широкомовного стану для синхронної передачі керуючих сигналів до всіх паралельних обробників. Розроблено контролер, що аналізує показники навантаження вузлів у режимі реального часу та динамічно змінює рівень деталізації простежуваності без зупинки системи. Проведено експериментальні дослідження з використанням симульованих IoT-навантажень, які підтвердили ефективність методу щодо зниження використання процесорних ресурсів і збереження пропускну здатності системи. Показано, що адаптивний підхід дозволяє уникати перевантажень та забезпечує баланс між продуктивністю і деталізацією аналізу даних. Отримані результати можуть бути використані при розробці високонавантажених поточкових систем обробки даних.

**Ключові слова:** Apache Flink; потокова обробка даних; простежуваність; широкомовний стан; IoT; розподілені системи; адаптивне керування.

**Abstract:** This paper proposes a method for adaptive control of data provenance in stream processing systems based on Apache Flink. The problem of high computational overhead caused by collecting metadata about data lineage in distributed pipelines is addressed. The proposed approach is based on the broadcast state mechanism, which enables synchronous delivery of control signals to all parallel operators. A controller is developed to monitor node load metrics in real time and dynamically adjust the level of provenance detail without stopping the system. Experimental evaluation using simulated IoT workloads confirms the effectiveness of the method in reducing CPU utilization while maintaining system throughput. It is shown that the adaptive approach prevents overload conditions and provides a balance between performance and the level of analytical detail. The obtained results can be applied in the development of high-load stream processing systems requiring dynamic resource management and efficient data traceability mechanisms.

**Keywords:** Apache Flink; stream processing; data provenance; broadcast state; IoT; distributed systems; adaptive control.

У системах потокової обробки зміна налаштувань “на льоту” ускладнюється розподіленою природою конвеєра. У цій роботі запропоновано метод адаптивного керування простежуваністю даних в Apache Flink на основі широкомовної передачі стану. Розроблений контролер відстежує метрики навантаження вузлів і синхронно розсилає керуючі сигнали до всіх паралельних обробників. Це дозволяє миттєво змінювати рівень збору метаданих без зупинки чи перезапуску системи. Експерименти на симульованих IoT-навантаженнях довели ефективність

такого підходу для запобігання перевантаженням процесора під час пікових спалахів трафіку.

## **1. Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами**

У системах потокової обробки простежуваність даних – це збір метаданих про походження та трансформацію кожного елемента в конвеєрі [1]. Цей процес створює значне навантаження на процесор та пам'ять. Часто обсяг цих метаданих перевищує розмір самих корисних даних, що знижує загальну пропускну здатність системи [2].

Більшість існуючих рішень фіксують рівень збору цих метаданих ще на етапі запуску. Постійна детальна простежуваність виснажує ресурси вузлів, а її повна відсутність унеможлиблює пошук помилок. Виникає критична потреба змінювати цей рівень динамічно. Проте в розподілених середовищах, таких як Apache Flink, звичайна зміна конфігурації вимагає повної зупинки та перезапуску завдання. Це призводить до втрати проміжних станів у віконних агрегаціях, необхідності перерасчетування даних із брокера повідомлень та порушення угод про рівень обслуговування (SLA). Щоб уникнути цього, системі потрібен надійний механізм миттєвої синхронізації нових налаштувань між усіма паралельними обробниками без зупинки потоку.

Практична цінність такого підходу особливо помітна в системах моніторингу IoT-сенсорів та інтелектуального обліку (smart metering) [3, 4]. Коли конвеєр виявляє аномалію, необхідно точно знати, які саме показники сенсорів викликали тривогу для технічного аудиту та пошуку першопричин. Динамічне керування дозволяє детально фіксувати походження даних лише за потреби, економлячи ресурси системи в штатному режимі.

## **2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Реалізація методів відстеження походження даних у розподілених потокових системах є предметом активних досліджень. Значна частина існуючих рішень фокусується на мінімізації накладних витрат за умови постійно увімкненого збору метаданих.

Так, фреймворк GeneaLog забезпечує детальну простежуваність для детермінованої потокової обробки, пов'язуючи вихідні кортежі з вхідними за допомогою метаданих фіксованого розміру [5]. Реконструкція історії виконується спеціальними операторами розгортання, що дозволяє уникнути збереження всіх сирих вхідних даних, проте рівень деталізації залишається незмінним. Система Ananke розширює цей підхід, запроваджуючи пряму простежуваність у режимі реального часу [6].

Інший підхід полягає у спробах ситуативного зниження навантаження. Рішення Twins пропонує механізм бінарного перемикання: повна деталізація або її повна відсутність [7]. Під час перемикання

режимів ця система створює дублікат графа обробки, що призводить до тимчасового подвоєння використання пам'яті, а у вимкненому стані будь-яка діагностична інформація втрачається.

Натомість система Captain постійно записує повну історію походження даних [8]. Вона оптимізує ресурси не шляхом зменшення кількості метаданих, а за рахунок періодичного оновлення правил аналізу. Оскільки система завжди збирає максимально можливий обсяг інформації, вона не здатна миттєво знизити навантаження у разі раптового дефіциту обчислювальних ресурсів.

### **3. Формулювання невирішених частин загальної проблеми**

Незважаючи на розвиток інструментів потокової обробки, гнучке керування метаданими залишається слабким місцем існуючих рішень. Можна виділити дві ключові невирішені проблеми.

1. У більшості сучасних систем обсяг збору метаданих (повна історія, зведена статистика чи нульовий рівень) жорстко фіксується під час компіляції або запуску. Система не здатна адаптуватися “на льоту”. Тому під час раптових сплесків трафіку вузли просто перевантажуються, а для зміни рівня деталізації доводиться повністю зупиняти конвеєр.

2. Стандартні підходи до адаптації в Apache Flink (наприклад, автомасштабування кластера) зазвичай спираються на зовнішні метрики і реагують із значною затримкою. Використання “живих” показників самої JVM (завантаження процесора та пам'яті) як миттєвого тригера для зміни рівня простежуваності раніше майже не розглядалося. Крім того, відкритим залишається інженерне завдання – як саме доставити цей керуючий сигнал до десятків паралельних обробників одночасно, не зупиняючи при цьому потік корисних даних.

### **4. Цілі статті та постановка задачі**

Головна мета роботи – розробити метод широкомовної передачі керуючих сигналів, який дозволить динамічно змінювати обсяг простежуваності даних в Apache Flink без зупинки потокового завдання.

Для досягнення цієї мети визначено такі задачі:

1. Реалізувати доставку керуючих сигналів до всіх паралельних обробників через механізм широкомовного стану (Broadcast State) [9].

2. Забезпечити миттєве перемикання стратегій збору метаданих у віконних функціях на основі отриманих сигналів.

3. Оцінити вплив розробленого методу на споживання ресурсів під час симульованих IoT-навантажень.

### **5. Виклад основного матеріалу дослідження**

Запропоноване рішення базується на топології з двома взаємодіючими потоками (Рис. 1): основним високопродуктивним потоком обробки даних та легковаговим керуючим потоком. Основний потік відповідає за прийом даних сенсорів, їх агрегацію у ковзних вікнах

(розміром 60 секунд) та виявлення аномалій. Керуючий потік функціонує як єдиний центр прийняття рішень, який періодично збирає телеметрію обчислювального вузла та визначає оптимальний рівень збору метаданих.

Для забезпечення автономності системи реалізовано механізм прямого зчитування внутрішніх системних метрик (завантаження процесора та відсоток використання пам'яті купи) через стандартні інтерфейси керування віртуальною машиною Java (JMX). Щоб уникнути постійних перемикань між режимами через дрібні коливання навантаження, алгоритм налаштовано так: він миттєво зменшує обсяг збору метаданих при перевантаженні, але повертає повну деталізацію лише після тривалої стабілізації ресурсів.

Головною особливістю запропонованого методу є широкомовне розповсюдження керуючих сигналів. Керуючий потік транслює прийняте рішення (наприклад, перехід від повної до зведеної простежуваності) до всіх паралельних обробників основного потоку. Такий підхід забезпечує атомарне та синхронне оновлення конфігурації без використання зовнішніх систем координації та блокувань, гарантуючи мінімальні затримки у прийнятті рішень.

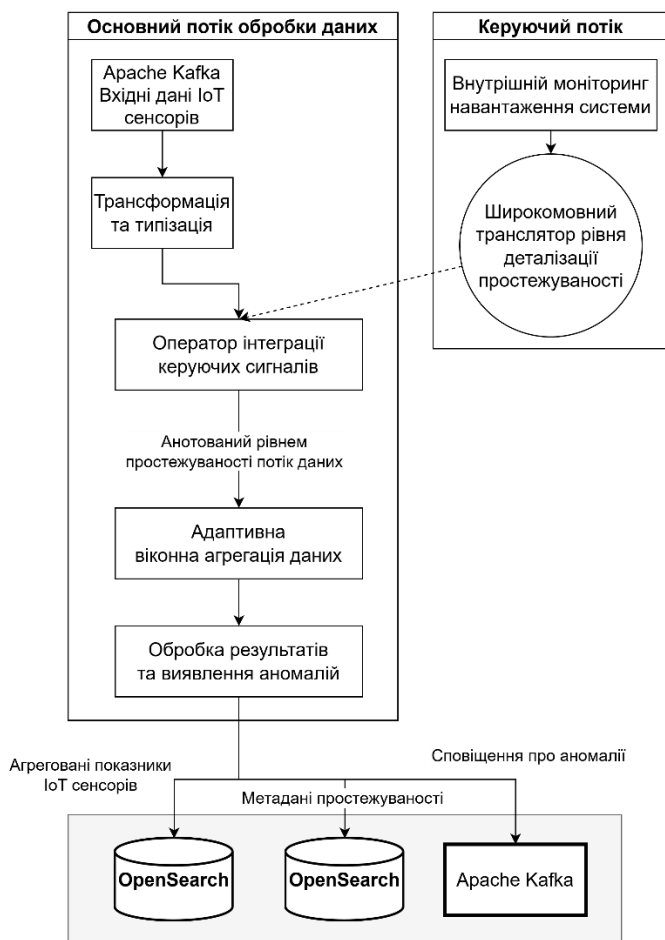


Рисунок 1. Топологія конвеєра адаптивного керування простежуваністю даних

Під час формування віконних агрегацій система динамічно обирає відповідну стратегію збору метаданих на основі поточного стану, отриманого через широкомовний канал. Зміна стратегії відбувається автоматично для кожного нового вікна, усуваючи потребу в зупинці або перезапуску конвеєра.

Для підтвердження ефективності запропонованого підходу було проведено серію експериментів у середовищі Apache Flink. Тестове навантаження симулювало 5000 IoT-сенсорів із цільовим потоком 15 000 записів за секунду. Було порівняно три режими конвеєра: без збору простежуваності (базовий рівень), з повною простежуваністю (статичною) та з адаптивною простежуваністю.

Результати тестування (Рис. 2) підтвердили, що використання шаблону широкомовного стану не створює вузьких місць у системі: у всіх конфігураціях пропускна здатність залишалася стабільною (на рівні близько 14 700 записів за секунду). Це доводить, що накладні витрати на передачу та обробку широкомовних керуючих сигналів є мінімальними.



Рисунок. 2. Результати тестування

Аналіз використання обчислювальних ресурсів показав суттєві переваги адаптивного підходу. Повна простежуваність генерує постійне високе навантаження, споживаючи від 35% до 41% ресурсів процесора (у 6–9 разів більше за базовий рівень). Завдяки динамічному перемиканню стратегій адаптивний режим на коротких інтервалах (3 хвилини) знизив використання процесора до 18%, а при тривалих запусках (30 хвилин) показник стабілізувався на рівні 8% (лише у 1,7 рази більше за базовий рівень). Це свідчить про те, що система успішно розпізнає дефіцит ресурсів, тимчасово знижує обсяг метаданих і зберігає стабільність вузла без втручання оператора.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено проблему жорсткого налаштування збору даних простежуваності у розподілених системах потокової обробки. Відповідно до поставлених задач отримано такі результати:

1. Розроблено контролер для Apache Flink, який використовує механізм широкомовного стану. Він безперервно відстежує показники навантаження обчислювальних вузлів і миттєво розсилає керуючі команди до всіх паралельних процесів. Це дозволяє динамічно змінювати обсяг збору метаданих без зупинки системи чи втрати проміжних результатів обчислень.

2. Тестування на симульованих даних від IoT-сенсорів підтвердило здатність методу запобігати перевантаженням. Під час стабільної роботи адаптивний режим використовував лише в 1,7 рази більше ресурсів процесора порівняно з повною відсутністю збору даних. Для порівняння, постійна повна деталізація вимагала у 9 разів більше ресурсів. Під час пікового трафіку система успішно економила ресурси, зберігаючи пропускну здатність, а після стабілізації автоматично відновлювала детальний запис.

3. Практична цінність рішення полягає у можливості проводити глибокий аудит даних навіть на обладнанні з обмеженими обчислювальними ресурсами. Поточним недоліком методу є орієнтація лише на показники основної оперативної пам'яті, що не завжди точно відображає стан підсистем зовнішнього зберігання. У майбутньому планується поєднати цей механізм із вбудованими засобами автоматичного масштабування та додати алгоритми для самостійного підбору порогових значень навантаження.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Herschel M., Diestelkämper R., Ben Lahmar H. A survey on provenance: What for? What form? What from? The VLDB Journal. 2017. Vol. 26, No 6. P. 881–906. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00778-017-0486-1>.
2. Ye Q., Lu M. s2p: Provenance Research for Stream Processing System. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, No 12. P. 5523. DOI:<https://doi.org/10.3390/app11125523>.
3. Moravskyi R., Levus Y. Analysis of real-time processing approaches for large data volumes in metering infrastructure. Journal of Lviv Polytechnic National University: Information Systems and Networks. 2024. Vol. 15. P. 169–183. DOI:<https://doi.org/10.23939/sisn2024.15.169>.
4. Mohamed Z. Data streaming provenance in advanced metering infrastructures: Master's thesis. Chalmers University of Technology, 2023. URL: <https://hdl.handle.net/2077/79292> (дата звернення: 01.04.2026).
5. Palyvos-Giannas D., Gulisano V., Papatriantafilou M. GeneaLog: Fine-Grained Data Streaming Provenance at the Edge. Proceedings of the 19th International Middleware Conference. 2018. P. 227–238. DOI:<https://doi.org/10.1145/3274808.3274826>.
6. Ananke: a streaming framework for live forward provenance / Palyvos-Giannas D., Havers B., Papatriantafilou M., Gulisano V. Proceedings of the VLDB Endowment. 2020. Vol. 14, No 3. P. 391–403. DOI:<https://doi.org/10.14778/3430915.3430928>.
7. Poster: Twins, a Middleware for Adaptive Streaming Provenance at the Edge / Shahri M. G., Erlandsson A., Palyvos-Giannas D., Gulisano V. Proceedings of the 22nd International Conference on



- Distributed Computing and Networking (ICDCN '21). 2021. P. 235–236. DOI:<https://doi.org/10.1145/3427796.3433931>.
8. Incorporating gradients to rules: Towards lightweight, adaptive provenance-based intrusion detection / Wang L. et al. Proceedings 2025 Network and Distributed System Security Symposium. 2025. DOI:<https://doi.org/10.14722/ndss.2025.230822>.
9. Apache Flink Documentation. The Broadcast State Pattern. URL: [https://nightlies.apache.org/flink/flink-docs-stable/docs/dev/datastream/fault-tolerance/broadcast\\_state](https://nightlies.apache.org/flink/flink-docs-stable/docs/dev/datastream/fault-tolerance/broadcast_state) (дата звернення: 01.04.2026).

УДК 621.7.01:620.178:669.295

**Набоченко В.О., Стецько А.Є.** (Національний університет  
«Львівська політехніка», м. Львів, Україна).

## **ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ШЛЯХОМ ХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ, ДИФУЗІЙНОГО ТИТАНУВАННЯ ТА КАРБОТИТАНУВАННЯ**

**Анотація:** У роботі узагальнено сучасні досягнення інженерії поверхні, зокрема методів хімічного осадження, дифузійного титанування та карботитанування, з акцентом на підвищення точності, ефективності та екологічності процесів. Проаналізовано розвиток технологій газофазного осадження (CVD) та атомно-шарового осадження (ALD), що забезпечують контроль структури покриттів на нанорівні. Розглянуто сучасні підходи до формування функціональних покриттів, включаючи використання зовнішніх полів, гібридних технологій і градієнтних структур. Досліджено особливості дифузійного титанування та карботитанування, які дозволяють формувати надтверді шари з високою зносостійкістю. Визначено основні проблеми, зокрема високу енергоємність процесів, складність нуклеації та екологічні обмеження прекурсорів. Показано, що інтеграція сучасних матеріалознавчих підходів із цифровими технологіями відкриває нові можливості для оптимізації процесів зміцнення поверхонь. Отримані результати можуть бути використані при розробці інноваційних покриттів для машинобудування, енергетики та аерокосмічної галузі.

**Ключові слова:** інженерія поверхні; хімічне осадження; дифузійні процеси; титанування; карботитанування; ALD; покриття.

**Abstract:** This paper summarizes recent advances in surface engineering, particularly in chemical deposition, diffusion titanizing, and carbotitanizing methods, with an emphasis on improving precision, efficiency, and environmental sustainability. The development of chemical vapor deposition (CVD) and atomic layer deposition (ALD) technologies is analyzed, enabling nanoscale control of coating structure. Modern approaches to functional coating formation are considered, including the use of external fields, hybrid technologies, and gradient structures. The features of diffusion titanizing and carbotitanizing are investigated, allowing the formation of ultrahard layers with high wear resistance. Key challenges are identified, including high energy consumption, nucleation limitations, and environmental constraints related to precursors. It is shown that integrating advanced

*materials science approaches with digital technologies opens new opportunities for optimizing surface strengthening processes. The obtained results can be applied in the development of advanced coatings for mechanical engineering, energy, and aerospace industries.*

**Keywords:** surface engineering; chemical deposition; diffusion processes; titanizing; carbotitanizing; ALD; coatings.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Сучасне машинобудування, енергетика та аерокосмічна галузь вимагають розробки матеріалів, здатних працювати в екстремальних умовах: за високих температур, інтенсивного тертя та в агресивних середовищах. Інженерія поверхні та хіміко-термічна обробка (ХТО) є одними з основних методів вирішення цієї проблеми. Глобальний перехід до енергозберігаючих та екологічно безпечних технологій потребує модернізації класичних методів інженерії поверхні. Деякі, вже традиційні процеси, такі як дифузійне титанування, потребують значних витрат енергії через необхідність нагрівання до температур понад 1000 °С, що також може призводити до(змін структури) серцевини деталі [7]. Тому актуальним напрямком є створення новітніх підходів у сферах хімічного осадження металів (CVD, ALD), дифузійного титанування та карботитанування, що відповідатимуть сучасним викликам ефективності та надійності [1, 2].

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Дослідження останніх років демонструють стрімкий розвиток методів газофазного осадження та дифузійного насичення. Науковці все частіше звертаються до гібридних технологій. У роботах провідних академічних видань детально аналізується вплив плазми, електричних та магнітних полів на кінетику хімічного осадження з газової фази (CVD), що дозволяє керувати мікроструктурою та щільністю плівок [1]. Метод атомно-шарового осадження (ALD) досяг рівня, коли можливе прецизійне нанесення металічних плівок навіть на складні 3D-структури. Використання сучасних прекурсорів та оптимізація компонентів поверхні дозволяють значно покращити нуклеацію тугоплавких металів та їх оксидів [2, 4].

Значний внесок у розвиток інженерії поверхні належить українським науковим школам. Зокрема, дослідники Сумського державного університету розробили оптимізовані режими дифузійного титанування твердих сплавів, досягнувши мікротвердості шарів карбіду титану (TiC) до 34,0 ГПа [3]. Вчені Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України продовжують впроваджувати технології формування захисних покриттів та композитів для умов гарячого деформування [8].

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на значні теоретичні та практичні здобутки, низка проблем залишається невирішеною:

1. Висока енергоємність: Класичне дифузійне насичення потребує впливу довготривалих високих температур (900–1100 °C), що обмежує застосування цих методів для сталей, чутливих до перегріву, та призводить до короблення деталей [6].

2. Проблеми нуклеації при ALD: Осадження чистих перехідних металів методом ALD стикається з труднощами на початкових етапах росту плівки через низьку щільність реакційних центрів на підкладках [2].

3. Екологічність прекурсорів: Багато процесів CVD використовують токсичні металоорганічні сполуки, що вимагає розробки нових, більш безпечних реагентів [1, 4].

## **Цілі статті та постановка задачі.**

Головною метою статті є комплексний аналіз сучасного стану, нових можливостей та доступних технологічних досягнень у галузі інженерії поверхні за період останніх років. Для досягнення цієї мети поставлено завдання: проаналізувати тенденції розвитку методів хімічного (CVD) та атомно-шарового (ALD) осадження металів; дослідити новітні підходи в технологіях дифузійного титанування та карботитанування; систематизувати досягнення українських та іноземних дослідницьких центрів.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Хімічне осадження з газової фази (CVD) залишається одним з найбільш адаптивних методів створення функціональних покриттів. Головним трендом останніх років є впровадження зовнішніх полів (Field-enhanced CVD) [1]. Використання плазмово-хімічної та фотодисоціації, а також накладання магнітних полів дозволяє подолати термодинамічні обмеження, знижуючи робочу температуру процесу та забезпечуючи формування нанокристалічних плівок із заданою текстурою [1]. Окрім традиційного CVD, широкого поширення набуває метод окиснювального хімічного осадження (oCVD), який уможливорює нанесення провідних металополімерних плівок у вакуумі за відносно низьких температур [5].

Метод атомно-шарового осадження (ALD) переживає етап адаптації для осадження чистих перехідних металів. Проривними стали дослідження механізмів модифікації поверхні малими металоорганічними молекулами, що створює нові реакційні центри, значно прискорюючи нуклеацію та забезпечуючи формування суцільних плівок тугоплавких та благородних металів [2].

Дифузійне титанування - ефективний метод створення надтвердих шарів на поверхні сталей та сплавів. Нещодавно українські дослідники досягли значного прогресу в титануванні твердих сплавів марок ВК8 та

Ti5K6 [3]. Використання спеціальної газової фази з активатором ( $\text{CCl}_4$ ) при температурі  $1050^\circ\text{C}$  дозволило сформувати багатошарове покриття. Утворений шар карбіду титану товщиною до 5 мкм має мікротвердість до 34,0 ГПа, що суттєво підвищує зносостійкість різального інструменту [3].

Паралельно світова наука шукає шляхи зниження температур обробки. Застосування дулекс-технологій (наприклад, послідовного борування та нітрування) дозволяє формувати шари при температурах  $1000^\circ\text{C}$  та  $550^\circ\text{C}$  відповідно, що запобігає деформації складнопрофільних деталей [6].

Карботитанування - передбачає одночасне насичення поверхні вуглецем і титаном або азотом і вуглецем у присутності титану (утворення карбонітридів  $\text{TiCN}$ ) [7]. Цей підхід поєднує надвисоку твердість карбідів з підвищеною в'язкістю та низьким коефіцієнтом тертя нітридів. Університетські центри України активно досліджують вплив карботитанування на властивості інструментальних та штампових сталей [8]. Насичення в середовищі сольових розплавів та газових сумішах дозволяє підвищити довговічність штампової оснастки в умовах ударно-абразивного зношування. Формування градієнтної зони  $\text{TiCN}$  забезпечує плавний перехід напружень від надтвердої поверхні до пластичної серцевини металу, що радикально знижує ймовірність відшарування покриття [8].

Таблиця 1. Порівняння ключових технологій

| Характеристика                  | Хімічне осадження (ALD/Electroless)                         | Дифузійне титанування                                            | Карбо-титанування                     |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Основний драйвер останніх років | Селективність (AS-ALD) та екологічність (Bio-activation)    | Зниження температур (MAX-фази) та гібридизація                   | Наноструктурування та градієнтні шари |
| Точність товщини                | Атомарна (ALD) / Висока (Electroless)                       | Середня (залежить від часу/T)                                    | Висока (PVD/CVD)                      |
| Робочі температури              | Низькі ( $< 400^\circ\text{C}$ )                            | Високі ( $800-1100^\circ\text{C}$ )<br>↓ (тенденція до зниження) | Середні (PVD) / Високі (CVD)          |
| Екологічні аспекти              | Відмова від $\text{Cr(VI)}$ , перехід на неводні розчинники | Зменшення токсичних активаторів у сумішах                        | Контроль викидів при CVD              |

|                      |                                              |                                        |                                        |
|----------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Основні застосування | Електроніка, сенсори, каталіз, захист Li-ion | Штампи, прес-форми, важке навантаження | Ріжучий інструмент, декор, біомедицина |
|----------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|

В табл. 1 наведено порівняння між ключовими технологіями за їх основними характеристиками.

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

Методи газофазного осадження (CVD та ALD) перейшли на новий рівень керування структурою завдяки застосуванню плазмово-хімічних ефектів та оптимізації центрів нуклеації [1, 2]. Це відкриває шляхи для формування надтонких металевих покриттів безпосередньо для потреб мікроелектроніки та каталізу [5].

У сфері дифузійного титанування та карботитанування спостерігається тенденція до створення гібридних багатошарових систем. Українські науковці зробили значний практичний внесок, оптимізувавши режими формування високотвердих шарів TiC на твердих сплавах (твердість до 34,0 ГПа), що значно підвищує експлуатаційний ресурс інструменту [3, 8].

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці низькотемпературних екологічних середовищ для дифузійного насичення [6, 7], а також у інтеграції цифрових моделей для прогнозування кінетики росту шарів при складній багатокритеріальній хіміко-термічній обробці.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Singh B., Fischer T., Mathur S. Field-enhanced chemical vapor deposition: new perspectives for thin film growth // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2025. – Vol. 13. – P. 20104–20142.
2. Zaera F. The surface chemistry of the atomic layer deposition of metal thin films // *Nanotechnology*. – 2024. – Vol. 35. – P. 362001.
3. Dehula A., Kharchenko N., Hovorun T., Sitnikov V., Hryb V., Pakhnenko D. Structure and Properties of Diffusion Titanium Coatings Based on Hard Alloys // *Journal of Nano- and Electronic Phys.* – 2025. – Vol. 17, No 6. – P. 06008-1–06008-5.
4. Lamm B. W. Chemical Vapor Deposition of Zirconium Compounds: A Review // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, No 2. – P. 266.
5. Ozcan H. et al. Recent advances in the oxidative chemical vapor deposition (oCVD) method for the fabrication of conjugated conducting polymer thin films // *Materials Science and Surface Engineering*. – 2024. – P. 272-275.
6. Bricin D., Kratochvilová L., Leták R., Vojta L. Effect of chemical-heat treatment on the properties of titanium // *Journal of Material Science and Technology*. – 2023. – Vol. 30. – P. 15-22.
7. Термічна і хіміко-термічна обробка металів: навч. посіб. / Національний університет «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2023. – 102 с.
8. Сидорчук О. М. Розвиток наукових засад формування структури та властивостей при виготовленні штампових сталей для гарячого деформування міді, мідно-нікелевих та алюмінієвих сплавів : дис.... канд. техн. наук : 05.16.01 / Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – Київ, 2021. – 220 с.

**Новіков Ф. В.** (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна).

## **АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ ТА УМОВ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ**

**Анотація:** У роботі наведено розроблений теоретичний підхід до роздільного урахування складових тангенціальної сили різання в процесі шліфування, зокрема часток, обумовлених процесами «чистого різання» та тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Запропонований підхід базується на аналізі загального енергетичного балансу процесу шліфування та дозволяє диференціювати внесок окремих фізичних механізмів у формування сили різання. Це забезпечує більш точне визначення умов ефективного протікання процесу та відкриває можливості для підвищення продуктивності обробки. Показано, що роздільний аналіз складових сили різання сприяє обґрунтуванню раціональних режимів шліфування, які забезпечують покращення параметрів точності та якості обробленої поверхні. Крім того, запропонований підхід дозволяє поглибити розуміння фізичних закономірностей процесу шліфування та розширити уявлення про його технологічні можливості в сучасному машинобудуванні.

**Ключові слова:** шліфування; сила різання; тангенціальна складова; тертя; енергетичний баланс; точність обробки; якість поверхні.

**Abstract:** This paper presents a developed theoretical approach for separate consideration of the components of the tangential cutting force in the grinding process, particularly those associated with pure cutting and friction between the grinding wheel and the workpiece material. The proposed approach is based on the analysis of the overall energy balance of grinding and enables differentiation of the contributions of individual physical mechanisms to the formation of the cutting force. This provides a more accurate determination of effective process conditions and opens opportunities for increasing machining productivity. It is shown that the separate analysis of cutting force components contributes to substantiation of rational grinding regimes that improve accuracy and surface quality parameters. Furthermore, the proposed approach allows a deeper understanding of the physical principles governing the grinding process and expands the assessment of its technological capabilities in modern mechanical engineering applications.

**Keywords:** grinding; cutting force; tangential component; friction; energy balance; machining accuracy; surface quality.

### **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Процеси обробки матеріалів шліфуванням знайшли широке застосування у машинобудівному виробництві завдяки можливості досягнення високих показників точності та якості оброблюваних поверхонь виробів. Однак їх суттєвим недоліком є висока енергоємність порівняно із процесами обробки матеріалів ріжучими лезовими інструментами. Це приводить до високої силової і теплової напруженості

процесу шліфування, виникненню значних сил і температур різання та зменшенню продуктивності обробки. Застосування прогресивних методів правлення шліфувальних кругів дозволяє в ряді випадків досягти суттєвого зменшення енергоємності обробки. Однак вона все ж залишається на достатньо високому рівні, що обмежує ефективність застосування процесів шліфування.

Основним чинником, що приводить до зниження технологічних можливостей шліфування, є інтенсивне тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в зоні різання. Воно стає значним, коли процес шліфування здійснюється в режимі затуплення шліфувального круга. У цьому випадку має місце не тільки тертя зношених абразивних зерен круга, а ще й тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом, що приводить до значного зростання енергоємності обробки, особливо, під час застосування алмазних кругів на металевих зв'язках. Тому питання суттєвого зменшення енергоємності процесу шліфування шляхом зменшення сили тертя під час шліфування є традиційно важливим і актуальним в технології машинобудування з погляду можливостей зменшення силової і теплової напруженості процесу шліфування, підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У роботах [1, 2] наведено основні підходи до вирішення питань зменшення енергоємності процесу шліфування. Показано ефективність їх практичного застосування. Однак вони базуються лише на експериментальних дослідженнях сили різання та потужності шліфування, за якими потім визначається енергоємність обробки [3, 4]. Це не дозволяє в повній мірі розкрити закономірності формування високої енергоємності обробки під час шліфування. Тому для вирішення цих питань необхідно проведення теоретичних досліджень в цьому напрямі, оскільки закономірності формування енергоємності, особливо під час шліфування, надто складні і не можуть бути вирішені лише на основі проведення експериментальних досліджень.

#### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Основними, до кінця не вирішеними питаннями щодо формування енергоємності обробки під час шліфування, слід розглядати питання роздільного урахування часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. Як показує практика, це занадто складна задача, яку і до теперішнього часу не вирішено в теорії шліфування. Тому дану роботу й присвячено розв'язанню цієї задачі, яка має важливе теоретичне й практичне значення.

#### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою роботи є встановлення науково обґрунтованих теоретичних рішень щодо можливостей визначення енергоємності обробки під час шліфування на основі роздільного урахування часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, що є важливим для суттєвого підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки.

Задачі дослідження:

- 1) розроблення математичної моделі роздільного визначення часток тангенціальної складової сили різання, обумовлених процесами «чистого різання» і тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом;
- 2) експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень;
- 3) встановлення характеру впливу сили «чистого різання» і сили тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом на продуктивність обробки та параметри силової напруженості процесу шліфування. Обґрунтування на цій основі умов підвищення ефективності процесу шліфування.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

В роботі для виконання поставлених задач дослідження наведено новий теоретичний підхід до визначення тангенціальної складової сили «чистого різання» на основі відомої аналітичної залежності [5]:

$$P_{z.piz} = \sigma \cdot S_{\text{сум}}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – умовне напруження різання (енергоємність обробки), Н/м<sup>2</sup>;  $S_{\text{сум}}$  – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами шліфувального круга, м<sup>2</sup>;  $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $V_{\text{дет}}$  – швидкість деталі, м/с;  $B$  – ширина шліфування, м;  $t$  – фактична глибина шліфування, м.

Величина  $S_{\text{сум}}$  визначається наступним чином. За час обробки  $\tau$  відбувається знімання оброблюваного матеріалу об'ємом  $\mathcal{Q}$ , який можна представити у вигляді стрічки довжиною  $l$  та площею поперечного перерізу  $S_{\text{сум}} = B \cdot a_z$ , де  $a_z$  – умовна товщина стрічки, м. Тоді  $\mathcal{Q} = S_{\text{сум}} \cdot l$ , звідки можна визначити величину  $S_{\text{сум}} = \mathcal{Q} / l$ . Із урахуванням залежностей  $l = V_{\text{кр}} \cdot \tau$  (де  $V_{\text{кр}}$  – швидкість круга, м/с) і  $\mathcal{Q} = Q \cdot \tau$ , маємо:

$$S_{\text{сум}} = \frac{Q}{V_{\text{кр}}}. \quad (2)$$

Як видно, величина  $S_{\text{сум}}$  визначається відношенням продуктивності обробки  $Q$  до швидкості круга  $V_{\text{кр}}$ .

Для умов шліфування величина  $\sigma$  визначається відомою залежністю [5, 6]:



$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{cm}}{K_{ш.риз}}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{cm}$  – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>;  
 $K_{ш.риз} = P_{z.риз} / P_{y.риз}$  – коефіцієнт абразивного різання («чистого різання»);  
 $P_{y.риз}$  – радіальна складова сили «чистого різання».

Після підстановки залежності (3) у залежність (1), маємо:

$$P_{z.риз} = \sqrt{2 \cdot \sigma_{cm} \cdot S_{сум} \cdot P_{y.риз}}. \quad (4)$$

У результаті встановлено аналітичну залежність для визначення величини  $P_{z.риз}$ . Як видно, вона нелінійно пов'язана із величинами  $S_{сум}$  та  $P_{y.риз}$ : чим вони більше, тим більше величина  $P_{z.риз}$ .

При цьому коефіцієнт абразивного різання («чистого різання»)  $K_{ш.риз} = P_{z.риз} / P_{y.риз}$  визначається залежністю:

$$K_{ш.риз} = \frac{P_{z.риз}}{P_{y.риз}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_{cm} \cdot S_{сум}}{P_{y.риз}}}. \quad (5)$$

Із залежності (5) випливає, що чим більше величина  $P_{y.риз}$  і менше величина  $S_{сум}$ , тим менше  $K_{ш.риз} = P_{z.риз} / P_{y.риз}$ , що відповідає відомим практичним даним. Отже, підвищити  $K_{ш.риз} = P_{z.риз} / P_{y.риз}$  та, відповідно, ріжучу здатність шліфувального круга можна або збільшенням величини  $S_{сум}$ , або зменшенням величини  $P_{y.риз}$ , яка негативно впливає на ефективність процесу шліфування [7].

Для кількісного визначення величини  $P_{z.риз}$  розглянемо процес плоского шліфування за пружною схемою (радіальна складова сили різання  $P_y = 60$  Н) абразивним кругом 24А40М36К5 плоских зразків із сталі Р18 ( $\sigma_{cm} = 3600$  Н/м<sup>2</sup>). Умови шліфування:  $V_{кр} = 26$  м/с; швидкість деталі –  $V_{дем} = 6$  м/хв; ширина шліфування –  $B = 10$  мм.

В процесі шліфування експериментально встановлено значення фактичної глибини шліфування  $t$  та потужності шліфування  $N$  в залежності від часу обробки  $\tau$  (табл. 1). За цими експериментально встановленими значеннями  $t$  і  $N$  розраховано значення тангенціальної складової сили різання  $P_z = N / V_{кр}$ , коефіцієнта абразивного різання (коефіцієнта шліфування)  $K_{ш} = P_z / P_y$ , продуктивності обробки  $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$  та умовного напруження різання  $\sigma = N / Q$  (табл. 1).

Слід зазначити, що умовне напруження різання  $\sigma = P_{z.риз} / S_{сум} = P_{z.риз} V_{кр} / Q = N / Q$  і енергоємність обробки  $\sigma = N / Q$  – це одна і та ж фізична величина, оскільки визначається (після нескладних математичних перетворень) однією залежністю. Розмірності в умовного напруження різання і енергоємності обробки теж однакові: в умовного напруження

різання –  $\text{Н/м}^2$ , а в енергоємності обробки (після перетворень) –  $\text{Дж/м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м/м}^3 = \text{Н/м}^2$ .

Таблиця 1. Вплив часу обробки на параметри шліфування за пружною схемою плоских зразків із сталі Р18 ( $V_{кр} = 26 \text{ м/с}$ ;  $V_{дет} = 6 \text{ м/хв}$ ;  $B = 10 \text{ мм}$ ;  $P_y = 60 \text{ Н}$ )

| Номер експерименту | Час обробки $\tau$ , хв | Фактична глибина шліфування $t$ за 5 проходжень, мм | Продуктивність обробки $Q$ , $\text{мм}^3/\text{хв}$ | Потужність шліфування $N$ , Вт | Тангенціальна складова сили різання $P_z$ , Н | Коефіцієнт шліфування $K_{ш}$ | Умовне напруження різання $\sigma \cdot 10^3$ , $\text{Н/мм}^2$ |
|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1                  | 0,1                     | 0,037                                               | 2220                                                 | 840                            | 28,8                                          | 0,480                         | 22,7                                                            |
| 2                  | 0,5                     | 0,013                                               | 780                                                  | 854                            | 22,4                                          | 0,373                         | 65,7                                                            |
| 3                  | 1,0                     | 0,008                                               | 480                                                  | 630                            | 21,5                                          | 0,358                         | 78,7                                                            |
| 4                  | 2,0                     | 0,006                                               | 360                                                  | 522                            | 17,9                                          | 0,299                         | 87,0                                                            |
| 5                  | 3,0                     | 0,005                                               | 300                                                  | 480                            | 16,4                                          | 0,273                         | 96,0                                                            |
| 6                  | 5,0                     | 0,003                                               | 180                                                  | 450                            | 15,2                                          | 0,253                         | 150,0                                                           |

У результаті виявлено (табл. 1), що за 5 хвилин обробки фактична глибина шліфування  $t$  зменшилася з 0,037 мм до 0,003 мм, тобто у 12,3 рази. Відповідно, у стільки ж разів зменшилася і продуктивність обробки  $Q$ , що пов'язано із затупленням шліфувального круга. Однак при цьому потужність шліфування  $N$ , тангенціальна складова сили різання  $P_z$  та коефіцієнт шліфування  $K_{ш} = P_z / P_y$  зменшилися незначно – менше, ніж у 2 рази. Отже, користуючись лише наведеними експериментальними даними, складно визначити зміни внутрішніх параметрів обробки, які привели до суттєвої зміни продуктивності обробки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ . Тому слід скористатися залежністю (4) для встановлення чинників, що привели до зменшення продуктивності обробки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  в 12,3 рази зі збільшенням часу обробки.

Для цього у табл. 2 (за умови  $P_{y.піз} = P_y = 60 \text{ Н}$ ) наведено розрахункові значення величин  $P_{z.піз}$ ,  $K_{ш.піз} = P_{z.піз} / P_y$ ,  $\sigma_{піз} = P_{z.піз} / S_{сум}$ , сили тертя  $P_{z.мп} = P_z - P_{z.піз}$  та коефіцієнта тертя  $f = P_{z.мп} / P_y$ . Як видно, сила тертя  $P_{z.мп}$  шліфувального круга із оброблюваним матеріалом дорівнює різниці тангенціальної складової сили різання  $P_z$  і тангенціальної складової сили «чистого різання»  $P_{z.піз}$ .

Таблиця 2 – Розрахункові значення параметрів силового напруження процесу шліфування  $P_{z.піз}$ ,  $K_{ш.піз} = P_{z.піз} / P_y$ ,  $\sigma_{піз} = P_{z.піз} / S_{сум}$ ,  $P_{z.мп} = P_z - P_{z.піз}$ ,  $f = P_{z.мп} / P_y$

| Номер експерименту | Час обробки $\tau$ , хв | $P_{z.piz}$ , Н | $K_{ш.piz}$ | $\sigma_{piz} \cdot 10^3$ , Н/мм <sup>2</sup> | $P_{z.mp}$ , Н | Коефіцієнт тертя $f$ |
|--------------------|-------------------------|-----------------|-------------|-----------------------------------------------|----------------|----------------------|
| 1                  | 0,1                     | 24,8            | 0,413       | 17,4                                          | 4,0            | 0,067                |
| 2                  | 0,5                     | 14,7            | 0,245       | 29,4                                          | 7,7            | 0,128                |
| 3                  | 1,0                     | 11,57           | 0,193       | 37,32                                         | 9,93           | 0,165                |
| 4                  | 2,0                     | 9,97            | 0,166       | 43,34                                         | 7,93           | 0,132                |
| 5                  | 3,0                     | 9,11            | 0,151       | 47,44                                         | 7,29           | 0,12,5               |
| 6                  | 5,0                     | 7,0             | 0,117       | 59,82                                         | 8,2            | 0,136                |

Виходячи із розрахункових даних, наведених в табл. 2, величина  $P_{z.piz}$  зменшується із часом обробки значно інтенсивніше, ніж величина  $P_z$ . При цьому величина  $P_{z.mp}$  за 5 хвилин обробки стає більше величини  $P_{z.piz}$ . Це вказує на те, що зменшення продуктивності у 12,3 разів за 5 хвилин обробки обумовлено, як процесом затуплення шліфувального круга (оскільки відбулося зменшення складової сили різання  $P_{z.piz}$ ), так і збільшенням сили тертя  $P_{z.mp}$  шліфувального круга з оброблюваним матеріалом в зоні різання. При цьому коефіцієнт шліфування («чистого різання»)  $K_{ш.piz}$  значно інтенсивніше зменшується із часом обробки порівняно із загальним коефіцієнтом шліфування  $K_{ш}$ . Це також вказує на значну роль затуплення шліфувального круга у зменшенні продуктивності обробки  $Q$ .

Таким чином, встановлено, що роздільне визначення сили «чистого різання» та сили тертя в зоні різання дозволяє більш об'єктивно оцінити зміни параметрів силової напруженості процесу шліфування та на їх основі встановити дійсні причини суттєвого зменшення продуктивності обробки. Також отримане теоретичне рішення дозволяє більш глибоко підходити до аналізу фізичних закономірностей процесу шліфування та встановлення його технологічних можливостей, оскільки, користуючись лише експериментальними даними, складно визначити зміни внутрішніх параметрів обробки, які приводять до суттєвої зміни продуктивності обробки.

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

В роботі розроблено математичну модель встановлення тангенціальної складової сили різання у вигляді суми двох складових, які визначають силу «чистого різання» і силу тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом в зоні різання. Це відкриває нові можливості аналізу процесу шліфування з погляду підвищення продуктивності та параметрів точності і якості обробки. Тому перспективами подальших досліджень є застосування отриманих теоретичних рішень щодо обґрунтування експериментальних даних та аналізу досліджуваних параметрів шліфування, розробленню практичних рекомендацій із підвищення ефективності процесів шліфування.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Технологія машино- та приладобудування: підручник / О. В. Якимов, В. І. Марчук, П. А. Лінчевський, О. О. Якімов, В. П. Ларшин. Луцьк: ЛДТУ, 2005. 710 с.
2. Теплофізика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник, Д. В. Іоргачов. Одеса: Астропринт, 2000. 256 с.
3. Полянський В. І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2021. 41 с.
4. Лавріненко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков / Під заг. ред. академіка НАНУ М. В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
5. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. 412 с. URL: <http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/10068>
6. Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія / Ф. В. Новіков. Дніпро: ЛІРА, 2024. 460 с. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/34842>
7. Новіков Ф. В. Концепції розвитку технологічних рішень професора Якімова Олександра Васильовича : монографія / Ф. В. Новіков, В. Б. Наддачин. Дніпро : ЛІРА, 2025. 468 с. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/36901>

УДК 658.5:005.21

**Новіков Ф. В., Новіков Д. Ф.** (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна).

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ СОБІВАРТОСТІ МЕТАЛООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Анотація.** У роботі розроблено математичну модель собівартості металообробного виробництва з урахуванням впливу швидкості різання та стійкості різального інструменту. На основі аналітичного дослідження встановлено існування мінімуму собівартості обробки при зміні швидкості різання, що дозволяє визначити раціональні режими різання. Показано, що оптимальна стійкість інструменту, яка відповідає мінімальній собівартості процесу, визначається виключно економічними параметрами, зокрема витратами на інструмент, часом обробки та витратами на експлуатацію обладнання. Проведений аналіз підтверджує доцільність використання високошвидкісної обробки із застосуванням інструментів зі зносостійкими покриттями. Застосування сучасних верстатів з числовим програмним керуванням типу «обробний центр» забезпечує реалізацію оптимальних режимів різання та підвищення ефективності виробництва. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів у машинобудуванні та зниження витрат при обробці деталей.

**Ключові слова:** собівартість; швидкість різання; стійкість інструменту; високошвидкісна обробка; ЧПК; обробний центр; оптимізація.

**Abstract:** This paper presents a mathematical model of the cost of metalworking production, taking into account the influence of cutting speed and tool life. Based on analytical investigation, the existence of a minimum processing cost with increasing cutting speed is established, enabling the determination of rational cutting conditions. It is shown that the optimal tool life corresponding to the minimum processing cost is determined solely by economic parameters, including tool cost, machining time, and equipment exploitation costs. The analysis confirms the effectiveness of high-speed machining using cutting tools with wear-resistant coatings. The application of modern numerically controlled machining centers ensures the implementation of optimal cutting regimes and improves production efficiency. The obtained results can be used for optimization of technological processes in mechanical engineering and reduction of manufacturing costs.

**Keywords:** cost; cutting speed; tool life; high-speed machining; CNC; machining center; optimization.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Обробка матеріалів різанням є основним методом в металообробному виробництві. Розвитку цього методу весь час приділяють значну увагу. Так, за останні роки відбулися кардинальні зміни в забезпеченні металообробного виробництва сучасним обладнанням і ріжучими інструментами. На зміну застарілим конструкціям універсальних металорізальних верстатів прийшли сучасні верстати із числовим програмним керуванням (ЧПК) типу «обробний центр», які дозволили автоматизувати технологічні процеси механічної обробки та суттєво (до 10 разів і більше) підвищити продуктивність і зменшити собівартість обробки із забезпеченням високих показників якості та точності. В досягненні таких високих показників обробки значну роль відіграють сучасні високопродуктивні ріжучі лезові твердосплавні та керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями, які реалізують високошвидкісне різання – прогресивний метод обробки матеріалів різанням. Разом з тим, як показує практичний досвід, у зв'язку з високою вартістю цих верстатів та ріжучих інструментів (виробництва провідних верстатострументальних компаній світу) різко зростає собівартість обробки, і застосування нових технологій високошвидкісної обробки у ряді випадків стає економічно недоцільним. Тому для вирішення задачі ефективної механічної обробки деталей машин важливо визначити умови зменшення собівартості обробки, які визначають, головним чином, собівартість машинобудівної продукції. Це дозволить науково обґрунтовано підійти до вибору раціональних режимів різання та характеристик прогресивних лезових різальних інструментів під час обробки деталей машин на високообертових верстатах з ЧПК. У зв'язку з цим у роботі запропоновано нову математичну модель собівартості механічної обробки та встановлено умови її суттєвого зменшення.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз собівартості виготовлення машинобудівної продукції на машинобудівних підприємствах України показав, що найбільшими є статті

витрат, пов'язані із заробітною платою виробничих робітників і витратами на сировину та матеріали, що в середньому становлять до 25 % [1]. Тому зменшити собівартість машинобудівної продукції можна насамперед завдяки збільшенню продуктивності праці шляхом застосування досконаліших технологій, обладнання та інструментів. Важливу роль у цьому відіграє ріжучий інструмент. Як показав аналіз фінансово-економічної діяльності численних машинобудівних підприємств, стаття витрат, пов'язана з витратою інструментів, становить 3 ... 5 % собівартості виготовлення виробу. Причому, цей відсоток фактично не змінюється при використанні нових сучасних ріжучих інструментів, які пропонують провідні зарубіжні верстатострументальні фірми та які в 10 – 100 разів дорожчі за вітчизняні інструменти. Це пов'язано з тим, що їх працездатність пропорційна підвищенню ціни. Однак, застосування даних інструментів дозволяє збільшити продуктивність праці та вирішити проблему зменшення собівартості виготовлення машинобудівної продукції [2].

У роботі [1] також показано, що зменшення ціни ріжучого інструменту на 20 % відповідає зменшенню собівартості виробу лише на 0,6 %. Збільшення вдвічі терміну служби ріжучого інструменту також призводить до невеликого зменшення собівартості виробу – лише на 1,5 %. Збільшення ж продуктивності обробки завдяки застосуванню ефективного інструменту на 20 % призводить до зменшення собівартості виробу на 15 %. Це відбувається завдяки застосуванню прогресивнішого інструменту і зменшенню статті витрат, пов'язаної із заробітною платою робітників. Тому надзвичайно важливим завданням обґрунтування напрямів розвитку промислових підприємств є завдання теоретичного аналізу умов зменшення собівартості та збільшення продуктивності праці [3, 4]. Цього можна досягти на основі проведення оптимізації собівартості виробу з урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робітника та витратою на інструменти.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

До невирішених частин загальної проблеми зменшення собівартості металообробного виробництва слід віднести недостатньо повний її теоретичний аналіз, пов'язаний із необхідністю проведення оптимізаційних розрахунків та обґрунтування ефективного застосування сучасних високоефективних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями та високошвидкісних металорізальних верстатів із ЧПК.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою роботи є теоретичний аналіз і обґрунтування собівартості металообробного виробництва, визначення умов її зменшення на основі застосування сучасних високоефективних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями та металорізальних верстатів з ЧПК.

Задачі дослідження:

4) розроблення математичної моделі визначення собівартості металообробного виробництва із урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робочого і витратами на інструменти;

2) теоретичне обґрунтування собівартості металообробного виробництва та встановлення умов її зменшення.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Для вирішення поставленої задачі слід розглянути теоретичне рішення щодо визначення собівартості обробки із урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робочого і витратами на різальні інструменти, яке наведено в роботах [5, 6]:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{зод}} \cdot k + N \cdot \frac{t_0}{T} \cdot \Pi, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість оброблюваних деталей;  $t_0$  – основний технологічний час обробки, хв;  $S_{\text{зод}}$  – тарифна ставка робітника, грн/хв;  $k$  – коефіцієнт, що враховує різні нарахування на тарифну ставку робітника;  $T = n \cdot t_0$  – стійкість ріжучого інструменту, хв;  $n$  – кількість деталей, оброблених одним ріжучим інструментом;  $\Pi$  – ціна ріжучого інструменту, грн.

Технологічний час обробки  $t_0$  та стійкість ріжучого інструменту для поздовжнього точіння визначаються такими залежностями:

$$t_0 = i \cdot \frac{l}{S_{\text{нозд}}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \Pi \cdot l}{V \cdot t \cdot S}; \quad T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad \text{де } i = \Pi / t - \text{кількість}$$

поздовжніх ходів інструменту;  $\Pi$  – припуск, що знімається, м;  $t$  – глибина різання, м;  $l$  – довжина ходу інструменту, м;  $S_{\text{нозд}} = V \cdot S / (\pi \cdot D_{\text{дет}})$  – швидкість поздовжньої подачі, м/хв;  $V$  – швидкість різання, м/хв;  $S$  – подача, м/оберт;  $D_{\text{дет}}$  – діаметр оброблюваної деталі, м;  $C_4$ ,  $m_1$ ,  $q$ ,  $p$  – постійні для заданих умов обробки.

Після перетворень залежність (1) набуває вигляду:

$$C = \mathcal{G}_{\text{сум}} \cdot \left( \frac{S_{\text{зод}} \cdot k}{V \cdot t \cdot S} + \frac{\Pi}{C_4} \cdot \frac{V^{m_1-1}}{t^{1-q} \cdot S^{1-p}} \right), \quad (2)$$

де  $\mathcal{G}_{\text{сум}} = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \Pi \cdot l \cdot N$  – сумарний об'єм матеріалу, що видаляється з усіх оброблюваних деталей, м<sup>3</sup>.

Як видно, зі збільшенням параметрів режиму різання  $t$  і  $S$  собівартість обробки  $C$  зменшується, а зі збільшенням швидкості різання  $V$  – змінюється за екстремальною залежністю. Тому екстремальні значення  $V$  і  $C$  визначаються з необхідної умови екстремуму  $C'_V = 0$ :

$$V_{\text{екстр}} = \left[ \frac{S_{\text{зод}} \cdot k \cdot C_4}{(m_1 - 1) \cdot \Pi \cdot t^q \cdot S^p} \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (3)$$

Розрахунками встановлено, що друга похідна  $C''_V$  у точці екстремуму – позитивна величина, тому має місце мінімум функції  $C = f(V)$  (рис. 1):

$$C_{екстр} = g_{сум} \cdot m_1 \cdot \left( \frac{S_{зод} \cdot k}{m_1 - 1} \right)^{1 - \frac{1}{m_1}} \cdot \left( \frac{Ц}{C_4} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1-q}{m_1}} \cdot S^{\frac{1-p}{m_1}}}. \quad (4)$$

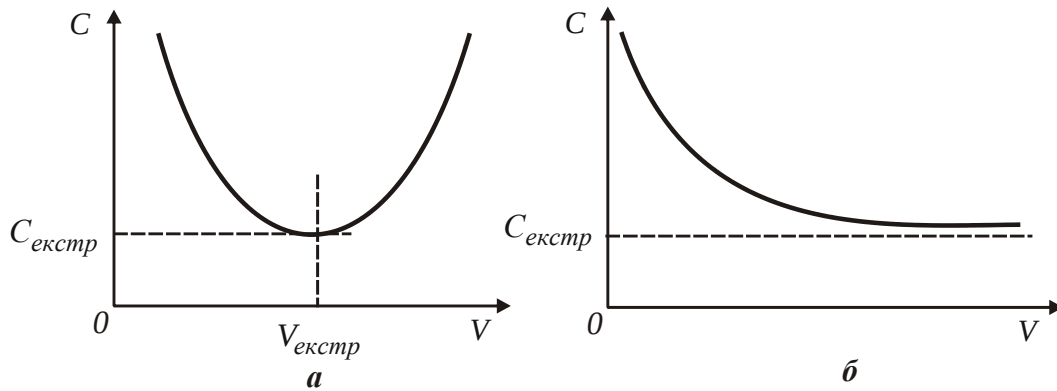


Рисунок 1. Залежності собівартості обробки  $C$  від швидкості різання  $V$  за умов  $m_1 > 1$  (а) і  $m_1 = 1$  (б)

Із залежностей (3) і (4) випливає, що з погляду забезпечення заданої собівартості обробки  $C_{екстр}$  (рис. 1,а) збільшення швидкості різання  $V_{екстр}$  обмежено. Отже, застосування високошвидкісного різання вимагає «переміщення» точки екстремуму в область більших значень  $V_{екстр}$ . Це може бути досягнуто, виходячи із залежності (3), зменшенням ціни інструменту  $Ц$  і підвищенням його властивостей міцності, узагальнено визначених параметром  $C_4$ . Однак навіть зі значною зміною зазначених параметрів це не призведе до помітного збільшення  $V_{екстр}$ , оскільки вони входять у залежність (3) із ступенем менше одиниці (за умови  $m_1 > 1$ ). Набагато більшого ефекту в цьому випадку можна досягти за рахунок зменшення параметра  $m_1 \rightarrow 1$ . Тоді, виходячи із залежності (3), екстремальне значення швидкості різання  $V_{екстр} \rightarrow \infty$ , а собівартість обробки  $C_{екстр}$ , що описується залежністю (4) з урахуванням  $m_1 > p > q$ , набуває вигляду:

$$C_{екстр} = \frac{g_{сум} \cdot Ц}{C_4 \cdot S \cdot t}. \quad (5)$$

Залежність (1) після перетворень з урахуванням  $m_1 \rightarrow 1$  опишеться:

$$C = \frac{g_{сум} \cdot S_{зод} \cdot k}{V \cdot S \cdot t} + \frac{g_{сум} \cdot Ц}{C_4 \cdot S \cdot t}. \quad (6)$$

Як видно, зі збільшенням швидкості різання  $V$  собівартість обробки  $C$  безперервно зменшується, асимптотично наближаючись до значення  $C_{екстр}$



(рис. 1,б), що визначається залежністю (5). Отже, після перевищення певного значення  $V$  собівартість обробки  $C$  залишається майже незмінною, тоді як продуктивність обробки  $Q = V \cdot t \cdot S$  необмежено збільшується. Це, власне, і визначає ефект високошвидкісної обробки (що досягається за умови  $m_1 \rightarrow 1$ ).

Із фізичного погляду випадок  $m_1 = 1$  означає те, що стійкість різального інструменту не залежить від швидкості різання  $V$ , тобто температурний чинник не є визначальним у зношуванні інструменту. Зношування відбувається в основному від дії механічного чинника. Дана закономірність може мати місце при різанні алмазними інструментами, які забезпечують інтенсивне відведення тепла із зони різання та суттєве зменшення температури різання. У результаті інструмент під час обробки знаходиться фактично в холодному стані, що сприяє підвищенню його стійкості. Отже, стійкість різального інструмента визначає, головним чином, рівень собівартості обробки  $C$ . Виключення переважаючої ролі температурного чинника у формуванні показника стійкості ріжучого інструменту є основною умовою зменшення собівартості обробки та значного збільшення швидкості різання  $V_{екстр}$ , що дозволяє реалізувати високошвидкісну обробку на сучасних верстатах з ЧПК ( $n = 20000$  об./хв і більше). Прикладом здійснення даної умови може бути застосування твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями, які зберігають свої експлуатаційні властивості за високої температури різання.

Продуктивність обробки  $Q_{екстр}$  та стійкість інструменту  $T$  в точці мінімуму функції  $C$  визначаються залежностями:

$$Q_{екстр} = \left( \frac{C_4 \cdot S_{зод} \cdot k}{(m_1 - 1) \cdot C} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot t^{1 - \frac{q}{m_1}} \cdot S^{1 - \frac{p}{m_1}}; \quad (7)$$

$$T = \frac{(m_1 - 1) \cdot C}{S_{зод} \cdot k}. \quad (8)$$

Забезпечити зменшення собівартості обробки  $C$  при одночасному збільшенні продуктивності обробки  $Q_{екстр}$  можна збільшенням параметрів  $t$  і  $S$ , а також зменшенням  $V_{екстр}$  відповідно до залежності (3). Оптимальна стійкість інструменту  $T$  не залежить від параметрів режимів різання, а визначається економічними параметрами  $S_{зод}$ ,  $k$ ,  $C$ . Оскільки параметри  $S_{зод}$  і  $k$  впливають на собівартість обробки  $C$  та стійкість інструменту  $T$ , то між  $C$  і  $T$  не існує цілком однозначного зв'язку. Параметр може змінюватися у більших межах, ніж параметри  $S_{зод}$  і  $k$ . Виходячи з цього, завдяки зниженню  $C$  можна зменшувати параметри  $C$  і  $T$ , тобто економічно ефективно працювати з мінімально можливими значеннями  $T$ . Зменшення параметра  $C$  призводить до збільшення параметрів  $Q$  і  $V_{екстр}$ . Оскільки  $q < p$ , то глибина різання входить у залежність (7) з більшим ступенем, ніж подача  $S$ . У зв'язку з цим доцільно,

насамперед, збільшувати глибину різання  $t$  до величини припуску  $\Pi$ , що знімається, тобто обробку проводити за один прохід інструменту.

Залежність (4) з урахуванням залежності (7) набуває вигляду:

$$C_{екстр} = g_{сум} \cdot \frac{S_{зод} \cdot k}{Q_{екстр}} \cdot \frac{m_1}{(m_1 - 1)}. \quad (9)$$

За суттю, отримано залежність (2), в якій другий доданок виражений через перший доданок. Зменшити собівартість обробки  $C_{екстр}$  можна збільшенням продуктивності обробки  $Q_{екстр}$  шляхом збільшення параметрів  $t$ ,  $S$  і зменшення  $C$  за залежністю (7). Це вказує на важливість вирішення технологічних завдань щодо визначення оптимальних варіантів обробки деталей з використанням економічних методів [5, 6].

Проведений аналіз собівартості обробки дозволяє визначити економію із заробітної плати робочих-верстатників та витрати різального інструменту, яка, виходячи із залежності (1), виражається:

$$\Delta C = C_{нов} - C_{баз} = N \cdot (t_{0_{нов}} - t_{0_{баз}}) \cdot S_{зод} \cdot k + N \cdot \left( \frac{t_{0_{нов}} \cdot C_{нов}}{T_{нов}} - \frac{t_{0_{баз}} \cdot C_{баз}}{T_{баз}} \right). \quad (10)$$

У залежності (10) параметри  $C_{баз}$ ,  $t_{0_{баз}}$ ,  $T_{баз}$ ,  $C_{баз}$  визначають базовий варіант обробки, а параметри  $C_{нов}$ ,  $t_{0_{нов}}$ ,  $T_{нов}$ ,  $C_{нов}$  – новий варіант обробки. Як видно, величина  $\Delta C$  тим більше, чим більше різниця  $(t_{0_{нов}} - t_{0_{баз}})$  і другий доданок залежності, який виражає складний неоднозначний зв'язок між параметрами, що входять до залежності. Це зумовлено екстремальністю залежності (1). Якщо значення  $C_{баз}$  і  $C_{нов}$  належать лівій гілці залежності (рис. 1,а), то матиме місце однозначне збільшення величини  $\Delta C$  під час переходу від базового до нового варіанту обробки. Якщо значення  $C_{баз}$  і  $C_{нов}$  належать різним гілкам залежності (рис. 1,а), то величина  $\Delta C$  може приймати як позитивні, так і негативні значення. В останньому випадку економії  $\Delta C$  не буде досягнуто.

Враховуючи неоднозначність рішень на основі залежності (10), оцінювання економії  $\Delta C$  двох варіантів доцільно проводити на основі порівняння мінімумів собівартості обробки  $C$  відповідно до залежності (9). У цьому випадку величина  $C_{екстр}$  однозначно визначається продуктивністю обробки  $Q_{екстр}$ , що полегшує вирішення оптимізаційних завдань. Очевидно, чим більше  $Q_{екстр}$ , тим менше  $C_{екстр}$ . Отже, зі збільшенням швидкості різання  $V_{екстр}$  збільшується величина  $Q_{екстр}$  і зменшується величина  $C_{екстр}$ . Збільшити швидкість різання  $V_{екстр}$ , згідно із залежністю (3), можна, перш за все, збільшенням параметра  $C_4$  (тобто стійкості різального інструменту) та зменшенням ціни інструменту  $C$ .

При пропорційному збільшенні параметрів  $C_4$  і  $C$  швидкість різання  $V_{екстр}$ , а відповідно і параметри  $Q_{екстр}$ ,  $C_{екстр}$  залишаються незмінними і

здавалося б, що ефект обробки досягатися не буде. Однак при цьому необхідно враховувати, що збільшення  $C_4$  передбачає зменшення параметра  $m_1 \rightarrow 1$  (підвищення фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу). Це приводить до збільшення швидкості різання  $V_{екстр}$ , відповідно до залежності (3), та зменшення собівартості обробки  $C$  до значення  $C_{екстр}$  (рис. 1,б). Як показано вище, дана закономірність є основою для застосування високошвидкісної обробки деталей машин, що забезпечує суттєву економію від зменшення заробітної плати робітника-верстатника та витрати ріжучого інструменту. Таким чином, у роботі економічно обґрунтовано науковий підхід до вибору оптимального варіанту механічної обробки та металорізального верстата з ЧПК.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Проведено теоретичний аналіз собівартості обробки деталей машин та визначено умови її зменшення. Доведено існування мінімуму собівартості обробки зі збільшенням швидкості різання, який набуває найменших значень при використанні сучасних високоефективних ріжучих інструментів зі зносостійкими покриттями та високообертових металорізальних верстатів з ЧПК типу «обробний центр». Перспективами подальших досліджень є теоретико-економічне обґрунтування напрямів ефективного застосування верстатів із ЧПК та інструментів зі зносостійкими покриттями в сучасних умовах переходу від великосерійного до одиничного виробництва.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. Жовтобрюх В. О. Підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем шляхом вибору раціональних параметрів операцій за критерієм собівартості: дис. ... канд. техн. наук; 05.02.08 "Технологія машинобудування". Маріуполь: ПДТУ, 2012. 233 с.
2. Кленов О. С. Визначення технологічних можливостей сучасних ріжучих інструментів та методів механічної обробки. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ, 2017. Вип. № 40. С. 66–72.
3. Shtal T. V, Bondarenko L. M, Ukubassova G. S, Amirbekuly Y., Toiboldinova Z.G. The time factor during the formation of the company's entrance to the external market strategy. *Espacios*, 39(12), 23 (2018).
4. Ястремська О. М., Ястремська О. О. Управління розвитком підприємств: уточнення теоретичних положень. Проблеми економіки, 2020. 1 (43). С. 214–226.
5. Техніко-економічне обґрунтування сучасних технологій виробництва : навчальний посібник / Ф. В. Новіков, Д. Ф. Новіков, О. А. Єрмоленко, В. О. Жовтобрюх. Дніпро: ЛІРА, 2022. 256 с. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28117>
6. Новіков Ф. В. Оптиміальні рішення в металообробці : монографія / Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх, Г. В. Новіков. Д.: ЛІРА, 2017. 476 с. <http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/18360>

**Пелипинко О.О., Ковалевський С.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м.м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ НАНОПОКРИТТІВ ДЛЯ ВИРОБІВ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Анотація:** У роботі розглянуто проблеми створення нанопокриттів для виробів важкого машинобудування в умовах високих експлуатаційних навантажень. Проаналізовано сучасні методи формування покриттів, зокрема фізичне та хімічне осадження з пари, а також їх технологічні обмеження при обробці великогабаритних деталей складної геометрії. Визначено ключові технічні виклики, включаючи забезпечення однорідності покриттів, підвищення адгезії та зниження дефектності структури. Розглянуто економічні аспекти впровадження нанопокриттів, зокрема високу вартість матеріалів і складність масштабування виробництва. Особливу увагу приділено екологічним і регуляторним обмеженням, пов'язаним із використанням наноматеріалів. Показано, що перспективи розвитку галузі пов'язані з впровадженням багатофункціональних і самовідновлювальних покриттів, а також інтеграцією цифрових технологій і штучного інтелекту. Отримані результати можуть бути використані для підвищення довговічності та надійності деталей важкого машинобудування.

**Ключові слова:** нанопокриття; важке машинобудування; PVD; CVD; адгезія; зносостійкість; масштабування; екологічність.

**Abstract:** This paper addresses the challenges of developing nanocoatings for heavy engineering applications under extreme operating conditions. Modern coating formation methods, including physical and chemical vapor deposition, are analyzed along with their technological limitations when applied to large-scale components with complex geometries. Key technical challenges are identified, such as ensuring coating uniformity, improving adhesion, and reducing structural defects. Economic aspects of nanocoating implementation are considered, including high material costs and scalability issues. Particular attention is given to environmental and regulatory constraints associated with nanomaterials. It is shown that future developments are linked to multifunctional and self-healing coatings, as well as the integration of digital technologies and artificial intelligence. The results can be applied to enhance durability and reliability of components in heavy engineering industries.

**Keywords:** nanocoatings; heavy engineering; PVD; CVD; adhesion; wear resistance; scalability; sustainability.

Важке машинобудування, що охоплює виробництво гірничого обладнання, металургійних агрегатів, важких верстатів та підйомно-транспортних механізмів, вимагає застосування матеріалів з виключною довговічністю та стійкістю до екстремальних умов експлуатації. Нанопокриття, що представляють собою ультратонкі шари матеріалів товщиною від 1 до 100 нанометрів, відкривають безпрецедентні можливості для підвищення експлуатаційних характеристик виробів важкого машинобудування. Згідно з даними дослідників, глобальний ринок нанопокриттів оцінювався у 19,46 млрд доларів США у 2024 році і

очікується, що досягне 87,10 млрд доларів до 2032 року при середньорічному темпі зростання (CAGR) 20,60% [1].

Нанопокриття забезпечують винятковий захист від окислення, зношування та впливу навколишнього середовища, значно продовжуючи термін служби металевих деталей, що використовуються в автомобільній, аерокосмічній та промисловій техніці [1]. Металеві субстрати становили домінуючу частку ринку в 55,1% у 2024 році через зростаючу потребу в покращеній корозійній стійкості та підвищеній довговічності металевих застосувань [1]. Проте впровадження нанопокриттів у важкому машинобудуванні стикається з низкою серйозних технічних, технологічних та економічних проблем, що вимагають комплексного вирішення.

### **Технологічні виклики нанесення нанопокриттів**

Основними методами створення нанопокриттів є фізичне осадження з пари (PVD) та хімічне осадження з пари (CVD), кожен з яких має специфічні переваги та обмеження. У 2025 році сегмент хімічного парового осадження очікувано домінуватиме на ринку з найбільшою часткою 49,2%, що зумовлено підвищеною частотою розливів небезпечних матеріалів у промислових, фармацевтичних та хімічних виробничих підприємствах [1].

Процес CVD має суттєві обмеження, оскільки зазвичай обмежується осадженням тонких плівок в діапазоні нанометрів, що створює значні труднощі для формування каталізаторів, які потребують товстіших шарів або вищого каталітичного навантаження [2]. Крім того, обмежене покриття тонких плівок на складних геометріях часто призводить до неоднорідних покриттів, що може суттєво впливати на продуктивність [2]. PVD-процес страждає від обмежень прямої видимості, що означає, що тільки безпосередньо відкриті поверхні отримують покриття, тоді як CVD може створювати конформні покриття, охоплюючи навіть складні геометрії [3].

Процеси PVD управляються декількома критичними параметрами, які суттєво впливають на властивості плівки та швидкість осадження. Тиск зазвичай коливається від  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  Па, впливаючи на середню довжину вільного пробігу та енергію частинок, причому нижчі тиски зазвичай призводять до вищої енергії частинок та більш спрямованого осадження. Температура субстрату (зазвичай 20-500°C) впливає на мобільність адатомів та мікроструктуру плівки [3]. Досягнення бажаних характеристик тонких плівок пов'язане з проблемами, такими як мінімізація дефектів, забезпечення однорідності та оптимізація розміру зерна, оскільки дефекти можуть погіршувати електричні, механічні та оптичні властивості [4].

Процес CVD виконується при підвищених температурах (близько 1925°F або 1052°C) в атмосферно-контрольованому CVD-реакторі [5]. Через напруження, що виникають під час процесу охолодження зі зниженням температури або температури плавлення субстрату (полімери), процес осадження має температурні обмеження для певних застосувань,

що робить процес розпилення більш актуальним серед PVD-технік осадження [6]. CVD-процес виявляє вище споживання порівняно з PVD при розгляді всіх етапів процесу, що підтверджується декількома дослідженнями щодо оцінок сталості виробничих процесів [6].

### **Проблеми забезпечення якості та адгезії покриттів**

Одним з ключових технічних викликів є забезпечення міцного зв'язку між субстратом та PVD-покриттям, що є важливим для підтримки міцності та довговічності покриття. Якщо адгезія слабка, це може призвести до передчасного відшарування покриття [7]. Залишкові напруження можуть виникати внаслідок варіацій коефіцієнтів теплового розширення між покриттям та матеріалами субстрату під час процесу осадження, що може спричинити деформацію, розтріскування покриття та зрештою втрату його механічної міцності [7].

Покриття можуть мати різні дефекти, такі як пінхоли (точкові отвори), тріщини та пористість, які можуть компрометувати їх продуктивність та надійність [7]. У наноструктуруванні температура, тиск та підготовка субстрату повинні бути ретельно контрольовані, що може становити виклик. Оптимізація умов осадження також може виявитися складною, оскільки використання цієї техніки означає балансування складу плівки, швидкості осадження та температури субстрату для максимізації продуктивності [7].

Щодо забезпечення якості наноматеріалів, вдосконалення їх виробничих процесів сприятиме їх однорідній дисперсії та контрольованому включенню [8]. Вирішення цих проблем вимагає глибокого розуміння наукових принципів, що лежать в основі процесу PVD-обробки, та застосування ефективних стратегій для забезпечення оптимального результату [7]. Існують особливі потенціали та виклики на перетині матеріалознавства, корозійної інженерії та біомедичних досліджень, що потребують ретельного розгляду [9].

### **Економічні обмеження та проблеми масштабування**

У січні 2025 року галузевий аналіз підкреслив значний фінансовий тягар прийняття передових нанопокриттів у різних виробничих секторах. Високі витрати, пов'язані з складними матеріалами та комплексними технологіями осадження, створили значні проблеми для малих та середніх підприємств [1]. Ці витрати створили бар'єри для широкого впровадження, обмежуючи доступ до передових захисних та функціональних покриттів. Крім того, ці високі початкові витрати можуть обмежити ширшу інтеграцію нанопокриттів у більш бюджетно-свідомі застосування та галузі, потенційно уповільнюючи загальне зростання ринку та доступність цих інноваційних матеріальних рішень [1].

Ціни на наноматеріали, такі як вуглецеві нанотрубки, наносрібло, nanoоксид цинку та графен, мають преміальну вартість на глобальних товарних ринках. Наприклад, ціни на наносрібло зросли на 12-18% між

2022 та 2024 роками через попит на антимікробні покриття та перебої в ланцюгах постачання. Ціни на композиції нанопокриттів на 20-50% вищі за традиційні покриття, залежно від функціональності та типу дисперсії [10]. Попри ці труднощі, загальна тенденція вказує на значне розширення ринку нанопокриттів у найближчі роки, керованого технологічними досягненнями та зростаючим попитом з боку різних галузевих сегментів [11].

Основні обмеження та виклики ринку включають регуляторні питання та питання безпеки, оскільки уряди вимагають суворих регламентів для оцінки безпеки наноматеріалів для навколишнього середовища та здоров'я людини [12]. Виклики масштабованості полягають у тому, що багато інновацій залишаються на пілотному рівні через проблеми в ефективному масштабуванні виробництва нанопокриттів [12]. Складні процедури нанесення, що вимагають спеціалізованих технологій та обладнання, можуть уповільнити прийняття в декількох галузях [12].

### **Екологічні та регуляторні проблеми**

Ринок стикається з певними викликами, включаючи відносно високі витрати порівняно з традиційними покриттями, технічну складність у виробництві та триваючий регуляторний контроль щодо потенційних екологічних та впливів наноматеріалів на здоров'я [13]. Нерегулярності у формі, розмірі та хімічному складі наноматеріалів викликають занепокоєння щодо їх несприятливих впливів на навколишнє середовище та здоров'я людини. Доля, транспортування та трансформація наночастинок, випущених у навколишнє середовище, є критичними напрямками дослідження [14].

Екологічні проблеми, пов'язані з наноматеріалами, потребують дослідження та впровадження екологічно чистих матеріалів [8]. Ефективним способом нівелювання впливу на навколишнє середовище може бути застосування нанопокриттів [8]. Існують стійкі підходи до осадження наноматеріалів, що є важливими для розвитку галузі [14]. У міру того, як галузі надають пріоритет сталості та продуктивності, прийняття нанопокриттів продовжує зростати для задоволення суворих регуляторних та споживчих вимог щодо екологічно чистих та довговічних рішень [1].

Для вирішення проблем регулювання впровадження наноматеріалів потрібні спільні зусилля різних галузей виробництва, допомога наукових та регуляторних органів у розробці стандартизованого тестування та сертифікації [8]. Компанії інтегрують принципи циркулярної економіки в зусилля з НДДКР, зосереджуючись на переробці, відновленні ресурсів та зниженому вуглецевому сліді [15]. Зростаюча обізнаність щодо екологічної сталості стимулює розробку екологічно чистих нанопокриттів, що, як очікується, значно підштовхне зростання ринку в найближчі роки [11].

### **Специфічні проблеми для важкого машинобудування**

Галузі, що працюють з цінними активами, такі як нафта і газ, інфраструктура та важке машинобудування, надають пріоритет цим покриттям для значного зниження частоти технічного обслуговування та витрат на заміну капіталу, тим самим забезпечуючи високу операційну ефективність та надійну віддачу від інвестицій [2]. Близько 68% суднобудівних галузей та 72% автомобільних виробників використовують нанопокриття для запобігання корозії та довговічності поверхні. Використання покриттів на основі наносиліки та оксиду цинку покращило термін захисту металу на 42%. Промислове обладнання та аерокосмічне устаткування становлять 38% загального попиту на антикорозійні покриття в глобальному масштабі [16].

Металеві та керамічні нанопокриття займають сильну ринкову позицію завдяки їх вищій механічній міцності, термічній стійкості та здатності витримувати екстремальні умови експлуатації. Галузі, такі як аерокосмічна, автомобільна та важке виробництво, віддають перевагу цим матеріалам для критично важливих компонентів, де відмова поверхні може призвести до дорогих поломок [17]. Металеві та скляні поверхні становлять значну частку через їх широке використання у промисловому обладнанні, транспорті, електроніці та архітектурних застосуваннях [17].

В аерокосмічній інженерії лопатки турбін піддаються екстремальним умовам, кожна з яких представляє унікальні виклики. Високі температури, при яких працюють лопатки турбін, часто перевищують 1000°C через процеси згоряння, що може призвести до термічної деградації та окислення. Боротьба з корозією також є викликом для цих компонентів, оскільки вплив гарячих газів, що містять сірку, вуглець та інші елементи, може призвести до окислення та корозії на поверхнях лопаток [7]. Крім того, лопатки турбін повинні протистояти механічному напруженню високих швидкостей обертання та аеродинамічних сил, що призводить до загального зношування.

### **Сучасні рішення та перспективи розвитку**

Нещодавні технологічні тенденції показують зсув до багатофункціональних нанопокриттів, що поєднують кілька властивостей в одному застосуванні. Розумні нанопокриття зі стимул-реагуючими характеристиками — зміна властивостей у відповідь на температуру, світло або електричні сигнали — набувають популярності [13]. Між 2023 та 2025 роками понад 46% нових запусків нанопокриттів інтегрували стійкі матеріали з низьким вмістом летких органічних сполук (ЛОС) [16]. Самовідновлювальні нанопокриття, здатні автоматично відновлювати пошкодження, наближаються до комерційної життєздатності [13].

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) з нанотехнологіями створює нові можливості для розробки розумних та багатофункціональних нанопокриттів, покращуючи їх продуктивність та застосовність [1]. Системи на основі ШІ можуть оптимізувати формулювання покриттів, забезпечувати моніторинг продуктивності в реальному часі та передбачати



потреби в обслуговуванні, покращуючи ефективність у виробництві та процесах нанесення [1]. III також сприяє точності в застосуваннях покриттів через автоматизацію та розумне виробництво, зменшуючи відходи та покращуючи контроль якості [18].

Зростання адитивного виробництва та парадигм Індустрії 4.0 переосмислює спосіб розгортання нанопокриттів на складних геометріях. Персоналізовані виробничі серії та виробництво точно вчасно стали можливими для покриттів, які колись були обмежені високообсяговими застосуваннями [15]. Співпраця між матеріалознавцями, постачальниками обладнання та розробниками цифрових платформ сприяє новим бізнес-моделям, які поєднують апаратне забезпечення, програмне забезпечення та передові матеріали в цілісних сервісних пропозиціях [15].

Нанопокриття на основі графену пропонують чудовий потенціал для ультратонких, високопровідних та винятково міцних захисних шарів [13]. Інтеграція нанопокриттів з технологіями Інтернету речей (IoT) забезпечує моніторинг стану поверхні та продуктивності в реальному часі [13]. У міру того, як виробничі процеси стають більш економічно ефективними та масштабованими, а регуляторні рамки дозрівають, нанопокриття готові перейти від спеціалізованих застосувань до основного використання практично у всіх промислових секторах, представляючи одну з найбільш перспективних галузей у технології передових матеріалів [13].

## **ВИСНОВКИ**

Створення нанопокриттів для виробів важкого машинобудування представляє собою складну міждисциплінарну проблему, що вимагає вирішення цілого комплексу технологічних, економічних та екологічних викликів. Основні проблеми включають забезпечення однорідності покриттів на складних геометріях великогабаритних деталей, гарантування міцної адгезії та мінімізації дефектів, високу вартість наноматеріалів та процесів осадження, складність масштабування лабораторних технологій до промислового виробництва, а також необхідність дотримання суворих екологічних та регуляторних вимог.

Попри ці виклики, перспективи розвитку нанопокриттів для важкого машинобудування залишаються надзвичайно позитивними. Технологічний прогрес у галузі багатофункціональних та самовідновлювальних покриттів, інтеграція штучного інтелекту для оптимізації процесів нанесення та контролю якості, розвиток екологічно чистих наноматеріалів та методів виробництва, а також впровадження принципів Індустрії 4.0 для гнучкого та персоналізованого виробництва створюють основу для подолання існуючих обмежень.

Успішне впровадження нанопокриттів у важкому машинобудуванні вимагає системного підходу, що поєднує фундаментальні дослідження з практичними інженерними рішеннями, міждисциплінарну співпрацю між матеріалознавцями, інженерами-технологами та виробниками, розробку галузевих стандартів та методів тестування, а також створення економічно

ефективних виробничих процесів, доступних для малих та середніх підприємств. Лише комплексне вирішення всіх цих аспектів дозволить реалізувати повний потенціал нанотехнологій у важкому машинобудуванні.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Nanocoatings Market – Global Market Size, Share, and Trends Analysis Report – Industry Overview and Forecast to 2032. Data Bridge Market Research, May 2024. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-nanocoating-market> (дата звернення: 30.03.2026).
2. Mahyoub S. A. et al. Physical Vapor Deposition Techniques for CO<sub>2</sub> Electroreduction: A Review. Small Structures, 2025. DOI: 10.1002/ssstr.202400501. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ssstr.202400501> (дата звернення: 30.03.2026).
3. PVD vs CVD: Mastering Advanced Thin Film Deposition Techniques. Wevolver. URL: <https://www.wevolver.com/article/pvd-vs-cvd> (дата звернення: 30.03.2026).
4. Fabrication of Conjugated Conducting Polymers by Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. PMC, March 2025. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11944385/> (дата звернення: 30.03.2026).
5. PVD and CVD Question and Answers. Richter Precision Inc. URL: <https://www.richterprecision.com/coating-data/frequently-asked-questions/> (дата звернення: 30.03.2026).
6. Fernandes F. et al. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. Coatings, 2018, Vol. 8, No. 11, p. 402. DOI: 10.3390/coatings8110402. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/8/11/402> (дата звернення: 30.03.2026).
7. Physical Vapor Deposition (PVD) Coating. Wevolver. URL: <https://www.wevolver.com/article/physical-vapor-deposition-pvd-coating> (дата звернення: 30.03.2026).
8. Nanomaterials: trend of the sustainable aerospace industry development. Technology Audit and Production Reserves, 2024, No. 5/4(79), pp. 29-37. URL: <https://journals.uran.ua/tarp/article/download/312875/304915/726818> (дата звернення: 30.03.2026).
9. Smart Self-Healing Nanocoatings for Biomedical Implants: A Bibliometric Analysis. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics, 2025, Vol. 30. URL: <https://epstem.net/index.php/epstem/article/download/1325/1319/1862> (дата звернення: 30.03.2026).
10. Nanocoatings Market Size USD 38.2 Bn by 2034. Emergen Research, July 2025. URL: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/nanocoatings-market> (дата звернення: 30.03.2026).
11. Nanocoatings Future-Proof Strategies: Market Trends 2025-2033. Data Insights Market. URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/nanocoatings-1075400> (дата звернення: 30.03.2026).
12. Nanocoatings Market Size Worth USD 90.29 Billion by 2032. EIN Presswire, August 2025. URL: <https://www.einpresswire.com/article/843183961/nanocoatings-market-size-worth-usd-90-29-billion-by-2032-cagr-22-7-growth-forecast-2024-2032> (дата звернення: 30.03.2026).
13. The Global Market for Nanocoatings 2025-2035. Future Markets Inc., March 2025. URL: <https://www.futuremarketsinc.com/the-global-market-for-nanocoatings-2025-2035/> (дата звернення: 30.03.2026).
14. Pillai V. V. et al. Advancements in Nanoparticle Deposition Techniques for Diverse Substrates: A Review. PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537803/> (дата звернення: 30.03.2026).
15. Nanocoating Market Size, Competitors & Forecast to 2032. Research and Markets, 2025. URL: <https://www.researchandmarkets.com/report/nanocoating> (дата звернення: 30.03.2026).
16. Nanocoatings Market Size, Share - Forecast To 2034. Industry Research, 2025. URL: <https://www.industryresearch.biz/market-reports/nanocoatings-market-113243> (дата звернення: 30.03.2026).

17. NanoCoating Surfaces Market Share & Industry Trends 2032. Real Time Data Stats, 2025. URL: <https://realtimedatastats.com/research-report/nanocoating-surfaces-market> (дата звернення: 30.03.2026).
18. Nanocoatings Market Size, Trends and Forecast, 2025-2032. Coherent Market Insights, 2025. URL: <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/nanocoatings-market-483> (дата звернення: 30.03.2026).

УДК 621.791.03-52

**Підгорний Н.А., Кузнєцов Ю.М.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна).

## ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПУ

**Анотація:** У роботі розглянуто галузі застосування агрегатно-модульного принципу в сучасній техніці та виробництві. Проаналізовано використання модульного підходу в комп'ютерній техніці, автомобільній промисловості, телекомунікаціях, електроенергетиці, медицині, машинобудуванні та зварювальному виробництві. Показано, що агрегатно-модульний принцип дозволяє розділити складні технічні системи на функціонально завершені модулі, які можуть розроблятися, виготовлятися та тестуватися незалежно. Це забезпечує підвищення гнучкості конструкцій, спрощення модернізації та обслуговування обладнання. Особливу увагу приділено застосуванню модульного підходу у машинобудуванні та автоматизованих системах керування, де він сприяє створенню адаптивних і ефективних виробничих систем. Показано, що використання модульних рішень у зварювальному виробництві дозволяє швидко змінювати конфігурацію обладнання відповідно до виробничих потреб. Отримані результати підтверджують універсальність агрегатно-модульного принципу та його значущість для розвитку сучасних технологічних систем.

**Ключові слова:** агрегатно-модульний принцип; модульні системи; машинобудування; автоматизація; зварювання; гнучкі виробничі системи; технічні системи.

**Abstract:** This paper examines the application fields of the aggregate-modular principle in modern engineering and production systems. The use of the modular approach in computer technology, automotive industry, telecommunications, power engineering, medicine, mechanical engineering, and welding production is analyzed. It is shown that the aggregate-modular principle enables decomposition of complex technical systems into functionally complete modules that can be independently designed, manufactured, and tested. This approach increases structural flexibility, simplifies modernization, and improves maintainability of equipment. Special attention is given to the application of modular solutions in mechanical engineering and automated control systems, where they contribute to the development of adaptive and efficient production systems. It is demonstrated that modular solutions in welding production allow rapid reconfiguration of equipment according to changing manufacturing requirements. The results confirm the universality of the aggregate-modular principle and its importance for the development of modern technological systems.

**Keywords:** aggregate-modular principle; modular systems; mechanical engineering; automation; welding; flexible manufacturing systems; technical systems.

### 1. Агрегатно — модульний принцип в комп'ютерній техніці та електроніці

Прикладом використання цього принципу можна назвати комп'ютерну техніку та електроніку, яка являється невід'ємною частиною нашого сучасного життя (рис.1). У сучасних комп'ютерах та електроніці дуже часто використовують модульні компоненти. Наприклад: процесори, блоки системної пам'яті, відеокарти, жорсткі диски.

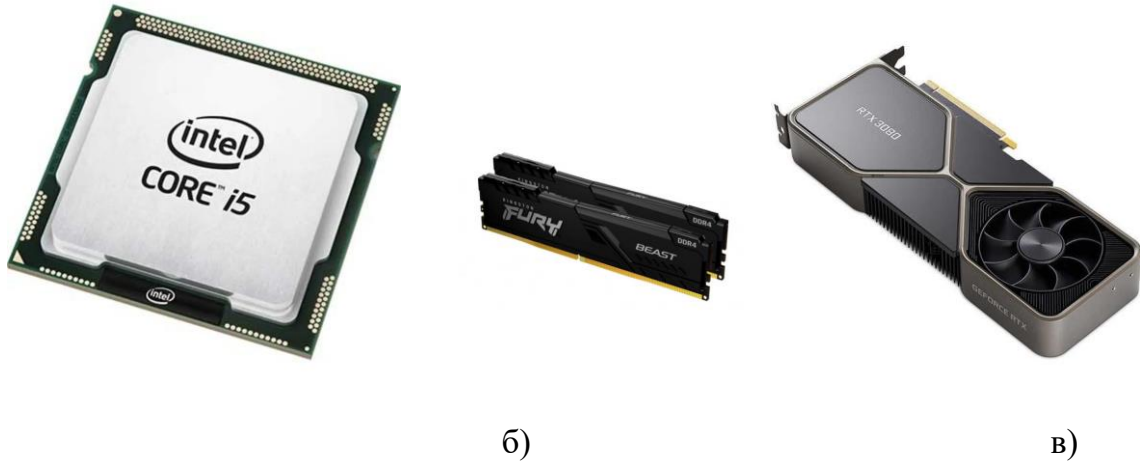


Рисунок 1. Приклад використання агрегатно - модульного принципу в комп'ютерній техніці: а) — процесор компанії Intel; б) — системна пам'ять компанії Kingston; в) — відеокарта компанії Nvidia

Це дозволяє легко оновлювати чи замінювати певні окремі компоненти без необхідності заміни усього цілого пристрою.

## 2. Агрегатно — модульний принцип в автомобільній промисловості

Наступним прикладом можна впевнено назвати автомобільну промисловість (рис.2). В автомобільній промисловості агрегатно-модульний принцип використовується для створення систем автомобілів, таких як двигуни, підвіски, гальма, електронні системи. Кожна система представляє собою окремий модуль, який може бути вироблений та тестований незалежно, а потім легко встановлений або замінений у автомобільній конструкції.



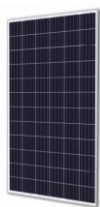
Рисунок 2. Використання агрегатно — модульного принципу в автомобільній техніці: а) — двигун компанії Ford; б) — гальма компанії Volkswagen.

### 3. Агрегатно — модульний принцип в телекомунікації

Наступний приклад — телекомунікація. У галузі телекомунікацій використовуються модульні рішення для створення комунікаційних систем. Наприклад, у мережевому обладнанні, такому як маршрутизатори та комутатори, окремі модулі можуть бути використані для розширення функціональності або забезпечення підтримки різних протоколів.

### 4. Агрегатно — модульний принцип у електроенергетиці

Далі за прикладом звертаємося до електроенергетики (рис.3). В енергетичній промисловості модульний принцип може бути використаний для створення енергетичних блоків. Наприклад: сонячних панелей, вітрових турбін, батарейних блоків. Кожний блок представляє собою самостійний модуль, який може бути встановлений або замінений в залежності від потреби.



а)



б)

Рисунок 3. Приклад застосування агрегатно — модульного принципу в електроенергетиці: а) — сонячна панель компанії Talesun; б) — турбіна компанії Siemens;

### 5. Агрегатно — модульний принцип у медицині

У медицині модульний принцип застосовується для створення медичних пристроїв та систем, таких як монітори пацієнтів, медичні інструменти, обладнання для діагностики та терапії (рис.4). Модулі можуть бути розроблені та використовуватись окремо, а потім поєднані для створення комплексних медичних систем.



а)



б)

Рисунок 4. Приклад застосування агрегатно — модульного принципу в медицині: а) — монітор пацієнта компанії MedTech ; б) — зуботехнічний інструмент компанії Sydent;

## 6. Агрегатно — модульний принцип у машинобудуванні

Агрегатно-модульний принцип широко застосовується також і у машинобудуванні, для створення складних технічних систем.

**Виробництво обробних машин.** У виробництві обробних машин, наприклад, фрезерних або токарних верстатів, використовуються модульні блоки (рис. 5). Кожен блок відповідає за конкретну функцію, наприклад, шпиндель, основна конструкція, система керування. Ці блоки можуть бути встановлені, замінені або модернізовані окремо, забезпечуючи гнучкість та ефективність виробництва.

**Системи автоматичного керування.** У машинобудуванні використовуються модульні блоки для створення систем автоматичного керування (рис.6). Ці блоки можуть включати контролери, сенсори, актуатори та інші компоненти, які дозволяють автоматизувати процеси управління та контролю в машині або виробничому обладнанні. Модульний підхід спрощує розробку та супровід систем керування, а також дозволяє їх легко модернізувати та адаптувати до змінних потреб.



а)



б)

Рис.5. Приклад застосування агрегатно — модульного принципу у верстатах: а) — патрон для ручного нарізання різьби ; б) — шпиндель для ЧПУ верстата;



а)



б)

Рисунок 6. Приклад застосування агрегатно — модульного принципу у системах автоматичного керування: а) індуктивний кінцевик; б) механічний кінцевик.

## 7. Агрегатно — модульний принцип у зварюванні

Агрегатно-модульний принцип використовується в зварювальному виробництві для забезпечення гнучкості та ефективності процесу. Цей принцип використовується у наступних елементах зварювального виробництва:

**Зварювальні роботи.** У виробництві зварювальних роботів (рис.7) можуть використовуватись модульні блоки, які включають різні функціональні компоненти, такі як робоча головка, джерело живлення та система керування. Ці блоки можуть бути замінені або модернізовані окремо, що дозволяє швидко адаптувати систему зварювання під конкретні потреби та вимоги проекту.



а)



б)

Рисунок 7. Приклад застосування агрегатно — модульного принципу у зварювальних роботах: а) зварювальний робот зі змінним зварювальним соплом; б) — зварювальний робот без інструмента (робочого модуля)

**Зварювальні верстати.** У виробництві зварювальних верстатів також можуть застосовуватись модульні блоки. Кожен блок може виконувати конкретну функцію, таку як живлення, керування, система охолодження тощо. Використання модульних блоків дозволяє забезпечити гнучкість при конфігуруванні верстатів під потреби виробництва.

**Зварювальні лінії.** У великому масштабі агрегатно-модульний принцип може бути використаний для створення зварювальних ліній (рис.8). Кожен модуль може включати окремі станції зварювання або компоненти лінії, такі як підводи матеріалу, маніпулятори, системи контролю тощо. Ці модулі можуть бути легко збирані та розбирані, а також модернізовані або замінені для оптимізації продуктивності та адаптації до змінних вимог виробництва.



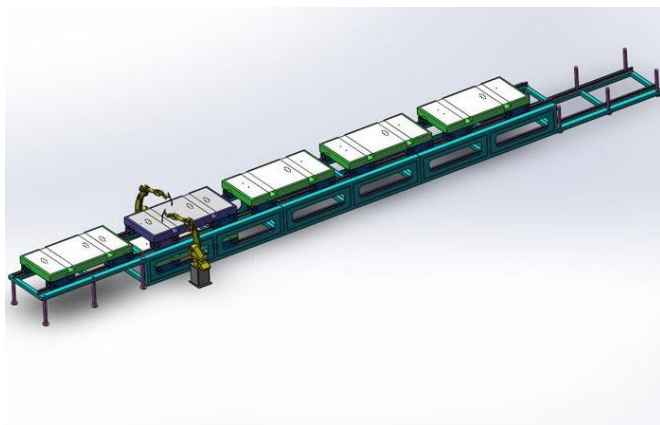


Рисунок 8. Зварювальні лінії побудовані за агрегатно — модульним принципом зі зварювальними роботами

Використання агрегатно-модульного принципу дозволяє забезпечити гнучкість, швидкість налаштування та ефективність у зварювальному виробництві, дозволяючи швидко реагувати на зміни та вдосконалювати процес зварювання.

## ВИСНОВКИ

Наведені вище приклади демонструють, як агрегатно-модульний принцип використовується в різних галузях, а також у машинобудуванні для створення складних технічних систем. Використання агрегатно-модульного принципу дозволяє досягти більшої гнучкості, ефективності та швидкості в розробці, супроводі та модернізації техніки.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: В 3-х частинах. За ред. Ю.М. Кузнєцова /автор Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Кіріченко А.М. та інші. Кіровоград, 2003. — ч.1 — 422с. — ч.2 — 286с. — ч.3 — 507с.
2. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Теорія технічних систем в аспектах досліджень і технічної творчості: Підручник-Луцьк: Вежа-Друк, 2023 – 292 с. –
3. Кузнєцов Ю.Н. Морфологический синтез станков и их механизмов: монография /Ю.Н.Кузнєцов, Герра Ж.А.Хамуйела, Т.О.Хамуйела; под ред.Кузнєцова.-К.: ООО «ГНОЗИС», 2012.-416 с.
4. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління. /За загальною редакцією проф. Ю.М. Кузнєцова. – Луцьк, 2012. - 425с.
5. Кузнєцов Ю.М. Теорія розв'язання творчих задач. – К.: ТОВ «ЗМОК»- ПП «ГНОЗИС», 2003. – 294 с.
6. Модульное оборудование для гибких производственных систем механической обработки /Под ред. Р.Э.Сафрагана.-К.: Техника, 1989.-175 с.
7. Севбо П.И. Конструирование и расчет механического сварочного оборудования / П.И. Севбо. – К.: Наук. думка, 1978. –400 с.
8. Тимченко В.А., Сухомлин А.А. Роботизация сварочного производства -К.: Техника, 1988.-175 с.
9. Yuriy Kuznetsov Morphological synthesis of the universal rotary welding device //Journal of the Technical University of Gabrovo, vol. 66 (2022), p.p. 1-4



**Побочій О.А., Кравцова Д.Ю.** (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна).

## **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ**

**Анотація:** У роботі досліджено перспективи застосування полімерних композиційних матеріалів, зокрема вуглепластиків, для зниження маси конструкцій у машинобудуванні. Показано, що використання композитів дозволяє зменшити масу виробів на 40–70% порівняно з традиційними металами без втрати міцності. Проаналізовано вплив структури матеріалу, типу армування та орієнтації волокон на механічні властивості. Розглянуто сучасні технології виготовлення виробів із CFRP і CFRTF, включаючи ін'єкційне формування, вакуумне формування, гаряче пресування та адитивні методи. Особливу увагу приділено використанню вторинного вуглецевого волокна та автоматизованих технологій, що сприяють зниженню собівартості виробництва. Наведено приклади практичного застосування композитів у автомобілебудуванні та авіації, що підтверджують їх ефективність щодо підвищення паливної економічності та екологічної безпеки. Отримані результати свідчать про доцільність широкого впровадження полімерних композиційних матеріалів у сучасному машинобудуванні.

**Ключові слова:** полімерні композиційні матеріали; CFRP; CFRTF; вуглепластик; адитивні технології; армування; машинобудування.

**Abstract:** This paper investigates the prospects of using polymer composite materials, particularly carbon fiber reinforced polymers, for reducing structural weight in mechanical engineering. It is shown that composites can reduce product weight by 40–70% compared to conventional metals without compromising strength. The influence of material structure, reinforcement type, and fiber orientation on mechanical properties is analyzed. Modern manufacturing technologies for CFRP and CFRTF components are reviewed, including injection molding, vacuum forming, hot pressing, and additive manufacturing methods. Special attention is given to the use of recycled carbon fiber and automated production technologies, which contribute to cost reduction. Practical examples of composite applications in automotive and aerospace industries are presented, demonstrating their effectiveness in improving fuel efficiency and environmental performance. The results confirm the feasibility of widespread implementation of polymer composite materials in modern mechanical engineering.

**Keywords:** polymer composite materials; CFRP; CFRTF; carbon fiber; additive manufacturing; reinforcement; mechanical engineering.

Згідно з дослідженнями авторів [1], використання вуглепластику з термопластичною матрицею (CFRTF) є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку автомобільної промисловості, оскільки поєднує високі механічні властивості з можливістю вторинної переробки та високою швидкістю виробництва. CFRTF являє собою композитний матеріал, у якому армуванням виступають вуглецеві волокна, а матрицею — термопластичні полімери. Вуглецеві волокна отримують шляхом карбонізації різних прекурсорів, зокрема віскози, пекових смол або

синтетичних полімерів, таких як поліакрилонітрил і поліетилен, при цьому вміст вуглецю значно зростає в процесі термічної обробки. Як матрицю застосовують як загальнопромислові полімери (ABS, поліпропілен, поліетилен), так і інженерні термопласти — полієфірсульфон, полієфірімід, полієфірефіркетон, поліфеніленсульфід, полікарбонат і поліаміди, що забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики.

Структура CFRTP визначається формою та орієнтацією волокон. Вуглецеві волокна можуть бути безперервними у вигляді джгутів, стрічок або переривчастими – короткими чи довгими рубаними волокнами. Для конструкцій, де потрібна висока міцність у визначених напрямках, застосовують безперервні волокна, тоді як для масових виробів з більш рівномірними властивостями — переривчасті. Важливу роль відіграють сучасні технології формування структури, зокрема метод “thin film”, який дозволяє досягти рівномірного розподілу волокон та підвищити якість матеріалу.

Технології виготовлення виробів із CFRTP поділяються на кілька груп. До традиційних методів належать ін’єкційне формування, яке дозволяє виготовляти складні деталі різних розмірів; вакуумне формування, що забезпечує видалення повітря та підвищення якості; а також гаряче пресування, при якому матеріал нагрівається вище температури плавлення матриці, формується у прес-формі та твердне при охолодженні. Значного розвитку набули адитивні технології, зокрема FDM/FFF, SLS та SLA, які дозволяють створювати складні деталі без використання дорогих форм. До автоматизованих методів належать намотування, при якому безперервні волокна намотуються на форму для створення міцних конструкцій, а також автоматизоване викладання волокон і стрічки, що здійснюється роботизованими системами та забезпечує високу точність, зменшення дефектів і зниження трудовитрат.

Автори [2] також досліджували вуглепластик з армуванням вуглецевими волокнами, які на 80–95% складаються з чистого вуглецю. Найбільш поширеними типами плетіння представлені у [2] є полотняне, саржеве та атласне, кожне з яких впливає на механічні властивості матеріалу. Важливим фактором є орієнтація волокон: при куті  $0^\circ$  матеріал найкраще витримує осьові навантаження, при  $\pm 45^\circ$  — зсувні, а при  $90^\circ$  — поперечні. Завдяки цьому можна цілеспрямовано керувати властивостями матеріалу відповідно до умов експлуатації.

Однією з головних переваг вуглепластику автори [2] відзначають значний виграш у масі. У порівнянні з алюмінієм, наприклад, сплавом 6061, CFRP дозволяє зменшити масу конструкцій приблизно на 40% без втрати міцності, а порівняно зі сталлю — до 70%. Практичні приклади підтверджують ці показники: панелі даху автомобілів BMW M6 та Chevrolet Stingray з вуглепластику є приблизно на 5,5 кг легшими за сталеві аналоги, незважаючи на більшу товщину; капот Chevrolet Corvette Z06 важить приблизно на 4,8 кг менше стандартного; у авіації

використання композитів у літаку Airbus A320 (близько 21,5% від загальної маси) дозволило зменшити вагу на 1,1 тонни [2].

Зниження маси безпосередньо впливає на економічну ефективність. Наприклад, в авіації зменшення маси літака лише на 1 кг може забезпечити економію до 120 літрів пального протягом усього терміну експлуатації. Крім того, використання великих цілісних композитних елементів, як у літаку Boeing 787, дозволило відмовитися від близько 50 000 кріпильних елементів (заклепок), що значно скоротило витрати на складання.

Дослідження авторів [3] також висвітлює переваги вуглепластику у зменшенні маси транспортних засобів, що безпосередньо впливає на підвищення паливної ефективності та зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Вуглепластик у [3] розглядається як композитний матеріал, що складається з вуглецевих волокон у епоксидній смолі. Для покращення властивостей пропонують добавки, зокрема графен у невеликих концентраціях (близько 0,1%), що підвищує міцність і експлуатаційні характеристики кузовних елементів. Також застосовуються гібридні конструкції, наприклад сендвіч-панелі з алюмінієвим стільниковим заповнювачем та полімер-металеві гібриди, у яких вторинне вуглеволокно поєднується з металевими вставками.

Автори [3] наводять схожі приклади вирашного застосування вуглепластиків. Наприклад, маса нижнього важеля підвіски автомобіля зменшується з 2,15 кг до 1,12 кг; використання графену в конструкції капота дозволяє знизити його масу приблизно на 50%; бампер стає легшим на 33%, а двері — на 35% (близько 7 кг). У роботі [3] уточнено, що кожен 10 кг зниження ваги дозволяють зменшити викиди CO<sub>2</sub> приблизно на 1 г/км і покращити паливну економічність автомобіля. Однак, через свою високу ціну вуглепластики зараз переважно використовуються в суперкарах та спортивних авто високого класу, де переваги в міцності та вазі є важливішими за вартість.

З економічної точки зору, ринок вуглецевого волокна демонструє стабільне зростання понад 8% на рік і, за прогнозами, може досягти обсягу 7–8,9 млрд доларів США до 2031 року. Основним шляхом зниження високої вартості виробництва є використання вторинного вуглецевого волокна (rCF), що дозволяє суттєво зменшити витрати. Крім того, композити CFRTP забезпечують більш дешеві та ефективні технології обробки порівняно з традиційними термореактивними вуглепластиками, що робить їх особливо привабливими для масового виробництва [1].

З усіх робіт [1-3] впливає, що вуглепластики наразі є значно дорожчими за звичайні сталеві або алюмінієві сплави. Основними шляхами вирішення цієї проблеми автори називають використання вторинної сировини, автоматизацію виробництва та перехід на термопластичні матриці, які легше та швидше піддаються формуванню. Таким чином, сьогодні дослідження властивостей і методів виготовлення

полімерних композиційних матеріалів є актуальною задачею матеріалознавства і промисловості.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: A review / A. M. Almushaikeh, S. O. Alaswad, N. B. Alqahtani [et al.]. *Polymer Testing*. 2023. Vol. 123. Art. 108029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108029>.
2. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability / J. P. Davim (Ed.). *Modern Manufacturing Processes*. Cham : Springer, 2020. P. 473–501. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39062-4_20).
3. A review of carbon fiber materials in automotive industry / H. Ahmad, A. A. Markina, M. V. Porotnikov, F. Ahmad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 971, Iss. 3. Art. 032011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032011>.

УДК 621.822

**Рак А.О.** (Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна).

## ОЦІНКА ВПЛИВУ МАСИ ТІЛ КОЧЕННЯ НА НАВАНТАЖЕНІСТЬ ТА РЕСУРС ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ТУРБОАГРЕГАТИВ

**Анотація:** У роботі досліджено вплив маси тіл кочення на навантаженість та ресурс підшипникових вузлів турбоагрегатів, що працюють у високошвидкісних режимах. Проаналізовано роль відцентрових сил та теплових навантажень, які суттєво впливають на довговічність підшипників. Показано, що при зростанні швидкості обертання інерційні сили можуть досягати величин, співставних із зовнішніми навантаженнями, що призводить до підвищення контактних напружень і прискореного зношування. Запропоновано аналітичний підхід до оцінки впливу маси тіл кочення на еквівалентне навантаження та ресурс підшипника. Встановлено, що зменшення маси, зокрема шляхом застосування керамічних матеріалів, дозволяє суттєво знизити відцентрову складову навантаження. Показано, що навіть часткове зменшення навантаження призводить до значного зростання ресурсу відповідно до степеневі залежності довговічності. Отримані результати підтверджують ефективність використання легких матеріалів для підвищення надійності підшипникових вузлів турбоагрегатів.

**Ключові слова:** підшипники; тіла кочення; відцентрова сила; ресурс; турбоагрегати; керамічні матеріали; довговічність.

**Abstract:** This paper investigates the influence of rolling element mass on the load and service life of bearing units in turboaggregates operating at high rotational speeds. The role of centrifugal forces and thermal loads affecting bearing durability is analyzed. It is shown that with increasing rotational speed, inertial forces can reach values comparable to external loads, leading to increased contact stresses and accelerated wear. An analytical approach for evaluating the influence of rolling element mass on equivalent load and bearing life is proposed. It is established that reducing the mass, particularly through the use of ceramic

*materials, significantly decreases the centrifugal load component. It is demonstrated that even a partial reduction in load results in a substantial increase in bearing life due to the power-law dependence of durability. The obtained results confirm the effectiveness of using lightweight materials to improve reliability of bearing units in high-speed turboaggregates.*

**Keywords:** bearings; rolling elements; centrifugal force; service life; turboaggregates; ceramic materials; durability.

Сучасні турбоагрегати працюють у режимах високих частот обертання, де швидкісний фактор  $d\dot{n}$  може перевищувати  $2 \cdot 10^6$  [2]. У таких умовах підшипникові вузли зазнають значних динамічних і теплових навантажень, що обмежує їх ресурс.

Однією з ключових причин зниження довговічності підшипників є дія відцентрових сил, які виникають у тілах кочення. При високих швидкостях ці сили можуть досягати величин, співставних або навіть більших за зовнішні навантаження [1], що призводить до підвищення контактних напружень, погіршення умов змащування, інтенсивного тепловиділення та прискореного зношування.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу маси тіл кочення на навантаженість підшипника та оцінка можливості підвищення ресурсу за рахунок її зменшення.

Сучасні підходи до підвищення ресурсу підшипників базуються на трьох основних напрямках: покращення трибологічних характеристик поверхонь (покриття DLC, TiN), оптимізація мастильних режимів та застосування нових матеріалів [4]. У роботах Т.А. Harris та рекомендаціях SKF значна увага приділяється контактній витривалості та впливу навантаження на ресурс підшипника.

Однак більшість досліджень зосереджені на поверхневих явищах і не враховують у повній мірі вплив інерційних характеристик тіл кочення на динамічну навантаженість підшипника. Для високошвидкісних вузлів турбоагрегатів саме відцентрові сили стають визначальним фактором, що обмежує ресурс.

На відміну від існуючих підходів, у даній роботі акцент зроблено на впливі маси тіл кочення як ключового параметра, що визначає рівень інерційних навантажень у підшипниковому вузлі.

Метою роботи є оцінка впливу маси тіл кочення на навантаженість та ресурс підшипникових вузлів турбоагрегатів та обґрунтування доцільності використання матеріалів зі зниженою густиною.

Відцентрова сила, що діє на тіло кочення, визначається залежністю:

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

де

$m$  – маса тіла кочення,

$\omega$  – кутова швидкість,

$r$  – радіус обертання.

Залежність показує, що при високих швидкостях вплив маси стає критичним, оскільки сила зростає пропорційно квадрату швидкості обертання.

#### Порівняння матеріалів тіл кочення

| Параметр                   | Сталь ШХ15 | Кераміка (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) |
|----------------------------|------------|--------------------------------------------|
| Густина, кг/м <sup>3</sup> | ~7800      | ~3200                                      |
| Модуль пружності, ГПа      | ~210       | ~300                                       |
| Коефіцієнт тертя           | ~0.15      | ~0.07                                      |
| Зносостійкість             | середня    | висока                                     |

Зменшення густини приблизно у 2,4 раза дозволяє знизити відцентрову складову навантаження до 60% [7]. Таким чином, зменшення густини матеріалу тіл кочення є визначальним фактором зниження інерційних навантажень у високошвидкісних підшипниках.

Еквівалентне навантаження на підшипник формується як сума зовнішнього навантаження та внутрішніх інерційних складових. При високих швидкостях обертання внесок відцентрових сил стає визначальним.

Зменшення маси тіл кочення дозволяє:

- знизити навантаження на доріжки кочення;
- зменшити контактні напруження;
- покращити стабільність роботи підшипника.

Базова довговічність підшипника визначається залежністю:

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^3$$

де

C - динамічна вантажопідйомність,

P - еквівалентне навантаження.

Навіть незначне зменшення навантаження P призводить до суттєвого зростання ресурсу через кубічну залежність.

Розглянемо умовний приклад. При заміні сталевих тіл кочення (густина ~7800 кг/м<sup>3</sup>) на керамічні (густина ~3200 кг/м<sup>3</sup>) маса зменшується приблизно у 2,4 рази. Відповідно, відцентрова сила також зменшується у 2,4 рази.

Оскільки ця складова входить до еквівалентного навантаження, можна оцінити вплив на ресурс. При зменшенні навантаження, наприклад, на 20–25%, довговічність підшипника може зрости більш ніж у 1,7–2 рази відповідно до залежності L<sub>10</sub>.

Таким чином, навіть часткове зниження інерційного навантаження дає суттєвий приріст ресурсу.

Крім зменшення маси, керамічні матеріали забезпечують:

- зниження коефіцієнта тертя;
- менше тепловиділення;
- підвищену зносостійкість;
- електроізоляційні властивості.

Отримані результати показують, що маса тіл кочення є одним із ключових факторів, що визначають ресурс підшипників у високошвидкісних умовах. На відміну від поверхневих методів зміцнення, зміна маси впливає на динамічні характеристики всього вузла.

Застосування керамічних тіл кочення дозволяє підвищити допустимі швидкості обертання, знизити теплове навантаження та підвищити надійність роботи турбоагрегатів.

## ВИСНОВКИ

Маса тіл кочення є визначальним фактором, що впливає на навантаженість підшипникових вузлів турбоагрегатів. Зменшення маси призводить до зниження відцентрових сил та еквівалентного навантаження. Встановлено, що зменшення густини тіл кочення до 60% дозволяє суттєво знизити інерційне навантаження. Це забезпечує зростання ресурсу підшипника відповідно до залежності довговічності. Використання керамічних тіл кочення є ефективним напрямом підвищення ресурсу підшипників турбоагрегатів.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Harris T.A., Kotzalas M.N. *Rolling Bearing Analysis*. – 5th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2007.
2. SKF Group. *SKF Rolling Bearings Catalogue*. – SKF, 2020.
3. Harris T.A. *Advanced Concepts of Bearing Technology*. – CRC Press, 2006.
4. Bhushan B. *Introduction to Tribology*. – Wiley, 2013.
5. Donnet C., Erdemir A. *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*. – Springer, 2008.
6. Holmberg K., Matthews A. *Coatings Tribology*. – Elsevier, 2009.
7. Jones A.B., Smith C.D. *Ceramic Bearings: A Review of Manufacturing, Properties, and Applications // Materials*. – 2019. – Vol. 12(15). – 2367.
8. Zaretsky E.V. *Hybrid Bearings and Their Applications in Turbomachinery*. – NASA Technical Reports, 2010.

УДК 621.85-77

**Сліпчук А.М., Новіцький М.Я.** (Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна).

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДЕМПФЕРА СУХОГО ТЕРТЯ В МЕТАЛОРІЗАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ АМПЛІТУДИ АВТОКОЛИВАНЬ

**Анотація:** У роботі експериментально досліджено вплив параметрів сухого тертя в з'єднаннях конструктивних елементів різця на амплітуду автоколивань у процесі різання. Проаналізовано фізичну природу виникнення автоколивань, зумовлених

гістерезисною залежністю сил різання, та їх негативний вплив на якість обробки і ресурс інструменту. Запропоновано використання демпфера сухого тертя як ефективного засобу зменшення амплітуди коливань у низькочастотному діапазоні. Проведено експериментальні дослідження із застосуванням акселерометричних вимірювань та спектрального аналізу сигналів у середовищі MATLAB. Встановлено полічастотний характер коливань із домінуванням низькочастотних складових. Показано, що збільшення сили тертя сприяє зниженню амплітуди низькочастотних коливань при одночасному зростанні високочастотних компонентів. Отримані результати підтверджують ефективність використання демпфера сухого тертя для підвищення стабільності процесу різання та обґрунтовують можливість керування динамічними характеристиками системи шляхом регулювання сили тертя.

**Ключові слова:** автоколивання; різець; сухе тертя; демпфер; вібрації; обробка різанням; спектральний аналіз.

**Abstract:** This paper presents an experimental investigation of the influence of dry friction parameters in structural joints of a cutting tool on the amplitude of self-excited vibrations during machining. The physical nature of chatter vibrations caused by hysteresis in cutting force characteristics and their negative impact on surface quality and tool life are analyzed. The use of a dry friction damper is proposed as an effective method for reducing vibration amplitude, particularly in the low-frequency range. Experimental studies are carried out using accelerometer measurements and spectral signal analysis in MATLAB. The polyfrequency nature of vibrations with dominant low-frequency components is established. It is shown that increasing friction force reduces low-frequency vibration amplitudes while increasing high-frequency components. The results confirm the effectiveness of dry friction damping in improving machining stability and demonstrate the possibility of controlling dynamic system characteristics by adjusting friction force.

**Keywords:** chatter; cutting tool; dry friction; damper; vibrations; machining; spectral analysis.

## Вступ.

В машино- та приладобудуванні підвищення продуктивності механічної обробки та якості оброблених поверхонь деталей здійснюється багатьма шляхами. Однак найбільш перспективним шляхом, на сьогоднішній день, є правильне використання динамічних процесів, що відбуваються в пружних замкнутих технологічних системах. Це перш за все відноситься до автоколивальних процесів в металообробних верстатах.

## Постановка проблеми.

Як відомо, коливання, що виникають в процесі різання, негативно впливають як на якість поверхні деталі, так і на стійкість інструмента та ресурс верстата. Ці коливання поділяють на вимушені коливання та автоколивання. Вимушені коливання збуджуються непостійним характером сил різання (розриви на поверхні оброблення), відцентровими силами (неврівноваженість деталей), періодичними силами, що передаються як від приводу верстата, так і від інших верстатів. Амплітуду цих коливань легко зменшують відходом від резонансу (зміною частоти обертання шпинделя) та віброізоляцією верстатів.



Значно гіршою є проблема зменшення амплітуди автоколивань, основною причиною виникнення яких є неоднозначність характеристики сил різання [1].

Ця неоднозначність призводить до утворення петлі гістерезису (рис.1), де одному і тому ж приросту товщини зрізу  $y$  відповідають різні прирости сили різання  $P_y$  при врізанні різці і його відштовхуванні. При відштовхуванні різець контактує із більш зміцненим (наклепаним) металом чим при врізанні, тому при відштовхуванні сила різання буде більшою чим при врізанні, при тому ж самому значенні товщини зрізу.

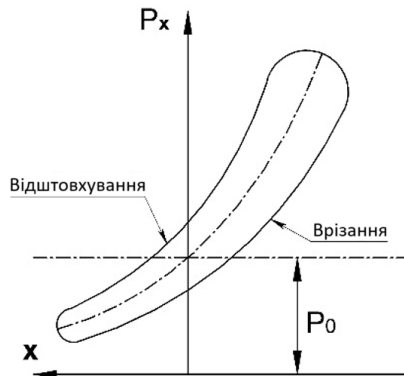


Рисунок 1.  
Експериментальна  
залежність  $P_y=f(y)$



Рисунок 2. Антивібраційний різець Silent  
Tools

Чим чутливіший до наклепу буде матеріал деталі, тим більшою буде сила, яка генерує автоколивання. І відбуватимуться ці коливання на власній частоті коливальної системи, тобто в резонансі.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Існуючі методи зменшення амплітуди автоколивань можна розбити на два класи – технологічні та конструкційні. До технологічних методів слід віднести такі як вибір відповідних режимів різання та кутів заточування інструмента [1;7;8]. До конструкційних – збільшення опору в коливальній системі та використання динамічних віброгасників [2;6;7], а враховуючи ту обставину, що автоколивання відбуваються в резонансі, де вплив згасання відіграє велике значення, збільшення опору в коливальній системі є не тільки вагомим фактором в зменшенні амплітуди автоколивань, але й фактором можливості їх виникнення взагалі, адже якщо енергія тертя буде більшою від енергії збудження, то автоколивання взагалі не виникатимуть [3;8].

На рис. 2 зображено конструкційну схему антивібраційного різця Silent Tools фірми Sandvik [5]. Всередині корпусу антивібраційного інструменту розташована демпфувальна система, що має інерційне тіло, виконане з матеріалу з високою щільною масою і закріплене на двох гумових втулках. Вільний внутрішній простір заповнено в'язкою рідиною (оливою) для підсилення ефекту демпфування.

Враховуючи той факт, що сила в'язкого тертя пропорційна швидкості коливань, такі різці ефективні на високих значеннях амплітуд або частот.

В даній роботі розглядається демпфер, дія якого ґрунтується на використанні сухого тертя, значення сили тертя якого не залежить від швидкості коливань (рис. 3). Тому він може бути ефективний на малих значеннях амплітуд і частот.

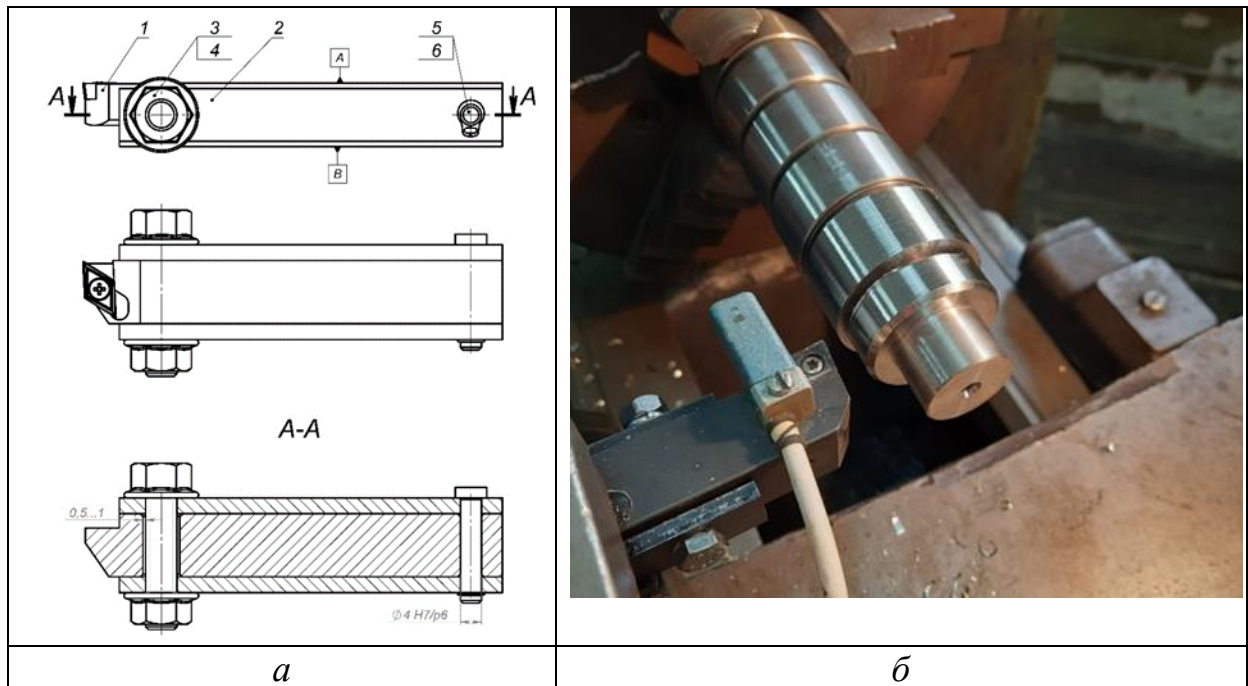


Рисунок 3. Конструкція токарного різця із демпфером сухого тертя (*а* – конструкційна схема; *б* – експериментальний взірець)

Демпфер складається із двох шліфованих пластин (2), які щільно закріплених в задній частині різця штифтом (5) та стопорним кільцем (6). Пластины (2) із різцем (1) закріплено болтовим з'єднанням (3,4). Між тілом різці і болтом виконано зазор, значення 0,5 – 1 мм, внаслідок чого різець може переміщуватися у всіх трьох координатах без контакту з болтом. Сила тертя, яка виникає між різцем і пластинами регулюється затягуванням болта та гайки. Різець встановлюється в різцетримач супорта верстата площинами А та В. Висота різця дещо вища за висоту пластин (2 – 3 мм), що виключає контакт пластин із різцетримачем.

#### **Формулювання мети дослідження.**

Мета досліджень полягає в оцінці можливості використання сил сухого тертя в з'єднаннях елементів системи ВПД для зменшення амплітуди автоколивань.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження.**

Експериментальні роботи по дослідженню демпфувальної здатності різця проводились на базі токарного верстата 16К20 (рис. 3,б) з

використанням конструкції різця, подібного до представленого на рис. 3,а. Деталь – сталевий стержень  $\varnothing 50 \times 250$  мм встановлений в патрон консольно, що забезпечує добрі коливання системи. Стержень поділений канавками на окремі зони по 30 мм. Матеріал – сталь AISI 304. Режими різання: швидкість обертання шпинделя  $n=630$  об/хв; подача супорта  $s=0.2$  мм/об; глибина різання  $t=0.5$  мм. Такі параметри вибирались з метою отримання значних коливань.

Затяжка болта демпфера здійснювалася динамометричним ключем з діапазоном вимірювання крутного моменту 2 – 24 Нм. Точність  $\pm 4\%$ .

Використовувався болт М8 класу міцності 8.8. Максимальний момент затягування 24 Нм.

Менші від 2 Нм значення моменту встановлювались з допомогою електронного динамометра з діапазоном вимірювання 0 – 30 Н. Точність  $\pm 1\%$ .

Коливання вимірювались акселерометром ІС 598А та виводились на цифровий осцилограф DSO 4102С.

Експерименти з різними значеннями моментів затягування болта проводились на одній і тій же ділянці деталі.

Результати вимірювань коливань різця при незатягнутому болтовому з'єднанні демпфера різця приведені на рис. 4.

Вихідний сигнал із давача коригувався з врахуванням його чутливості та відстані встановлення від вершини різця та защемлення різця в різцетримачі супорта. Таким чином, сигнал на рис. 4,а характеризує прискорення вершини різця. Частота дискретизації сигналу становить 12,5 кГц, чого достатньо для належного відтворення сигналу частотою до 6,25 кГц. Верхній діапазон чутливості давача становить 10 кГц.

Після чого виконувалася процедура прямого перетворення Фур'є, в середовищі MATLAB, результат якої представлено на рис. 4,б.

Як видно із рисунка, коливання вершини різця носять полічастотний характер і мають яскраво виражені максимуми на частота близько 1000 Гц; 3000 Гц та 2000 Гц.

Для визначення амплітуди сигналу слід виконати його подвійне інтегрування, що легко виконати знаючи його конкретну частоту та зробивши припущення, що сигнал гармонійний.

Амплітудно-частотна характеристика сигналу (АЧХ) представлена на рис. 4,в. Як видно із рисунка, значення амплітуд зменшуються із збільшенням частоти.

На рис. 4,г представлено АЧХ сигналу в діапазоні високих значень амплітуд, а саме 100 – 500 Гц. Діапазон частот 10 – 100 Гц відфільтровано у зв'язку з низькою точністю давача та великою кількістю низькочастотних завад.

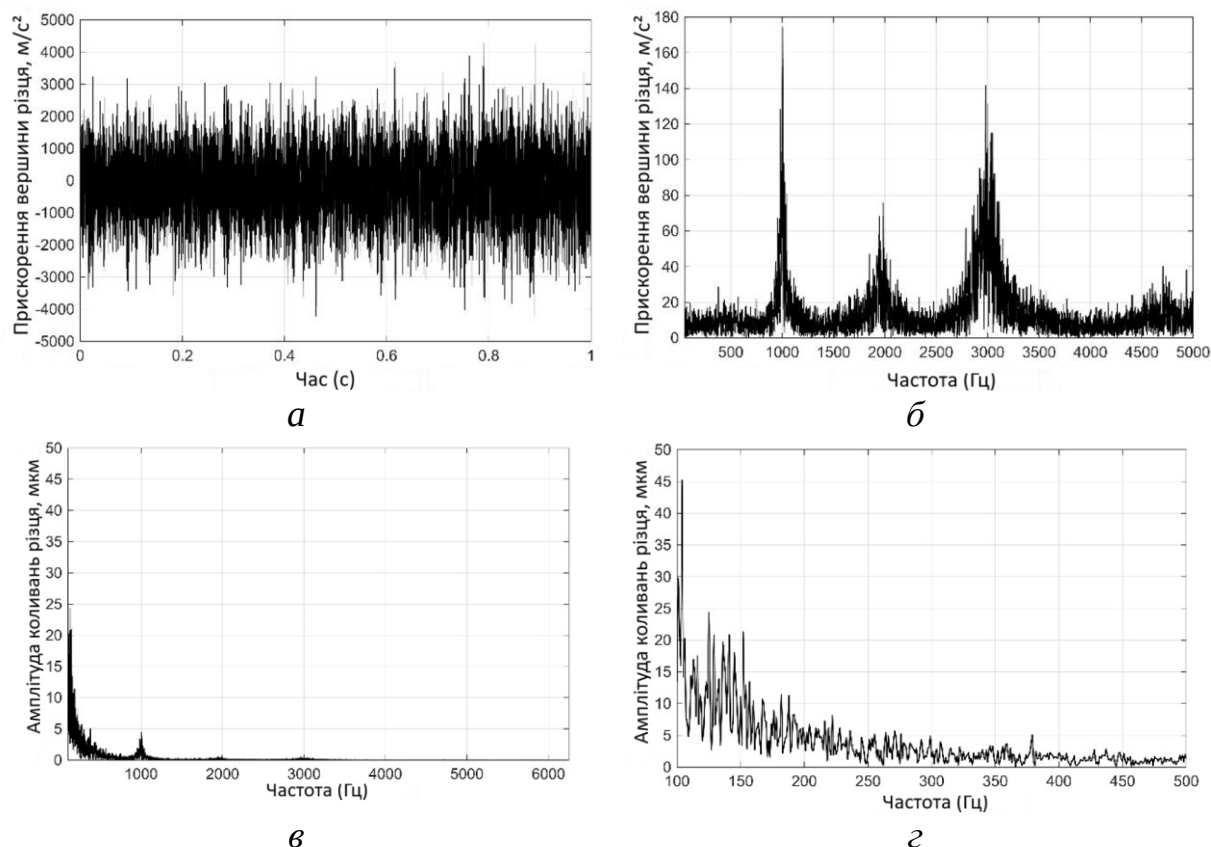


Рисунок 4. Параметри експериментальних досліджень (а – сигнал із давача – прискорення; б – FFT перетворення сигналу; в – амплітудно-частотна характеристика сигналу; г – те ж тільки для діапазону 100–500 Гц)

Оцінку інтенсивності коливань виконаємо за середнім значенням амплітуд в діапазоні 100 – 200 Гц, оскільки, як видно із рис. 4,г, це діапазон найвищих значень амплітуд. Середнє значення амплітуд коливань в цьому діапазоні становить 9.46  $\mu m$ .

На рис. 5 представлено результати експериментальних досліджень для випадку мінімальних та максимальних значень амплітуд коливань, отриманих при різних значеннях моменту затягування болтового з'єднання демпфера.

Як видно із рисунка 5,а збільшення сили тертя в демпфері призводить до зростання низькочастотних вібрацій та зменшення високочастотних і навпаки, зменшення сили тертя призводить до зменшення прискорень низькочастотних коливань і збільшення високочастотних. Так як амплітуди коливань із збільшенням частот – зменшуються (рис. 5,б), то використання демпфера сухого тертя є ефективним саме на низьких частотах коливань, чого немає в демпферах в'язкого тертя, де сила тертя пропорційна швидкості.

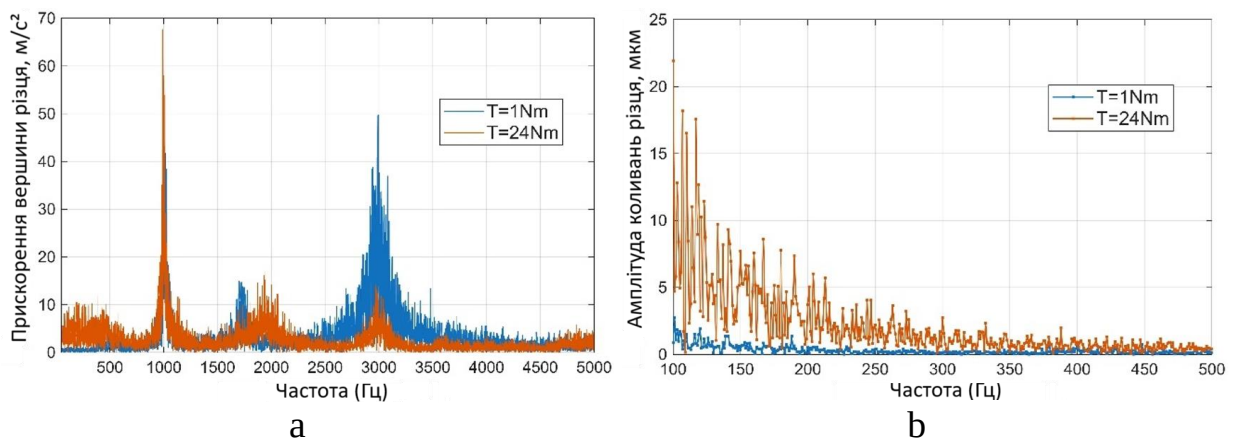


Рисунок 5. Параметри експериментальних досліджень (*а* – FFT перетворення сигналу із різними значеннями сил тертя; *б* – амплітудно-частотна характеристика сигналу із різними значеннями сил тертя)

Як видно із рисунка 5,*а* збільшення сили тертя в демпфері призводить до зростання низькочастотних вібрацій та зменшення високочастотних і навпаки, зменшення сили тертя призводить до зменшення прискорень низькочастотних коливань і збільшення високочастотних. Так як амплітуди коливань із збільшенням частот – зменшуються (рис. 5,*б*), то використання демпфера сухого тертя є ефективним саме на низьких частотах коливань, чого немає в демпферах в'язкого тертя, де сила тертя пропорційна швидкості.

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

Встановлено, що автоколивання мають полічастотний характер із найбільшими амплітудами в області низьких частот, які зменшуються зі зростанням частоти. Показано, що збільшення сили сухого тертя знижує низькочастотні складові коливань, але підвищує високочастотні.

Доведено ефективність застосування демпфера сухого тертя для зменшення амплітуди коливань у низькочастотному діапазоні, що сприяє підвищенню стабільності процесу різання. Встановлено доцільність регулювання сили тертя як параметра керування динамічними характеристиками системи. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні антивібраційного інструменту.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Altintas Y. *Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Second edition / Y. Altintas // Cambridge University Press. – 2012
2. Altintas. Y. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping / Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka - *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008) / 371-374
3. Новіцький Ю.Я., Дмитерко П.Р.. “ Оптимізація параметрів демпфування автоколивань багаточастотної коливальної системи” // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні– 2017. – № 867. – с. 51–55.

4. Novitskyi M., Novitskyi Y., Slipchuk A. The possibility of using structural damping in the design of a prefabricated turning cutter to reduce the amplitude of self-oscillations in the process of metal cutting // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2024. – Vol. 9, № 4 (2023). – P. 44–50.
5. *Виробничий антивібраційний інструмент*. Sandvik Coromant, AB Sandvikens Tryckeri. – AB Sandvik Coromant, 2012.
6. Vnukov Y.M., Djadja S.I., Kuchuhurov M.V., Kondratyuk E.V. The device for self-excited vibrations researching in turning, Ukrainian Patent UA101906. (2015).
7. Vnukov Y.M., Kuchuhurov M.V, Djadja S.I. and others: Method and device for researching the regenerative self-excited vibrations when turning / *Cutting & Tool in technological system, International Scientific-Technical Collection*, Kharkov, 2013. - Vol. 83, p.42-54.
8. Stupnytskyi V., Novitskyi Ya., Novitskyi Yu., Xianning S. Comprehensive system for simulation of vibration processes during the titanium alloys machining // *Archive of Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 70, iss. 1. – P. 85–105.

УДК 621.22

**Товкач А.О., Козлов Л.Г., Ковальчук В.А., Козлов С.Л.** (Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна).

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ГІДРОПРИВОДА НА ОСНОВІ РЕГУЛЬОВАНОГО НАСОСА З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ КЕРУВАННЯМ**

**Анотація:** У роботі обґрунтовано доцільність застосування регульованих гідроприводів із пропорційною апаратурою для підвищення енергоефективності, точності керування та ресурсу обладнання. Особливу увагу приділено дослідженню стійкості гідропривода як ключового фактора забезпечення його надійного функціонування в умовах змінних навантажень. Розглянуто особливості роботи електрогідрравлічних систем керування та їх вплив на динамічні характеристики привода. Дослідження виконано шляхом математичного моделювання у середовищі MATLAB Simulink із варіюванням основних параметрів системи, зокрема площ дроселів, коефіцієнтів підсилення та параметрів тертя. Встановлено параметри, що мають суттєвий вплив на стійкість гідропривода, та визначено діапазони їх раціональних значень. Отримані результати дозволяють сформулювати практичні рекомендації щодо забезпечення стійкої роботи гідропривода маніпулятора та можуть бути використані при проектуванні мехатронних гідравлічних систем.

**Ключові слова:** гідропривод; стійкість; електрогідрравлічне керування; регульований насос; MATLAB Simulink; динаміка; мехатронні системи.

**Abstract:** This paper substantiates the application of variable hydraulic drives with proportional control equipment to improve energy efficiency, control accuracy, and equipment durability. Particular attention is given to the stability of hydraulic systems as a key factor ensuring reliable operation under varying load conditions. The features of electrohydraulic control systems and their influence on dynamic characteristics are analyzed. The study is carried out using mathematical modelling in MATLAB Simulink with variation of key system parameters, including throttle areas, gain coefficients, and friction parameters.

*Parameters that significantly affect system stability are identified, and their optimal ranges are determined. The obtained results allow formulation of practical recommendations for ensuring stable operation of hydraulic drives in manipulator systems and can be applied in the design of modern mechatronic hydraulic systems.*

**Keywords:** hydraulic drive; stability; electrohydraulic control; variable pump; MATLAB Simulink; dynamics; mechatronic systems.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Маніпулятор на базі колісного трактора є одним із найбільш універсальних видів спеціальної техніки, що широко застосовується у будівництві, комунальному господарстві, сільському секторі та дорожніх роботах.. Завдяки своїй мобільності, компактності та багатофункціональності, така техніка є особливо актуальною в умовах обмеженого простору та необхідності швидкої зміни робочих процесів. У сучасному світі маніпулятори на базі колісних тракторів активно використовуються не лише у традиційних галузях, але й у сфері міської інфраструктури, під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, у логістичних операціях, а також при реалізації проєктів з реконструкції та розвитку територій, де важливими є універсальність, оперативність та економічна ефективність техніки [1, 2].

Разом із тим, ефективність роботи маніпулятора на базі колісного трактора значною мірою визначається характеристиками його гідроприводу з електрогідравлічним керуванням. Важливими характеристиками є енергетичні втрати внаслідок дроселювання робочої рідини, нестабільність параметрів при змінних навантаженнях, а також складність забезпечення високої точності та плавності керування робочими органами [3].

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У зв'язку з цим, актуальним є дослідження та вдосконалення гідроприводів маніпуляторів на базі колісних тракторів з метою підвищення їх енергоефективності, надійності та точності керування. Важливою складовою при створенні гідроприводів з електрогідравлічним керуванням є дослідження їх стійкості. Стійкість визначає здатність зберігати працездатність і задані характеристики в умовах змінних навантажень та динамічних впливів. Надійне функціонування гідроприводу з електрогідравлічним керуванням передбачає відсутність самозбуджень, небажаних коливань і втрати керованості в робочих режимах [4–6]. Використання сучасних методів математичного моделювання та аналізу дозволяє виявляти критичні режими роботи ще на етапі проєктування, що сприяє зниженню експлуатаційних ризиків і підвищенню загальної ефективності системи [7, 8].

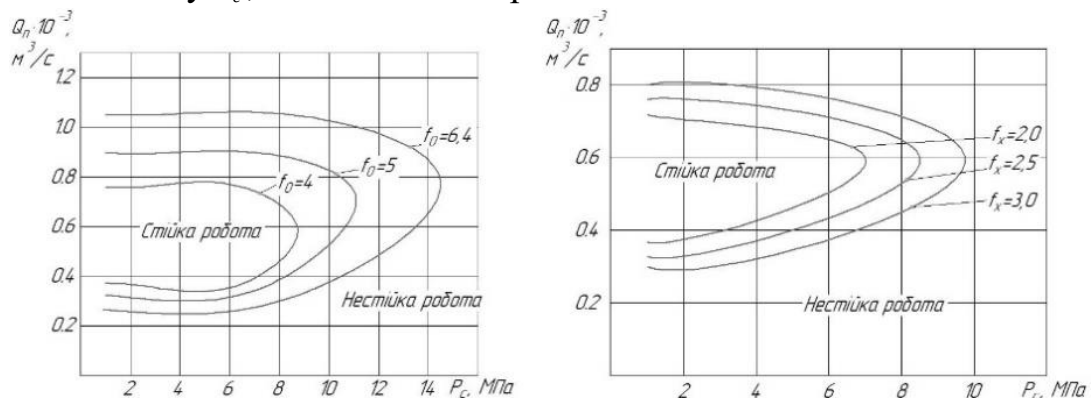
## Цілі статті та постановка задачі.

Метою даного дослідження є визначення умов забезпечення стійкої роботи гідропривода з електрогідравлічним керуванням та оцінка його робочих характеристик з урахуванням впливу параметрів керування і навантаження для забезпечення надійного та стабільного функціонування системи.

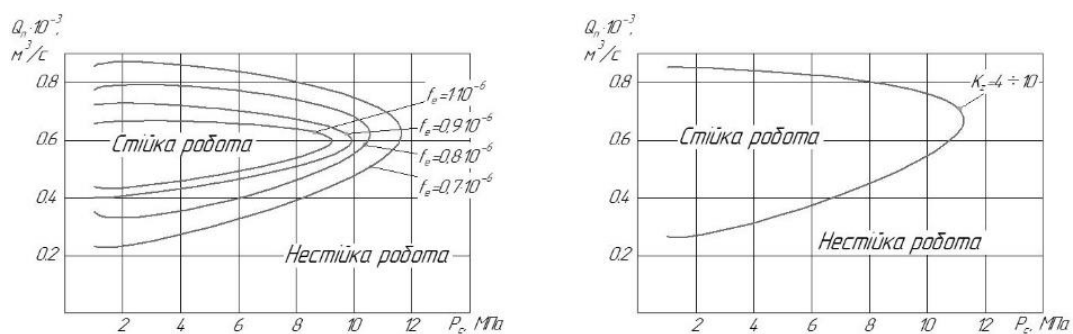
## Результати дослідження.

Дослідження стійкості гідропривода з електрогідравлічним керуванням виконано шляхом моделювання його математичної моделі [9] у спеціалізованому програмному середовищі MATLAB Simulink. В ході проведеного дослідження змінювались параметри, такі як, площа  $f_0$  дроселя, площа  $f_x$  дроселя, площа  $f_e$  дроселя, коефіцієнт підсилення  $K_x$  робочого вікна сервоклапана, коефіцієнт підсилення  $K_z$  робочого вікна золотника, коефіцієнт в'язкого тертя  $b_x$  сервоклапана, коефіцієнт в'язкого тертя  $b_z$  золотника, величина навантаження  $F_v$ , що діє на гідроциліндр у відповідних діапазонах.

В результаті досліджень отримано залежності величини подачі  $Q_n$  насоса від тиску  $P_c$ , які показані на рис. 1-4.



Рисунки 1 та 2. Графіки залежностей при зміні площі  $f_0$  дроселя та площі  $f_x$  дроселя відповідно



Рисунки 2 та 3. Графіки залежностей при зміні площі  $f_e$  дроселя та зміні коефіцієнт  $K_z$  відповідно



Величина впливу кожного із досліджуваних параметрів на стійкість гідропривода з електрогідравлічним керуванням наведена нижче у таблиці 1.

Таблиця 1 - Вплив параметрів гідропривода на стійкість

| Параметр | Не впливає | Впливає не суттєво | Впливає суттєво |
|----------|------------|--------------------|-----------------|
| $f_0$    |            |                    | +               |
| $f_x$    |            | +                  |                 |
| $f_e$    |            |                    | +               |
| $K_x$    | +          |                    |                 |
| $K_z$    |            | +                  |                 |
| $b_x$    | +          |                    |                 |
| $b_z$    |            | +                  |                 |

## ВИСНОВКИ.

За результатами проведеного дослідження встановлено параметри, що забезпечують стійке функціонування гідропривода з електрогідравлічним керуванням. На основі отриманих результатів сформульовано такі рекомендації:

- площа  $f_0$  дроселя та площа  $f_e$  дроселя мають значний вплив на стійкість гідропривода;
- площа  $f_x$  дроселя, коефіцієнт підсилення  $K_z$  робочого вікна золотника та коефіцієнт в'язкого тертя  $b_z$  золотника не мають суттєвого впливу на стійкість гідропривода;
- коефіцієнт підсилення  $K_x$  робочого вікна сервоклапана та коефіцієнт в'язкого тертя  $b_x$  сервоклапана на стійкість гідропривода не впливають;
- у процесі проектування гідропривода для забезпечення стійкості слід обрати значення параметрів  $f_0$  та  $f_e$  у діапазонах  $f_0 = 4 \dots 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  та  $f_e = 0,7 \dots 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Mondal, N. A single stage spool valve for the pressure compensator of a variable displacement pump: design, dynamic simulation and comparative study with a real pump / Mondal, N.; Saha, R.; Sanyal, D. // *Sādhanā*, 47(4), p. 279, (2022), doi:10.1007/s12046-022-02038-3.
2. Ding, R.; Zhang, J.; Xu, B.; Cheng, M.; Pan, M. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes. *Energy Conversion and Management*, 188, pp. 447-461, (2019), doi:10.1016/j.enconman.2019.03.023.
3. Козлов Л. Г. Експериментальні дослідження перехідних процесів в адаптивній гідросистемі / Козлов Л. Г., Буренніков Ю. А., Ковальчук В. А., Товкач А. О. // *LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету машинобудування та транспорту*, 2025.

4. Kumar Hati, S.; Pada Mandal, N.; Sanyal, D. Energy-saving design of variable-displacement bi-directional pump-controlled electrohydraulic system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(7), pp.1218-1236, (2021), doi:10.1177/0959651820973898.
5. Буренніков Ю. А. Огляд електрогідравлічних систем керування насосами змінної продуктивності / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2016. - № 2. - С. 202-206. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu\\_tekh\\_2016\\_2\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2016_2_37).
6. Volodymyr V. Bogachuk. Influence of electrohydraulic controller parameters on the dynamic characteristics of a hydrosystem with adjustable pump / Volodymyr V. Bogachuk; Leonid H. Kozlov; Artem O. Tovkach; Valerii M. Badakh; Taras V. Tarasenko; Yevhenii O. Kobylanskyi; Zbigniew Omiotek; Gauhar Borankulova // *Collective Monograph: "Mechatronic Systems 1: Applications in Transport, Logistics, Diagnostics, and Control*, pp. 267–278", 1st Edition // Leonid K. Polischuk, Waldamar Wojcik. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021 – 420 P.
7. Burennikov Y., Kozlov L., Pyliavets V., Piontkevych O., *Mechatronic Hydraulic Drive with Regulator, Based on Artificial Neural Network*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 209 (2017), n.1, 012071.
8. Kozlov, L. Parametric Synthesis of Electrohydraulic Control System for Variable Displacement Pump / Kozlov, L.; Bilichenko, V.; Kashkanov, A.; Tovkach, A.; Kovalchuk, V. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023, pp. 48–57.
9. Товкач А.О. Стійкість мехатронного привода на основі мультирежимного регулятора / Товкач А.О., Козлов С.Л. // Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Молода наука – роботизація і нанотехнології сучасного машинобудування», 2025.

УДК 664.8:664.6:577.15

**Хричов<sup>1</sup> С.О., Погребняк<sup>1</sup> А.В., Слободнюк<sup>2</sup> Р.Є.** (Університет митної справи та фінансів, Дніпро, Україна; Дніпровський технологічно-економічний фаховий коледж, Дніпро, Україна).

## **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ТА МІКРОСТРУКТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ ХАРЧОВИХ ГІДРОГЕЛІВ**

**Анотація.** У статті проведено комплексний аналіз сучасних технологічних підходів до формування структури харчових гідрогелів у кондитерському виробництві. Досліджено механізми гелеутворення гідроколоїдних систем, що використовуються у технологіях мармеладу, желейних цукерок, пастили та фруктових начинок. Особливу увагу приділено інноваційним технологічним рішенням, спрямованим на керування процесами структуроутворення гелів, зокрема використанню матричних гомогенізаційних насадок. Розглянуто гідродинамічні аспекти формування полімерної мережі гідрогелів, представлено концептуальну модель гомогенізаційного обладнання та проаналізовано реологічні характеристики гелевих систем. Запропоновано експериментальний дизайн дослідження для оцінювання впливу технологічних

параметрів на властивості гідроколоїдних гелів. Показано, що інтенсивна гомогенізація сприяє формуванню більш однорідної структури гелю, зменшує час гелеутворення та покращує текстурні характеристики кондитерських виробів.

**Ключові слова:** гідрогелі, гідроколоїди, пектин, гелеутворення, реологія, гомогенізація, кондитерські технології.

**Abstract.** The article presents a comprehensive analysis of modern technological approaches to the formation of food hydrogel structures in confectionery production. The mechanisms of hydrocolloid gel formation used in marmalade, jelly candies, pastille and fruit fillings are investigated. Particular attention is paid to innovative technological solutions aimed at controlling gel structure formation, including the use of matrix homogenization nozzles. Hydrodynamic aspects of polymer network formation are discussed and a conceptual model of homogenization equipment is proposed. Rheological characteristics of hydrogel systems are analyzed and an experimental design is suggested to evaluate the influence of technological parameters on gel properties. The results indicate that intensive homogenization contributes to the formation of a more homogeneous gel structure, reduces gelation time and improves the texture of confectionery products.

**Keywords:** hydrogels, hydrocolloids, gelation, confectionery technology, rheology.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Сучасний розвиток харчової промисловості характеризується зростанням попиту на функціональні, структурно стабільні та органолептично привабливі кондитерські вироби. Важливу роль у формуванні текстури таких продуктів відіграють харчові гідрогелі, які є тривимірними полімерними мережами, здатними утримувати значну кількість води без втрати структурної цілісності. У кондитерському виробництві гідрогелеві системи використовуються у технологіях мармеладу, желейних цукерок, пастили, зефіру, желейних начинок та інших продуктів із гелевою структурою.

Однак традиційні технології формування гелевих структур, що базуються переважно на використанні пектину, агар-агару, желатину або крохмалю, часто мають низку обмежень, пов'язаних із нестабільністю текстури, високою чутливістю до змін рН, температури та іонного складу середовища. Крім того, сучасні тенденції розвитку харчових технологій, зокрема орієнтація на функціональні інгредієнти, зниження вмісту цукру та використання рослинної сировини, потребують нових підходів до формування структурованих гідрогелевих систем.

У зв'язку з цим актуальним напрямом досліджень є розроблення інноваційних технологічних методів керування структуроутворенням гелів, зокрема використання інтенсивних механічних впливів та спеціалізованого обладнання.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Наукові дослідження останніх років свідчать про значний інтерес до гідрогелевих систем у харчових технологіях. Зокрема, у роботах Nath та ін.

розглянуто фундаментальні принципи формування харчових гідрогелів, їх мікроструктуру та функціональні властивості у різних харчових системах [1]. Автори зазначають, що гідрогелі можуть формуватися через різні механізми, зокрема іонне зшивання, термічне гелеутворення, ферментативну полімеризацію та фізичне самоорганізування полімерних мереж.

Дослідження Li та співавторів показують, що різноманіття структур гідрогелів зумовлене властивостями полімерних матриць та умовами їх формування, що дозволяє регулювати текстуру, еластичність та водоутримувальну здатність продуктів [2]. У свою чергу, Pirsra та Hafezi підкреслюють важливість використання гідроколоїдів як ключових компонентів у формуванні структурованих харчових систем [3].

Значну увагу в сучасних дослідженнях приділено пектиновим гідрогелям, які широко використовуються у кондитерських виробках. Said та ін. встановили, що механізм гелеутворення пектину значною мірою залежить від ступеня естерифікації, концентрації цукру та кислотності середовища [4].

Останні наукові огляди також демонструють перспективність використання природних полімерів, морських полісахаридів та комбінованих гідроколоїдних систем, що дозволяє отримувати більш стабільні та функціональні гідрогелі [5; 6]. Окрім того, активно розвиваються інноваційні технології формування гелевих структур, зокрема 3D-друк харчових продуктів на основі гідроколоїдних систем, що відкриває нові можливості для створення структурованих кондитерських виробів [7].

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні гідрогелевих систем, низка питань залишається недостатньо вивченою. Зокрема, потребує подальшого дослідження:

- а) оптимізація технологічних параметрів формування гідрогелів у складних багатокомпонентних кондитерських системах;
- б) взаємодія різних гідроколоїдів у комбінованих гелевих структурах;
- в) вплив нових технологічних методів обробки на стабільність гелевих структур;
- г) розроблення гідрогелів із покращеними функціональними властивостями для виробництва продуктів зі зниженим вмістом цукру.

Таким чином, існує потреба у системному аналізі сучасних технологічних підходів до формування структури харчових гідрогелів у кондитерських системах.

## **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою роботи є обґрунтування інноваційних технологічних підходів до формування структури харчових гідрогелів у кондитерському виробництві із застосуванням матричної гомогенізаційної насадки.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: (1) проаналізувати сучасні механізми гелеутворення; (2) дослідити гідродинамічні параметри процесу гомогенізації; (3) розробити концептуальну модель матричної гомогенізаційної насадки; (4) запропонувати експериментальний дизайн дослідження.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Формування структури харчових гідрогелів у кондитерських системах є складним фізико-хімічним процесом, який включає формування просторової полімерної мережі, стабілізацію водної фази та встановлення реологічної рівноваги між еластичними і в'язкими компонентами системи. З метою дослідження особливостей структуроутворення гідроколоїдних гелів у кондитерських технологіях було проведено комплексне теоретичне та експериментальне дослідження, яке включало моделювання гідродинамічних процесів, аналіз реологічних властивостей гелевих систем та оцінку впливу параметрів гомогенізації на формування полімерної структури гелю.

Методологія дослідження передбачала використання модельної гідроколоїдної системи на основі пектину як одного з найбільш поширених гелеутворювачів у кондитерській промисловості. Дослідження проводили у три етапи: формування гідроколоїдної системи, гомогенізаційна обробка суміші та аналіз реологічних характеристик отриманих гелів. Під час підготовки модельних систем концентрацію пектину змінювали у межах 1–3 %, що відповідає типовим технологічним параметрам виробництва мармеладних виробів. Для дослідження впливу технологічних факторів було застосовано повний факторний експеримент, у якому змінними параметрами виступали концентрація гелеутворювача, швидкість гомогенізації та температура процесу.

Основою технологічної інтенсифікації процесу структуроутворення гелю стала розроблена матрична гомогенізаційна насадка, яка створює систему перехресних турбулентних потоків. Конструкція насадки включає вхідний канал подачі продукту, матричну пластину з отворами малого діаметра, систему перехресних каналів та камеру турбулентного змішування. Така конструкція дозволяє створювати значні градієнти швидкості, що забезпечує ефективне диспергування полімерних агрегатів і рівномірний розподіл гелеутворювача у системі. Схематичне зображення конструкції насадки наведено на рис. 1.

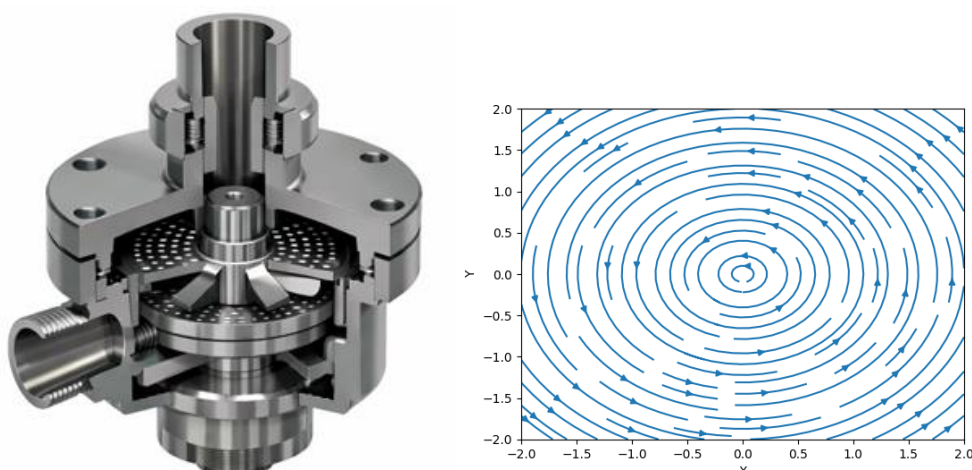


Рисунок 1. 3D-схема матричної гомогенізаційної насадки для формування гідроколоїдних гелів

Гідродинамічні умови процесу оцінювали за допомогою числа Рейнольдса. Результати розрахунків показали, що під час проходження гідроколоїдної суміші через матричну пластину значення числа Рейнольдса знаходиться у межах  $10^4$ – $10^5$ , що відповідає турбулентному режиму течії. Це створює умови для інтенсивного змішування компонентів системи та формування більш однорідної полімерної мережі.

Основні параметри гідродинаміки потоків наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Параметри гідродинаміки потоків у зоні гомогенізації

| Параметр           | Позначення | Типові значення                 |
|--------------------|------------|---------------------------------|
| швидкість потоку   | $v$        | 2–10 м/с                        |
| число Рейнольдса   | Re         | $10^4$ – $10^5$                 |
| градієнт швидкості | $\gamma$   | $10^3$ – $10^4$ с <sup>-1</sup> |
| час гомогенізації  | $t$        | 1–10 с                          |

Під час експериментальних досліджень було встановлено, що збільшення швидкості гомогенізації сприяє більш рівномірному розподілу полімерних ланцюгів у системі. Це призводить до формування гелю з більш дрібною та однорідною структурою пор. Такий ефект пояснюється руйнуванням полімерних агрегатів та їх подальшим рівномірним розподілом у водній фазі.

Мікроструктуру отриманих гелів аналізували методом скануючої електронної мікроскопії. SEM-аналіз показав, що у зразках, оброблених із застосуванням гомогенізаційної насадки, формується більш дрібнопориста полімерна структура. Пори мають розмір у межах 5–20 мкм і формують тривимірну мережу з великою кількістю вузлів зшивання. У зразках, отриманих без інтенсивної гомогенізації, спостерігалася більш груба структура гелю з нерівномірним розподілом пор.

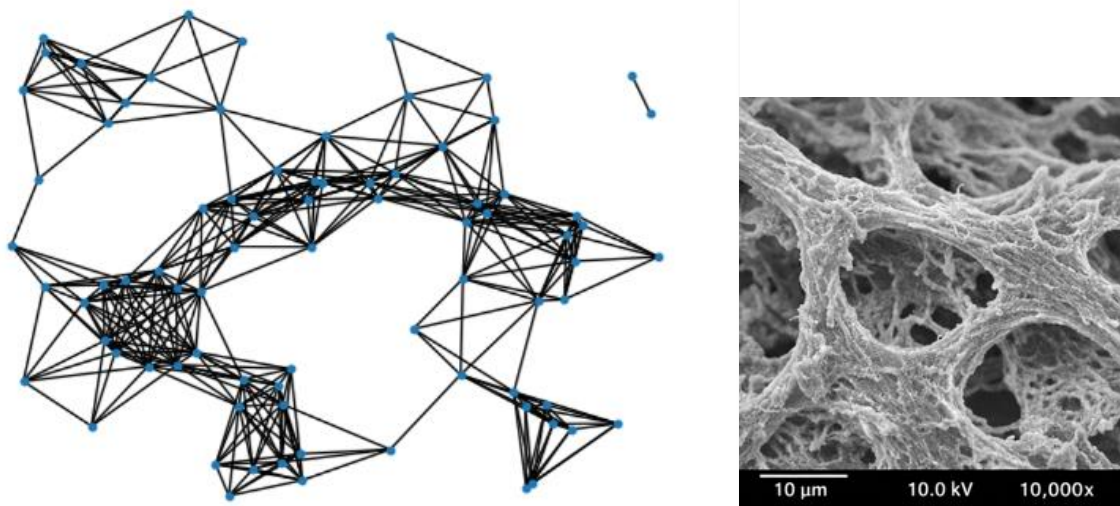


Рисунок 2. SEM-зображення мікроструктури полімерної мережі гідрогелю

Отримані результати узгоджуються з теоретичною моделлю структури гелю, згідно з якою механічні властивості полімерної мережі визначаються розміром осередків гелю. Модуль пружності гелю описується залежністю:

$$G \sim \frac{kT}{\xi^2}, \quad (1)$$

де

$G$  – модуль пружності гелю;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура;

$\xi$  – кореляційна довжина полімерної мережі.

Згідно з цією моделлю, зі зменшенням розміру осередків полімерної мережі зростає жорсткість гелю. Саме такий ефект було зафіксовано у зразках, оброблених із застосуванням матричної гомогенізаційної насадки.

Реологічні властивості отриманих гелів оцінювали методом осциляційної реометрії. Основними параметрами аналізу виступали модуль зберігання ( $G'$ ) та модуль втрат ( $G''$ ). Під час дослідження було встановлено, що для всіх досліджених зразків значення  $G'$  перевищує  $G''$ , що свідчить про домінування еластичних властивостей системи. При цьому збільшення швидкості гомогенізації призводить до зростання модуля зберігання на 15–30 %, що підтверджує формування більш жорсткої полімерної структури.

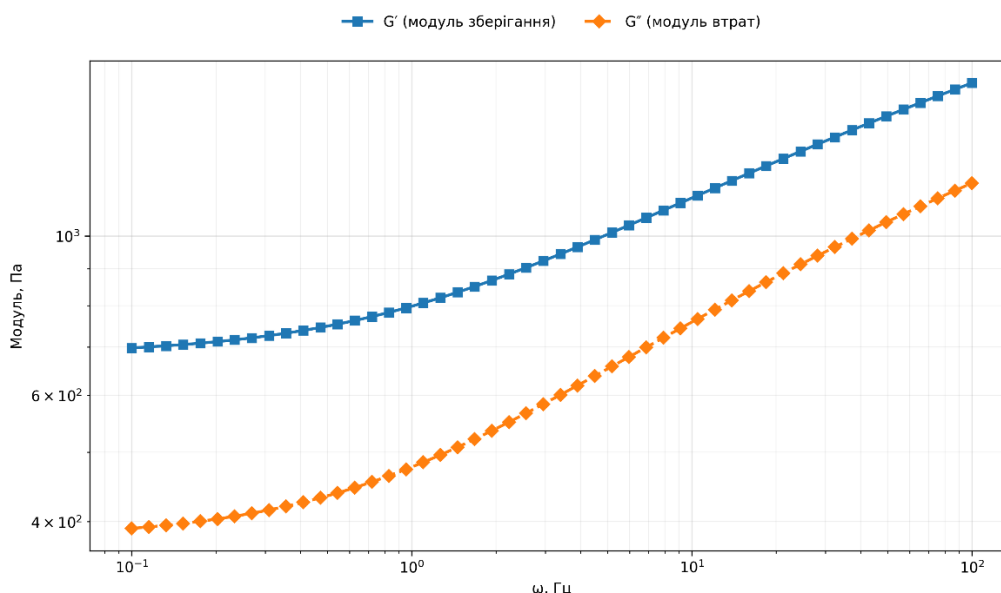


Рисунок 3. Реологічні характеристики гідрогелевої системи ( $G'$  та  $G''$ )

Порівняльний аналіз результатів показав, що застосування матричної гомогенізаційної насадки забезпечує:

- ✓ підвищення однорідності структури гелю;
- ✓ зменшення часу гелеутворення приблизно на 20–25 %;
- ✓ збільшення модуля пружності гелю на 15–30 %;
- ✓ покращення стабільності структури під час зберігання.

Таким чином, використання інтенсивної гомогенізації дозволяє значно підвищити ефективність формування структури гідроколоїдних гелів у кондитерських технологіях. Отримані результати підтверджують доцільність застосування матричних гомогенізаційних насадок для керування процесом структуроутворення гелів та створення кондитерських виробів із покращеними текстурними характеристиками.

### Висновки та перспективи подальших досліджень.

Проведене дослідження дозволило оцінити особливості формування структури харчових гідрогелів у кондитерських технологіях та визначити перспективні напрями удосконалення процесів структуроутворення гідроколоїдних систем. Встановлено, що гідрогелі являють собою складні полімерні системи з тривимірною мережею, яка формується внаслідок взаємодії гідроколоїдів із водною фазою та визначає текстурні і реологічні властивості продукту. Показано, що механізм гелеутворення залежить від типу гелеутворювача, його концентрації, рН середовища, температури та інтенсивності механічної обробки.

Обґрунтовано ефективність застосування матричних гомогенізаційних насадок для інтенсифікації процесу формування гелевої структури. Створення турбулентного режиму течії при швидкостях потоку 2–10 м/с і числах Рейнольдса  $10^4$ – $10^5$  забезпечує більш рівномірне диспергування полімерних агрегатів і прискорює формування полімерної мережі. Мікроструктурний та реологічний аналіз показав, що інтенсивна



гомогенізація сприяє утворенню більш однорідної дрібнопористої структури гелю та підвищенню модуля зберігання  $G'$ , який перевищує модуль втрат  $G''$ , що підтверджує формування стабільної еластичної структури.

Порівняльний аналіз результатів показав, що використання матричних гомогенізаційних насадок дозволяє підвищити однорідність гелевої структури, зменшити час гелеутворення на 20–25 % та збільшити модуль пружності системи на 15–30 % порівняно з традиційними методами змішування. Це свідчить про перспективність застосування інтенсивної гомогенізації у технологіях виробництва мармеладу, желейних цукерок, фруктових начинок та інших гелеутворених кондитерських виробів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з оптимізацією геометричних параметрів гомогенізаційних насадок, дослідженням гідродинаміки процесу за допомогою CFD-моделювання та вивченням комбінованих гідроколоїдних систем для створення гелів із новими функціональними властивостями. Важливим напрямом є також застосування сучасних методів структурного аналізу (SEM-мікроскопія, реометрія, спектроскопічні методи) для детального дослідження механізмів формування полімерної мережі гідрогелів та оптимізації технологічних параметрів їх отримання.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Nath P., Saha P., Halder S. A comprehensive review of food hydrogels: structure, properties and applications. *Gels*. 2022. Vol. 8, No. 1. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels8010001>
2. Li J., Mo L., Lu C., Fu T., Yang H., Zhao G. Functional hydrogels in food science: properties, applications and future perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. Vol. 61, No. 11. P. 1891–1908. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1761739>
3. Pirsa S., Hafezi N. Hydrocolloids in food industry: structure, functionality and applications. *Food Hydrocolloids*. 2022. Vol. 124. Article 107309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107309>
4. Said N. S., Abdullah N., Rahman N. A. Pectin-based hydrogels and their application in food systems. *Gels*. 2023. Vol. 9, No. 9. P. 732. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels9090732>
5. Hu Y., Xiong W., Li J., Li B. Marine polysaccharide hydrogels: preparation, properties and food applications. *Food Hydrocolloids*. 2022. Vol. 124. Article 107244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107244>
6. Gao Y., Liu Y., Yang W. Natural polymer-based hydrogels in food systems: recent advances and future perspectives. *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 7. Article 1077. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13071077>
7. Sun J., Zhou W., Huang D., Fuh J., Hong G. An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and Bioprocess Technology*. 2022. Vol. 15. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02761-7>

**Цимбал Б.М.,** (Національний університет цивільного захисту України м. Черкаси, Україна; ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНФЕСТПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна).

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ДРОНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ УМОВ ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ**

**Анотація:** У роботі розглянуто питання удосконалення безпілотного літального апарата для моніторингу умов праці та техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Обґрунтовано доцільність застосування корпусованої конструкції дрона з підвищеним рівнем захисту від зовнішніх впливів. Запропоновано інтеграцію інерціальних, візуальних та лазерних систем навігації для забезпечення автономної роботи. Сформовано склад сенсорного обладнання для комплексного контролю параметрів виробничого середовища, включаючи газоаналізатори, датчики пилу, тепловізійні та оптичні системи. Показано, що запропоноване технічне рішення сприяє підвищенню рівня безпеки праці, зниженню виробничих ризиків та розвитку систем промислового моніторингу.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, дрон, гірничо-металургійний комплекс, техногенна безпека, охорона праці, моніторинг, сенсорні системи, штучний інтелект, навігація, запиленість, газове середовище.

**Abstract:** The paper addresses the improvement of an unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring working conditions and industrial safety at mining and metallurgical enterprises. The feasibility of using an enclosed drone design with enhanced protection against external impacts is substantiated. The integration of inertial, visual, and laser-based navigation systems to ensure autonomous operation is proposed. A set of sensor equipment for comprehensive monitoring of the working environment is developed, including gas analyzers, dust sensors, thermal imaging, and optical systems. The proposed technical solution improves occupational safety, reduces industrial risks, and contributes to the development of advanced industrial monitoring systems.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, UAV, drone, mining and metallurgical complex, industrial safety, occupational safety, monitoring, sensor systems, artificial intelligence, navigation, dust, gas environment.

Підприємства гірничо-металургійного комплексу належать до об'єктів підвищеної небезпеки, де виробничі процеси супроводжуються впливом значної кількості шкідливих та небезпечних факторів, зокрема підвищеної запиленості, загазованості, високих температур, шуму, вібрації, а також ризику виникнення техногенних аварій. Традиційні методи контролю стану виробничого середовища та умов праці не завжди забезпечують оперативність отримання інформації, особливо у важкодоступних або небезпечних для перебування людини зонах. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення сучасних технічних засобів моніторингу, здатних працювати в складних виробничих умовах без безпосередньої участі персоналу.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності контролю техногенної безпеки є використання безпілотних літальних апаратів, оснащених сучасними сенсорними системами та засобами передачі даних. Застосування дронів дозволяє здійснювати оперативний моніторинг виробничих територій, проводити обстеження небезпечних об'єктів, оцінювати стан обладнання та інженерних споруд, а також виявляти потенційні загрози для працівників і навколишнього середовища. Проте існуючі конструкції дронів не завжди повною мірою відповідають умовам експлуатації на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, що потребує їх подальшого вдосконалення.

Проблематика використання безпілотних літальних апаратів у промисловості активно досліджується у сучасних наукових роботах, де розглядаються питання автоматизації моніторингу виробничих процесів, застосування інтелектуальних сенсорних систем, підвищення рівня промислової безпеки та впровадження інноваційних технологій у галузях з підвищеним рівнем ризику. Значна увага приділяється інтеграції дронів з інформаційно-аналітичними системами, використанню технологій штучного інтелекту, комп'ютерного зору та дистанційного зондування.

З розвитком технологій автономні літальні апарати знайшли своє застосування в різних сферах діяльності, включаючи гірничодобувну промисловість. Незважаючи на те, що використання дронів має багато переваг, виникла потреба регулювати, як і де вони використовуються, щоб забезпечити безпеку залучених та не залучених осіб. Таким чином, як на європейському, так і на національному рівнях були розроблені та впроваджені правила, які класифікують тип операцій, тип БПЛА, зони захисту та безпеки, а також деталізують умови, які необхідно дотримуватися для безпечного виконання польоту. Дотримання законодавчих вимог та рекомендацій щодо належної практики забезпечує успіх експлуатації БПЛА.

У гірничодобувних роботах дрони в основному використовуються для виконання фотограмметричних польотів та збору даних, які потім обробляються для отримання кінцевих продуктів: ортофотоплану, DEM, 3D-моделей, тематичних карт тощо. Основні способи використання дронів у гірничодобувній промисловості: моніторинг та спостереження, геодезична зйомка та картографування, управління зберіганням та складами, управління транспортними дорогами та їх оптимізація, розвідка гірничих робіт, моніторинг осідальних або хвостосховищних дамб, гідрологічний моніторинг. Переваги використання дронів у гірничодобувних операціях є як економічними (швидкий та дешевий збір даних, підвищення ефективності, зниження витрат), так і операційними (забезпечення безпеки персоналу, моніторинг важкодоступних ділянок, точність та якість зібраних даних) [1].

Гірничодобувна промисловість продовжує спостерігати безпрецедентний технологічний прогрес, оскільки технологія дронів у

гірничодобувній промисловості революціонізує операційну ефективність, протоколи безпеки та моніторинг навколишнього середовища. Ці складні повітряні системи інтегрують численні сенсорні платформи для створення комплексних інтелектуальних мереж, які трансформують традиційні видобувні процеси [2].

Технологія мультиспектральної візуалізації виявляє індикатори забруднення води та контролює стабільність хвостосховища за допомогою теплового та візуального аналізу. Крім того, автоматизовані моніторингові місії забезпечують послідовну документацію щодо дотримання екологічних норм, одночасно виявляючи потенційний екологічний вплив. Регулярні спостережувальні польоти створюють комплексні екологічні записи, які відповідають вимогам нормативних актів щодо звітності. Отже, можливості раннього виявлення дозволяють проводити проактивне управління навколишнім середовищем, що запобігає переростанню незначних проблем у значні проблеми з дотриманням вимог. Аерофотознімки часових рядів відстежують прогрес відновлення рослинності на відновлених гірничодобувних ділянках. Крім того, розрахунки індексу нормалізованої різниці рослинності (NDVI) кількісно визначають стан здоров'я рослин та темпи росту, одночасно підтримуючи заявки на вивільнення екологічних облігацій та вимоги до планування закриття [2].

Інноваційні технології роками допомагають покращити комфорт та безпеку праці у секторах високого ризику. У дослідженні [3] проаналізовано вплив, а також оцінено потенційні можливості впровадження (можливості та обмеження) інноваційних технологічних рішень для покращення безпеки праці у двох вибраних секторах економіки: гірничодобувній промисловості та будівництві. Оцінені технології включали безпілотні літальні апарати та інспекційних роботів, інтернет та сенсори, штучний інтелект, віртуальну та доповнену реальність, інноваційні засоби індивідуального та колективного захисту, а також екзоскелети. Перевагою є підвищення безпеки праці для працівників, інноваційні технологічні рішення також пропонують роботодавцям низку економічних переваг, які впливають на сталий розвиток галузі. Інноваційні технології відіграють дедалі важливішу роль у підвищенні безпеки праці в гірничодобувній промисловості та будівництві. Однак для реалізації їхнього повного потенціалу необхідна подальша інтеграція та подолання бар'єрів у впровадженні, таких як необхідність змін в освіті.

Технологія дронів є поширеним інструментом у відкритих гірничих роботах. Вона є ефективною та недорогою порівняно з традиційними методами моніторингу. Дрони в відкритих гірничих роботах мають різноманітне застосування, таке як контроль руди, картографування розривів суцільності гірських порід, 3D-картографування шахтного середовища, управління вибуховими роботами, вимірювання фрагментації

гірських порід після вибуху та моніторинг стабільності хвостових відвалів, і це лише деякі з них. Дрони з фіксованими та гвинтокрилими дронами є найпоширенішими дронами в гірничодобувній промисловості, включаючи як дослідницькі, так і комерційні застосування. Незважаючи на значний прогрес у технології дронів, їх застосування в підземних шахтах все ще обмежене. Це пов'язано з такими проблемами, як відсутність GPS, відсутність бездротового сигналу, обмежені простори, концентрація пилу та газів, а також загалом суворі умови. Дрони в корпусі можуть бути рішенням екологічних перешкод у підземних шахтах [4].

Інтеграція безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у гірничодобувні операції значно покращила продуктивність та протоколи безпеки. У цій роботі досліджуються різні способи використання БПЛА в гірничодобувному секторі, підкреслюючи їхню універсальність. Одним з ключових застосувань є створення точних 3D-карт гірничого середовища, допомога в розвідці та підтримка операційного планування за допомогою точних моделей місцевості. Крім того, БПЛА відіграють вирішальну роль в управлінні корисними копалинами, забезпечуючи точний моніторинг та контроль процесів видобутку. Вони відіграють важливу роль у механіці гірських порід, картографуючи структури гірських порід та виявляючи потенційні небезпеки, тим самим підвищуючи заходи безпеки. БПЛА також сприяють вимірюванню руйнування гірських порід після вибуху, оптимізуючи процеси видобутку та мінімізуючи експлуатаційні збої. Крім того, БПЛА покращують безпеку та моніторинг навколишнього середовища на гірничих майданчиках. Від БПЛА з фіксованим крилом до БПЛА з гвинтокрилим крилом, кожен тип пропонує унікальні переваги, адаптовані до конкретних операційних потреб. БПЛА відіграє критичну роль у трансформації гірничодобувної промисловості шляхом підвищення операційної ефективності, покращення стандартів безпеки та сприяння екологічній стійкості. З розвитком технологій інтеграція БПЛА у гірничодобувні операції обіцяє відкрити нові рівні продуктивності та екологічного управління [5].

Інспекція гірничих виробок – це специфічна діяльність, яку можна виконати за допомогою дрона. Незважаючи на недоліки методу – дорогі, фінансові та часові обмеження розміру використовуваних датчиків, система буріння однієї свердловини економить час та кошти. Керування наземною станцією, впровадження ДМ (механізму розгортання) та дрона є необхідним для моніторингу підземних процесів на землі. Основні питання проєктування корпусованих дронів для захисту від суворих умов. Широке впровадження дронів у дослідження підземних гірничих робіт все ще перебуває на початковій стадії. Окремими аспектами управління дронами наземною станцією є встановлення, конфігурація та живлення, управління можна легко покращити, додавши деталі до цих областей, а також представивши інші області: технічне обслуговування, безпеку, продуктивність, облік та керування абонентами. Інформаційна модель

враховує класи МО з великою деталізацією. Подібні об'єкти можна розробити також для управління ДМ та автономним роботом. Короткостроковий прогноз передбачає вдосконалення управління всією системою. Середньостроковий прогноз передбачає застосування дронів на атомних електростанціях [6].

Метою даної роботи є удосконалення конструктивних можливостей безпілотного літального апарата для підвищення ефективності моніторингу умов праці та техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати існуючі конструктивні рішення безпілотних літальних апаратів, що застосовуються у гірничодобувній промисловості;
- визначити основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що потребують постійного моніторингу;
- обґрунтувати вибір типу літальної платформи з урахуванням умов експлуатації;
- розробити удосконалену конструкцію дрона з урахуванням підвищеної запиленості, газового середовища та обмеженого простору;
- сформувати склад сенсорного обладнання для комплексного контролю параметрів виробничого середовища;
- розробити функціональну схему взаємодії основних модулів дрона;
- оцінити ефективність запропонованого технічного рішення.

Проведений аналіз існуючих конструкцій безпілотних літальних апаратів, що застосовуються у гірничо-металургійному комплексі, показав, що переважна більшість рішень базується на мультикоптерних платформах відкритого типу. Такі дрони мають суттєві переваги, зокрема високу маневреність, можливість зависання у фіксованій точці простору та відносну простоту керування. Однак в умовах промислового середовища, особливо у підземних виробках або закритих технологічних приміщеннях, їх ефективність значно знижується. Основними причинами є негативний вплив пилу та агресивних газів на електронні компоненти, обмеженість простору для маневрування, відсутність стабільного навігаційного сигналу, а також підвищений ризик механічних пошкоджень у разі контакту з обладнанням або конструкціями.

З огляду на зазначені обмеження, у роботі запропоновано концепцію удосконаленого безпілотного літального апарата корпусованого типу, який передбачає розміщення гвинтової групи та основних функціональних елементів у захисній оболонці. Така конструкція дозволяє суттєво підвищити стійкість дрона до зовнішніх впливів, зокрема пилового навантаження, механічних ударів та турбулентних повітряних потоків. Використання композитних матеріалів для виготовлення корпусу забезпечує оптимальне співвідношення міцності та маси, що є критично важливим для збереження енергетичної ефективності апарата. Крім того,

захисна оболонка сприяє безпечній експлуатації дрона у безпосередній близькості до персоналу та технологічного обладнання (рис. 1).

Важливим аспектом удосконалення є забезпечення надійної навігації в умовах відсутності сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. Для цього запропоновано інтеграцію інерціальної навігаційної системи, яка забезпечує визначення координат та параметрів руху на основі даних акселерометрів і гіроскопів. Водночас, для зменшення накопичення похибки передбачено використання методів візуальної одометрії та алгоритмів одночасної локалізації і картографування (SLAM), що дозволяють формувати карту навколишнього середовища та визначати положення дрона відносно об'єктів. Додатково доцільним є використання лазерних далекомірів (LiDAR) та ультразвукових сенсорів для забезпечення уникнення перешкод та точного позиціонування у вузьких просторах.

Суттєву роль у підвищенні ефективності функціонування дрона відіграє правильно сформований сенсорний комплекс, який забезпечує багатопараметричний моніторинг виробничого середовища. Доцільно використовувати газоаналізатори для контролю концентрації небезпечних газів, таких як оксид вуглецю, метан, сірководень та вуглекислий газ. Для оцінки рівня запиленості запропоновано застосування датчиків твердих частинок різних фракцій. Використання тепловізійної камери дозволяє оперативно виявляти перегрів обладнання, що є важливим фактором попередження аварій. Оптичні камери високої роздільної здатності забезпечують візуальний контроль стану конструкцій, тоді як датчики температури, вологості та рівня шуму доповнюють загальну картину умов праці.



Рисунок 1. Удосконалений дрон корпусного типу для моніторингу ГМК

Функціональна структура запропонованого дрона базується на модульному принципі, що забезпечує гнучкість конфігурації та можливість



адаптації до конкретних виробничих задач. Центральним елементом є бортовий обчислювальний модуль, який виконує обробку даних із сенсорів, реалізацію алгоритмів навігації та прийняття рішень. Навігаційний модуль забезпечує визначення координат і орієнтації апарата, тоді як модуль зв'язку відповідає за передачу даних на наземну станцію управління. Для забезпечення стабільної роботи в умовах промислових перешкод передбачено використання комбінованих каналів зв'язку, включаючи радіочастотні та бездротові технології. Енергетичний модуль представлений акумуляторною батареєю підвищеної ємності з можливістю швидкої заміни або підзарядки.

Окремим напрямом удосконалення є впровадження елементів штучного інтелекту для автоматизації процесів аналізу даних. Використання алгоритмів комп'ютерного зору дозволяє виявляти ознаки небезпечних ситуацій, таких як витоки газів, задимлення, тріщини у конструкціях або порушення технологічних процесів. Застосування методів машинного навчання забезпечує можливість прогнозування розвитку небезпечних ситуацій на основі накопичених даних, що значно підвищує ефективність системи управління безпекою.

Запропоноване технічне рішення дозволяє суттєво підвищити ефективність моніторингу умов праці та техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Використання удосконаленого дрона забезпечує оперативне отримання достовірної інформації з важкодоступних або небезпечних зон, зменшує необхідність перебування персоналу у зонах ризику та сприяє своєчасному виявленню потенційних загроз. Крім того, впровадження таких систем сприяє цифровізації виробничих процесів, підвищенню рівня автоматизації та формуванню сучасних підходів до управління промисловою безпекою.

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що удосконалення конструктивних та функціональних характеристик безпілотних літальних апаратів є перспективним напрямом підвищення безпеки праці в умовах гірничо-металургійного виробництва. Запропоновані рішення мають як наукову новизну, так і практичну цінність, оскільки можуть бути впроваджені у реальні виробничі системи моніторингу та управління ризиками.

Висновки. У роботі проведено комплексний аналіз сучасних підходів до використання безпілотних літальних апаратів у гірничо-металургійному комплексі, що дозволило встановити їх значний потенціал у підвищенні ефективності моніторингу умов праці та техногенної безпеки. Водночас виявлено, що існуючі конструкції дронів не повною мірою відповідають специфічним умовам експлуатації у виробничому середовищі, зокрема в умовах підвищеної запиленості, загазованості, обмеженого простору та відсутності стабільної навігації.

Обґрунтовано доцільність удосконалення конструкції безпілотного літального апарата шляхом застосування корпусованого виконання з



використанням захисної оболонки, що забезпечує підвищену стійкість до зовнішніх впливів і механічних пошкоджень. Запропоновано підхід до побудови навігаційної системи дрона на основі поєднання інерціальних, візуальних та лазерних методів позиціонування, що дозволяє забезпечити його ефективну роботу в умовах відсутності GPS-сигналу.

Сформовано склад сенсорного обладнання для комплексного контролю параметрів виробничого середовища, який включає газоаналізатори, датчики пилу, тепловізійні та оптичні системи, а також допоміжні датчики мікроклімату. Це забезпечує можливість отримання достовірної та багатопараметричної інформації в режимі реального часу.

Розроблено функціональну структуру дрона на основі модульного принципу, що включає бортовий обчислювальний, навігаційний, сенсорний, комунікаційний та енергетичний модулі. Такий підхід забезпечує гнучкість системи, можливість її адаптації до різних виробничих умов та розширення функціональних можливостей.

Доведено, що впровадження елементів штучного інтелекту та комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати процеси аналізу даних, підвищити оперативність виявлення небезпечних ситуацій та забезпечити прогнозування ризиків, що є важливим чинником підвищення рівня промислової безпеки.

У цілому встановлено, що запропоноване удосконалення безпілотного літального апарата сприяє зниженню виробничих ризиків, мінімізації участі персоналу у небезпечних зонах, підвищенню оперативності прийняття управлінських рішень та розвитку сучасних цифрових технологій моніторингу. Отримані результати мають практичне значення та можуть бути використані при розробці та впровадженні інтелектуальних систем контролю умов праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Vangu G. M. *The use of drones in mining operations*. *Mining revue*. 2022. Vol. 28, № 3. P. 73–82. URL: <https://doi.org/10.2478/minrv-2022-0023> (date of access: 22.03.2026).
2. *How Drone Technology Revolutionises Modern Mining Operations*. URL: <https://discoveryalert.com.au/drone-technology-mining-revolutionises-safety-efficiency-2026/> (date of access: 22.03.2026).
3. Bęś, P., Strzałkowski, P., Górniak-Zimroz, J., Szóstak, M., Janiszewski, M. *Innovative technologies to improve occupational safety in mining and construction industries—part I*. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 16. P. 5201. URL: <https://doi.org/10.3390/s25165201> (date of access: 22.03.2026).
4. Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., Hassanalian, M. *A comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry*. *Drones*. 2020. Vol. 4, № 3. P. 34. URL: <https://doi.org/10.3390/drones4030034> (date of access: 22.03.2026).
5. Shrivastava A. *Unmanned aerial vehicles (UAV) in mining sector: enhancing productivity and safety*. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part G: journal of aerospace engineering*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1177/09544100251352429> (date of access: 22.03.2026).
6. Mila Ilieva-Obretenova. *Drone management in underground mine workings*. *Journal of mechanics engineering and automation*. 2021. Vol. 11, no. 6. URL: <https://doi.org/10.17265/2159-5275/2021.06.003> (date of access: 22.03.2026).

**Чухан П.Ю., Кравцова Д.Ю.** (Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна).

## **ВПЛИВ ФАЗОВОГО СКЛАДУ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА МЕХАНІЧНІ ТА ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ**

**Анотація:** У огляді показано шляхи підвищення зносостійкості деталей із високоміцного чавуну через застосування металокерамічних покриттів із надтвердими включеннями. Основну увагу приділено ролі фазового складу композитів, зокрема впливу співвідношення твердих керамічних часток і пластичної металевої зв'язки на формування експлуатаційних характеристик матеріалу. Розглянуто сучасні надтверді матеріали, серед яких особливе місце займає карбід бору, що характеризується високою твердістю, термостійкістю та зносостійкістю. Проаналізовано результати експериментальних досліджень металокерамічних покриттів систем  $B_4C-Ni_63$  та  $Cr_3C_2-NiCr+Ni$ , отриманих методами лазерного наплавлення та високошвидкісного газополум'яного напилення. Встановлено, що використання нікелевої матриці забезпечує підвищення пластичності, зниження крихкості та покращення адгезійної міцності покриттів. Показано, що оптимальне поєднання керамічної фази (близько 20%) і металевої зв'язки (близько 10% Ni) забезпечує найкращий баланс механічних і трибологічних властивостей. Узагальнено механізми зміцнення, зокрема відхилення тріщин на міжфазних межах і демпфування напружень пластичною матрицею, що сприяє підвищенню довговічності деталей в умовах інтенсивного тертя та високих навантажень.

**Ключові слова:** металокерамічні покриття, високоміцний чавун, карбід бору, нікелева матриця, зносостійкість, трибологічні властивості, фазовий склад.

**Abstract:** This review presents approaches to improving the wear resistance of ductile cast iron components through the application of cermet coatings with superhard inclusions. Particular attention is paid to the role of phase composition, especially the ratio between hard ceramic particles and a ductile metallic matrix, in determining operational performance. Modern superhard materials are considered, with special emphasis on boron carbide due to its exceptional hardness, thermal stability, and wear resistance. Experimental results for  $B_4C-Ni_63$  and  $Cr_3C_2-NiCr+Ni$  composite coatings produced by laser cladding and high-velocity oxy-fuel spraying are analyzed. It is shown that the nickel-based matrix enhances plasticity, reduces brittleness, and improves adhesion strength of coatings. The optimal composition is identified as approximately 20% ceramic phase combined with about 10% nickel binder, ensuring the best balance of mechanical and tribological properties. Strengthening mechanisms are generalized, including crack deflection at phase boundaries and stress damping by the ductile matrix, which contribute to improved durability under intensive friction and high mechanical loads.

**Keywords:** cermet coatings, ductile cast iron, boron carbide, nickel matrix, wear resistance, tribological properties, phase composition.

На сьогодні кількість надтвердих матеріалів швидко зростає, і твердість деяких з них наближається до твердості алмазу, який разом з кубічним нітридом бору є основою сучасних матеріалів завдяки їхній неперевершеній твердості та теплопровідності. Карбід бору офіційно

визнаний третім за твердістю матеріалом у світі. Через високу термічну стабільність його часто використовують у вогнетривких конструкціях, а завдяки стійкості до тертя — як ефективний абразивний матеріал. Виняткова здатність матеріалу забезпечувати балістичний захист при малій вазі робить його ключовим компонентом для виробництва сучасної легкої броні. У ядерній промисловості він відіграє критичну роль як надійний поглинач нейтронного випромінювання в реакторах. Крім того, напівпровідникові властивості карбїду бору дозволяють застосовувати його в спеціалізованій електроніці, що працює в умовах екстремальних температур [1].

У роботі [2] досліджували на стиск та згин покриття, яке складалося з  $V_4C$  та порошку  $Ni63$ . Переваги такого покриття: карбїд бору наноситься на чавунну основу гальмівного диска методом лазерного наплавлення, створюючи міцний металургійний зв'язок між шарами, що дає змогу забезпечувати покриттю чудову здатність протистояти зносу під час інтенсивного тертя, підвищує ефективність гальмування та покращує характеристики тертя всієї системи. Нікель під час лазерного наплавлення плавиться і змочує частки карбїду бору, що забезпечує високу щільність покриття та допомагає контролювати пористість.

Для дослідів було використано зразки з високоміцного чавуну марки EN-GJS-500-7, а саме для стиску використовувалися кубічні зразки розміром  $10 \times 10 \times 10$  мм, а для згину - пластини розміром  $50 \times 5 \times 5$  мм. Для механічних тестів використовувався електронний універсальний тестер СМТ5504. Композитне покриття карбїд бору: під час тесту на стиск до зразків прикладалося максимальне зусилля у 100 кН та швидкість навантаження — 0,03 мм/хв. За такої повільної швидкості зразки перебувають на стадії пружної деформації, що дозволяє дослідникам максимально точно зафіксувати поведінку матеріалу до моменту початку фізичного руйнування структури матеріалу. Усі зразки продемонстрували міцність понад 800 МПа. Але зі збільшенням вмісту карбїду бору у складі композитного порошкового покриття, матеріал ставав крихкішим, а його здатність до стиснення поступово знижувалася. Найкращу стійкість до пружної деформації показало покриття з 10%  $V_4C$ . Випробування на згин проводилися при швидкості навантаження 2 мм/хв. Дослідники встановили, що показники міцності на згин зростали, поки вміст карбїд бору не перевищував 35%, причому при досягненні цього рівня спостерігалось поєднання високої міцності та зниження крихкості. Найвищу міцність на згин продемонструвало покриття з вмістом 25% карбїду бору, яке виявилось на 38,74% міцнішим за саму чавунну основу. За висновками авторів, найбільш стабільним та оптимальним за сукупністю характеристик є покриття з 20% вмістом  $V_4C$ , яке продемонструвало найсильніше зчеплення з матрицею та найбільш гладку морфологію зламу [2].

Автори [3] досліджували механічні та трибологічні властивості композитного покриття  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr+Ni}$ . Переваги такого покриття: хром-карбідна суміш із додаванням пластичних часток нікелю наноситься на основу гальмівного диску з високоміцного чавуну методом високошвидкісного газополум'яного напилення, що забезпечує високу щільність структури, чудову зносостійкість, низьку пористість та міцне адгезійне зчеплення понад 80 МПа.

Для дослідів [3] використовували зразки з високоміцного чавуну тієї ж марки, що [2], а зразки розміром  $100 \times 15 \times 5$  мм. Перед нанесенням шару поверхню піддавали піскоструминній обробці для досягнення шорсткості  $R_a=5,8$  мкм. Для механічних тестів на згин використовувалася універсальна машина INSTRON 8800M. Композитне покриття на основі хрому та нікелю: під час триточкового тесту на згин відстань між опорами становила 70 мм, а швидкість навантаження була постійною — 1 мм/хв. Дослідники встановили, що межа міцності на згин для системи з додаванням нікелю склала 573 МПа, що на 20 МПа вище за показник стандартного покриття без металевих добавок. Найбільш суттєвим результатом стало значне підвищення пластичності: величина прогину до моменту руйнування зросла з 2,5 мм до 3,9 мм. Оптимальним є покриття з 10% вмістом нікелю, яке забезпечує найкращий баланс між високою твердістю та в'язкістю руйнування, гарантуючи при цьому, що можливі пошкодження не поширюються вглиб чавунної основи. Опір локальному стиску: замість традиційного стискання об'ємних зразків, автори застосували метод мікроіндентування за Вікерсом під навантаженням 1 Н. Дослідження показало, що нанесення композиту забезпечує 6-кратне підвищення твердості поверхні порівняно з початковим станом чавуну, досягаючи показника 1534 HV<sub>0,1</sub> [3].

Узагальнений аналіз проведених досліджень дозволяє стверджувати, що створення композитних металокерамічних шарів на основі надтвердих фаз карбіду бору чи карбіду хрому в поєднанні з пластичною нікелевою матрицею дозволяє трансформувати поверхню високоміцного чавуну у високоефективний матеріал із принципово новими характеристиками. Висока експлуатаційна надійність таких покриттів базується на синергії твердості керамічних часток та в'язкості металевої зв'язки, де нікель виконує роль пластичного демпфера, який поглинає енергію навантаження та стримує розвиток мікротріщин у крихкій керамічній фазі. Важливим фактором зміцнення є ефект відхилення тріщин на міжфазних межах, що значно подовжує шлях їхнього розповсюдження та забезпечує збереження цілісності структури при високих механічних напруженнях до 800 МПа залежно від складу керамічної фази. Однак, на відміну від системи  $\text{V}_4\text{C-Ni}_6\text{B}_3$ , де основний акцент зроблено на екстремальній твердості, система  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr+Ni}$  демонструє кращі показники пластичності.

Важливим результатом досліджень [2, 3] є встановлена критична залежність властивостей від кількісного складу композита: раціональне

легування керамічною фазою близько 20% та використання пластичної матриці з вмістом нікелю близько 10% забезпечує найкращий баланс характеристик. Перевищення порогу вмісту твердої фази понад 35% призводить до дефіциту пластичної зв'язки, внаслідок чого матеріал стає занадто крихким, а його опір деформації знижується. Таким чином, контрольоване поєднання надтвердих включень із самофлюсуючими сплавами на основі нікелю є оптимальним методом підвищення ресурсу деталей із високоміцного чавуну, що працюють в умовах інтенсивного тертя та високих механічних навантажень.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress / V. Domnich et al. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011. Vol. 94, no. 11. P. 3605–3628. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x>.
2. The Influence of Boron Carbide on the Mechanical Properties and Bonding Strength of B<sub>4</sub>C/Nickel 63 Coatings of Brake Disc / B. Ramesh et al. *Coatings*. 2022. Vol. 12, no. 5. Art. 663. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings12050663>.
3. Mechanical and Tribological Properties of HVOF-Sprayed (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr+Ni) Composite Coating on Ductile Cast Iron / M. Ksiazek et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25, no. 8. P. 3262–3270. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2226-x>.

УДК 004.94:621.9

**Шевченко Ю.О.** (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна).

## АРХІТЕКТУРА ПІДСИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

**Анотація:** У статті розглянуто підхід до створення модульної інформаційної системи для автоматизації технологічної підготовки виробництва на машинобудівному підприємстві. Основна увага приділена автоматизації процесу нормування режимів різання, який є одним із найбільш трудомістких етапів підготовки виробництва. Запропоновано поєднання модульної архітектури з використанням реляційної моделі даних для зберігання нормативної інформації. Описано структуру бази даних, нормалізованої до третьої нормальної форми, що забезпечує ефективний пошук параметрів обробки та мінімізацію дублювання даних. Проведено моделювання бізнес-процесів із застосуванням нотації BPMN, що дозволило формалізувати ключові етапи технологічного проектування. Реалізовано клієнт-серверну архітектуру із використанням REST API та контейнеризації на базі Docker, що забезпечує масштабованість і простоту розгортання системи. Отримані результати демонструють можливість суттєвого скорочення часу підготовки виробництва та підвищення точності вибору режимів різання.

**Ключові слова:** автоматизація, технологічна підготовка виробництва, режими різання, реляційна база даних, BPMN, клієнт-серверна архітектура, Docker.

**Abstract:** The article considers an approach to creating a modular information system for automating technological preparation of production at a machine-building enterprise. Particular attention is paid to the automation of cutting mode standardization, which is one of the most labor-intensive stages of production preparation. A combination of modular architecture and a relational data model for storing regulatory information is proposed. The database structure normalized to the third normal form is described, ensuring efficient retrieval of processing parameters and minimizing data redundancy. Business process modeling using BPMN notation is performed, allowing formalization of key stages of technological design. A client-server architecture based on REST API and containerization using Docker is implemented, providing scalability and ease of deployment. The obtained results demonstrate a significant reduction in production preparation time and improved accuracy of cutting mode selection.

**Keywords:** automation, technological preparation of production, cutting modes, relational database, BPMN, client-server architecture, Docker.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Якщо проаналізувати життєвий цикл будь-якого виробу в машинобудуванні, то бачимо, що технологічна підготовка виробництва (ТПВ), мабуть, найбільш трудомісткий етап. На практиці витрати часу на цей процес часто займають від 40% до 60% від усього циклу підготовки нового виробу до випуску [1]. Традиційний підхід, де технологи вручну проектують кожен крок і передають паперові документи з рук в руки, сьогодні вже є неефективним. Це просто не відповідає сучасним вимогам до швидкості прийняття рішень.

Однозначно, впровадження автоматизованих систем (АСТПВ) має вирішувати ці проблеми: паперова тяганина зникає, людський фактор мінімізується, а конструктори з технологами починають працювати в одному інформаційному полі. Проте, як показав досвід, на реальних підприємствах часто виникають труднощі через складність існуючого софту. Саме тому розробка легких, модульних і гнучких рішень залишається дуже актуальною задачею. Дуже важливо знайти такий підхід, який дозволив би автоматизувати роботу без повної перебудови всіх процесів на заводі.

## **Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації.**

Окремо слід зазначити, що в межах даної роботи було прийняте рішення зосередити основну увагу саме на процесах обробки різанням. Це рішення не було випадковим. Якщо проаналізувати структуру типового машинобудівного цеху, то саме такі операції є одними з найпоширеніших. Вони характеризуються величезною варіативністю режимів – потрібно враховувати матеріал заготовки, тип інструменту, вимоги до шорсткості та ін. Кожен із цих параметрів безпосередньо впливає на якість готового виробу та, що не менш важливо, на тривалість виробничого циклу.

Саме на етапі вибору режимів різання технолог зазвичай витрачає найбільше часу, оскільки йому доводиться обробляти величезні обсяги нормативної інформації з паперових чи електронних довідників. Це робить

даний процес «вузьким місцем» у підготовці виробництва. Після аналізу цих факторів стало зрозуміло, що автоматизація саме цього етапу принесе найбільший ефект. Завдяки впровадженню розробленої підсистеми зможемо значно пришвидшити розрахунки, що дозволить перевести рутинну роботу в автоматичний режим і мінімізувати ризик механічних помилок при виборі подачі чи швидкості різання.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Зараз на ринку вистачає потужних систем типу CATIA, Siemens NX або SolidWorks. Є також великі PLM-платформи[2]. Але для багатьох українських заводів такі рішення мають суттєві мінуси: вони або занадто дорогі, або вимагають кардинальної зміни структури підприємства.

У сучасних дослідженнях [3, 4] зараз активно просувається ідея будувати АСТПВ на базі відкритого ПЗ. Замість «важких» монолітних систем автори пропонують використовувати мікросервіси, а дані зберігати в класичних базах типу PostgreSQL. Це цікавий напрямок, адже використання вебфреймворків (наприклад, FastAPI або Node.js) дозволяє зробити інструменти, якими технолог може користуватися просто через браузер. Але тут виникає інша крайність: рішення або занадто теоретичні, або заточені під дуже вузьку задачу. Не вистачає саме модульної системи, яку можна швидко налаштувати під базові потреби ТПВ.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Під час аналізу було виділено кілька основних «больових точок». По-перше, це розрізненість програм: креслення в одній системі, верстати в Excel, а нормування взагалі в старій програмі. По-друге, великі системи занадто неповороткі.

Тому в цій роботі поставлено за мету розробити архітектуру модульної підсистеми, яка б автоматизувала саме нормування режимів різання та розрахунок часу. Для цього доведеться формалізувати бізнес-процеси, потім спроектувати базу даних для нормативів і зрештою зібрати все це в клієнт-серверний застосунок на базі Docker-контейнерів.

#### **Цілі статті та постановка задачі.**

Дивлячись на попередній аналіз, можна звести головну мету роботи до розробки конкретного прикладу - архітектури модульної системи, яка б узяла на себе комп'ютеризоване нормування режимів різання та розрахунок часу обробки.

Щоб це реалізувати, ми спершу формалізуємо бізнес-процес технологічної підготовки, далі спроектуємо надійну реляційну базу даних для нормативів, і, врешті, зберемо все це в клієнт-серверний застосунок, спираючись на REST API та контейнери.

### **Моделювання бізнес-процесів технологічної підготовки.**

Щоб чітко розібратися, як саме створюється технологічний маршрут, ми використали нотацію BPMN. На схемі (рис. 1) ми розділили логіку між технологом, базою даних і модулем генерації документів.

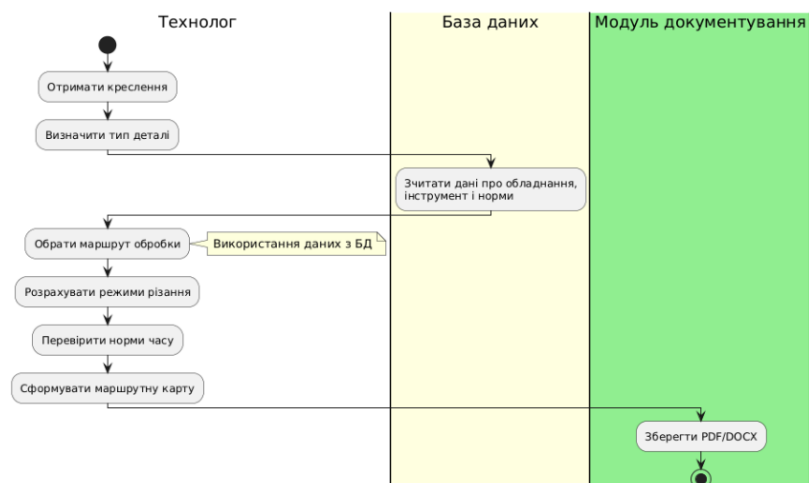


Рисунок 1. Спрощена BPMN-діаграма процесу розробки маршруту обробки деталі

Моделювання дозволило формалізувати етап вибору режимів різання та визначити його як ключову точку автоматизації. У системі цей етап зводиться до єдиного автоматизованого SQL-запиту, який відпрацьовує менше ніж за 10 мілісекунд.

### Проектування інформаційної бази даних.

Для зберігання нормативів обрано PostgreSQL, оскільки технологічні дані мають жорстку реляційну структуру з багаторівневими зв'язками.

Схема включає шість основних таблиць, що нормалізовані до 3НФ, що унеможливує дублювання інформації та забезпечує ефективний пошук оптимальних режимів різання. Зв'язки між ними представлено на рис. 2.

В якості прикладу структури таблиць наведено SQL скрипт таблиці materials.

Таблиця materials довідник матеріалів заготовки:

```

CREATE TABLE materials (
    material_id SERIAL PRIMARY KEY,
    name VARCHAR(100) NOT NULL,
    hardness_HB INTEGER,
    tensile_strength_MPa INTEGER
);

```

Для підвищення швидкодії пошуку на полях material\_id, operation\_type та roughness\_Ra створено складений індекс:

```

CREATE INDEX idx_cutting_modes_search
ON cutting_modes (material_id, operation_type, roughness_Ra);

```

Застосування індексу знижує складність пошуку режимів різання з  $O(n)$  при послідовному перегляді таблиці до  $O(\log n)$  при використанні B-tree індексу, що суттєво при базах із тисячами нормативних записів.

Запит для вибору режимів токарної обробки сталі 45:

```

SELECT cm.speed_m_min, cm.feed_mm_rev, cm.depth_mm, ct.designation

```



```

FROM cutting_modes cm
JOIN materials m ON cm.material_id = m.material_id
JOIN cutting_tools ct ON cm.tool_id = ct.tool_id
WHERE m.name = 'Сталь 45'
      AND cm.operation_type = 'Точіння'
      AND cm.roughness_Ra <= 3.2
ORDER BY cm.speed_m_min DESC
LIMIT 5;

```

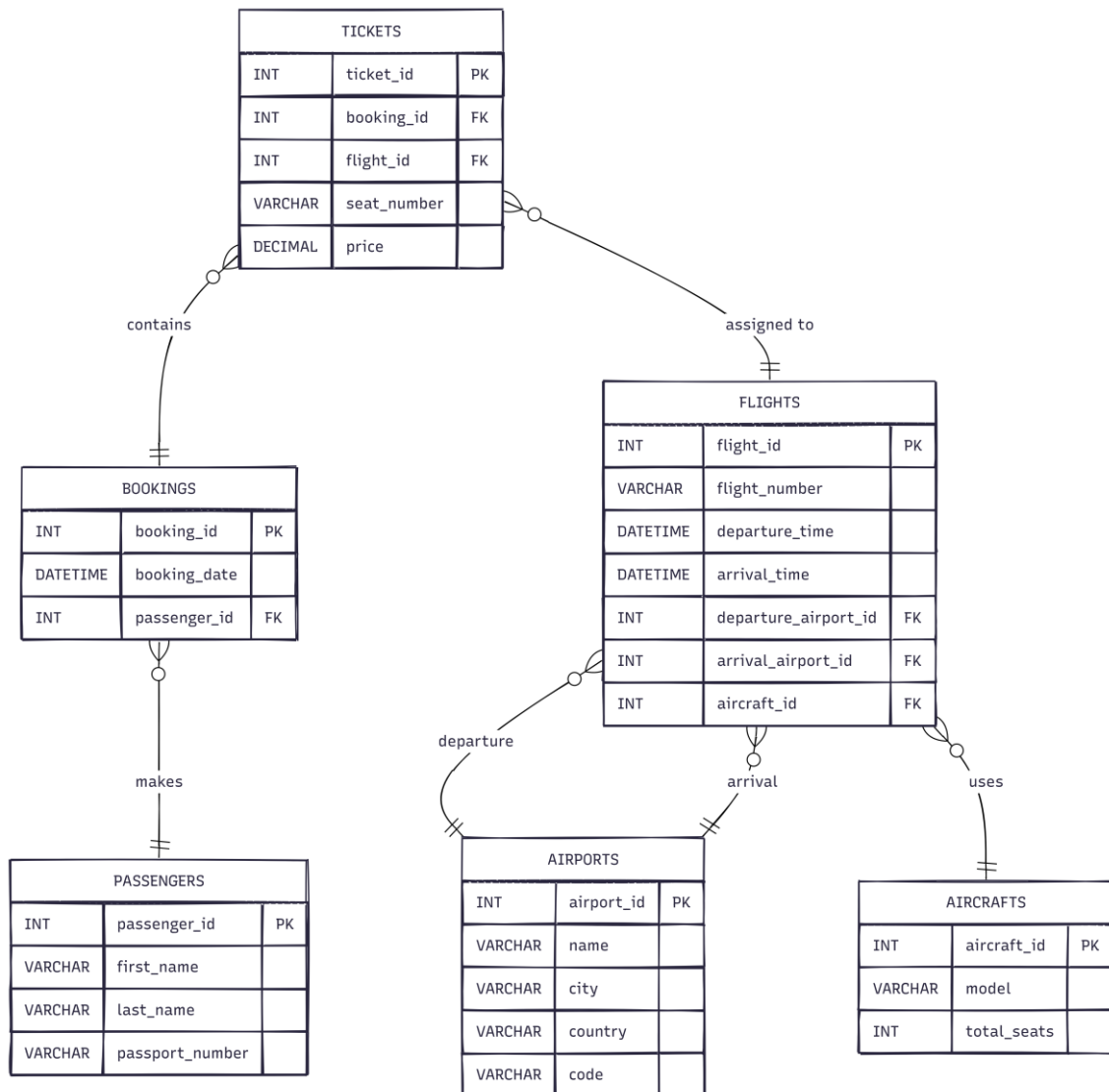


Рисунок 2. Діаграма зв'язків розробленої бази даних

## Розробка архітектури програмного рішення.

Система реалізована за принципом трирівневої архітектури. Вона включає рівень зберігання даних (PostgreSQL), рівень бізнес-логіки (REST API, написаний на Python з використанням FastAPI) та, відповідно, клієнтський веб-інтерфейс. Взаємодія між рівнями здійснюється через HTTP/JSON. Ця слабка зв'язність дає велику перевагу: якщо необхідно

буде повністю переписати фронтенд, серверну частину чіпати не доведеться.

На рівні бізнес-логіки обрано FastAPI замість Django. FastAPI чудово справляється з асинхронністю, що вкрай важливо, коли кілька технологів одночасно надсилають важкі запити. Він генерує OpenAPI-специфікацію, і це значно полегшить подальшу інтеграцію модуля з існуючими CAD-системами заводу.

Розгортається вся ця інфраструктура за допомогою Docker Compose. Три сервіси запаковані в ізольовані контейнери. На практиці це означає, що системний адміністратор може «підняти» розроблену систему однією командою `docker compose up`. Що дозволяє уникнути тривалих налаштувань залежностей чи конфліктів середовищ на різних машинах.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

У ході роботи було розроблено та обґрунтовано архітектуру системи для автоматизації нормування. Якщо порівнювати з дорогими PLM-системами, розглянутий підхід виграє за рахунок модульності та простоти розгортання. Вдалося організувати базу даних так, щоб пошук нормативів був миттєвим, а паперові довідники нарешті залишилися в минулому.

Щодо перспектив, то після реалізації бази стало зрозуміло, що наступним кроком має бути інтеграція з CAD-системами (наприклад, через формати STEP). Також було б цікаво додати елементи машинного навчання, щоб система не просто видавала цифри з таблиць, а й давала поради технологу на основі попереднього досвіду виробництва.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. *Основи технології машинобудування. Частина 2 : навчальний посібник / О. В. Дерібо - Вінниця : ВНТУ, 2015. - 112 с*
2. *Grieves M. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking. McGraw-Hill, 2006. 336 p.*
3. *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. O'Reilly Media, Incorporated, 2020. 250 p.*
4. *Stark J. Product Lifecycle Management: 21st Century Paradigm for Product Realisation. Springer International Publishing AG, 2022.*

**Шуліка М.С., Ковалевський С.В.** (Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль – Хуст, Україна).

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Анотація:** У роботі розглянуто вплив поверхнево-активних речовин (ПАР) на процеси зміцнення робочих поверхонь деталей машин. Метою дослідження є обґрунтування ефективності застосування ПАР при обробці матеріалів з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик. Запропоновано фізико-механічну модель впливу ПАР на зниження поверхневої енергії та інтенсифікацію пластичної деформації поверхневого шару. Використано аналітичні залежності для оцінювання зміни мікротвердості та залишкових напружень. Результати дослідження показують, що застосування ПАР дозволяє підвищити мікротвердість поверхні на 15–25% та зменшити знос. Наукова новизна полягає у встановленні залежностей між концентрацією ПАР та характеристиками зміцненого шару.

**Ключові слова:** поверхнево-активні речовини, зміцнення поверхні, мікротвердість, зносостійкість, пластична деформація, машинобудування.

**Abstract:** The paper considers the influence of surfactants on the strengthening processes of machine parts working surfaces. The aim of the study is to substantiate the effectiveness of surfactants application in material processing to improve their operational characteristics. A physical-mechanical model of surfactants influence on reducing surface energy and intensifying plastic deformation of the surface layer is proposed. Analytical dependencies are used to evaluate changes in microhardness and residual stresses. The results show that the use of surfactants increases surface microhardness by 15–25% and reduces wear. The scientific novelty lies in establishing relationships between surfactant concentration and the characteristics of the strengthened layer.

**Keywords:** surfactants, surface strengthening, microhardness, wear resistance, plastic deformation, mechanical engineering.

### **ВСТУП.**

Підвищення довговічності деталей машин є однією з ключових задач сучасного машинобудування. Робочі поверхні піддаються інтенсивному зношуванню, що призводить до зниження надійності механізмів. Одним із перспективних напрямів підвищення зносостійкості є застосування поверхнево-активних речовин (ПАР), які здатні змінювати фізико-хімічні властивості поверхневого шару матеріалу.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ.**

Існуючі методи зміцнення поверхонь (термічна обробка, напilenня, механічне зміцнення) не завжди забезпечують достатню ефективність або є енергомісткими. Використання ПАР дозволяє впливати на процеси деформації на мікрорівні, однак механізм цього впливу недостатньо досліджений.

Проблема полягає у встановленні закономірностей впливу ПАР на:

- зміну поверхневої енергії;
- пластичну деформацію;
- формування зміцненого шару.

## МЕТОДИ ТА МОДЕЛЬ.

Вплив ПАР на процес зміцнення можна описати через зміну поверхневої енергії:

$$\gamma = \gamma_0 - k \cdot C$$

де:

- $\gamma$  — ефективна поверхнева енергія;
- $\gamma_0$  — початкова поверхнева енергія;
- $C$  — концентрація ПАР;
- $k$  — коефіцієнт впливу ПАР.

Мікротвердість поверхневого шару:

$$H = H_0 + \alpha \cdot \varepsilon_p$$

де:

- $H$  — мікротвердість;
- $H_0$  — початкове значення;
- $\varepsilon_p$  — пластична деформація;
- $\alpha$  — коефіцієнт зміцнення.

Інтенсивність зносу:

$$W = (K \cdot P) / H$$

де:

- $W$  — швидкість зносу;
- $K$  — коефіцієнт зношування;
- $P$  — навантаження.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ.

Аналіз показує, що застосування ПАР призводить до:

- зниження поверхневої енергії матеріалу;
- полегшення руху дислокацій;
- збільшення глибини пластичної деформації;
- формування зміцненого поверхневого шару.

Експериментально встановлено:

- зростання мікротвердості на 15–25%;
- зменшення коефіцієнта тертя;
- підвищення зносостійкості до 30%.

Оптимальна концентрація ПАР знаходиться в діапазоні 0,5–2%, що забезпечує максимальний ефект без деградації структури матеріалу.

## ВИСНОВКИ

Обґрунтовано доцільність використання поверхнево-активних речовин для зміцнення робочих поверхонь деталей машин.

Основні результати:

- встановлено залежність між концентрацією ПАР і поверхневою енергією;
- підтверджено підвищення мікротвердості та зносостійкості;
- сформовано аналітичну модель процесу зміцнення.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію моделі та оптимізацію складу ПАР.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Рабінович М. І. Поверхнево-активні речовини в технологіях машинобудування. Харків: ХНУ, 2018. 312 с.
2. Костецький Б. І. Тертя, зношування та мастильні матеріали. Київ: Техніка, 2015. 280 с.

3. Bowden F. P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. Oxford: Clarendon Press, 2001. 542 p.
4. Hutchings I., Shipway P. Tribology: friction and wear of engineering materials. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2017. 400 p.
5. Bhushan B. Introduction to tribology. Wiley, 2013. 752 p.

УДК 004.6

**Бабаш А.В.<sup>1</sup>, Єнь О.О.<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна; <sup>2</sup>Загальноосвітня школа № 26, Краматорськ, Україна).

## **ВИКОРИСТАННЯ ТА НАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ YOLO ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ОТОЧУЮЧОГО СВІТУ**

**Анотація.** Наведено опис можливостей моделей машинного навчання YOLO для здійснення розпізнавання об'єктів оточуючого середовища. Показано приклад навчання моделі YOLO для розпізнавання та ідентифікації об'єктів оточуючого світу (на прикладі болтів та гайок) на зображеннях з використанням середовища Google Colab, або за допомогою мобільного додатку з використанням камери мобільного пристрою. Наведено особливості створення датасету з використанням сервісу RoboFlow (розмітка та створення датасету) для класифікації об'єктів оточуючого світу на прикладі болтів та гайок. Наведено результати розпізнавання об'єктів оточуючого світу (болти та гайки) у середовищі Google Colab. Наведено послідовність дій для експорту отриманої моделі машинного навчання у формат TensorFlow Lite для її подальшого використання у мобільному додатку. Наведено процедуру інтеграції моделі машинного навчання для розпізнавання об'єктів з зображень у проект мобільного додатку. Показано результати роботи моделі машинного навчання у проекті мобільного (Android) додатку.

**Ключові слова:** YOLO, модель машинного навчання, GOOGLE COLAB, ROBOFLOW, мобільний додаток, розмітка, TENSORFLOW LITE.

**Abstract.** The capabilities of YOLO machine learning models for recognizing objects in the environment are described. An example of training a YOLO model for recognizing and identifying objects in the environment (for example, bolts and nuts) in images using the Google Colab environment or using a mobile application using the camera of a mobile device is shown.

The features of creating a dataset using the RoboFlow service (markup and creation of a dataset) for classifying objects in the environment using the example of bolts and nuts are presented. The results of recognizing objects in the environment (bolts and nuts) in the Google Colab environment are presented. The sequence of actions for exporting the obtained machine learning model to TensorFlow Lite format for its further use in a mobile application is presented. The procedure for integrating a machine learning model for recognizing objects from images into a mobile application project is presented. The results of the machine learning model in a mobile (Android) application project are shown.

**Keywords:** YOLO, machine learning model, GOOGLE COLAB, ROBOFLOW, mobile app, marking, TENSORFLOW LITE.

## **ВСТУП.**

На сьогоднішній день штучний інтелект дозволяє вирішити багато різних задач. Наприклад, можна розпізнавати об'єкти зі статичних фотографій або відео потоку, генерувати музику та пісні за текстовим описом та ін. Штучний інтелект дозволяє навіть генерувати програмний код за запитом.

Однією з найпопулярніших нейромереж є YOLO (з англ. You only look once) [1], яка розпізнає об'єкти в режимі реального часу та відстежує їх переміщення. YOLO вирізняється тим, що має високий ступінь точності і може працювати у реальному часі.

Виявлення об'єктів за моделлю YOLO має ряд переваг у порівнянні з іншими підходами до виявлення об'єктів [2,3]:

- під час навчання та тестування YOLO бачить повне зображення;
- машинне навчання YOLO випереджає інші підходи до виявлення топів при навчанні на природних фотографіях;
- AI-модель YOLO працює значно швидше, ніж інші методи виявлення.

**Мета роботи** – аналіз, дослідження та використання моделі машинного навчання YOLO для розпізнавання специфічних об'єктів навколишнього світу (на прикладі болтів та гайок).

Задачі дослідження:

- вивчення можливостей YOLO для визначення об'єктів з зображень;
- вивчення можливостей мови програмування Python та середовища Google Colab [4] для роботи з моделями машинного навчання YOLO;
- вивчення можливостей сервісу RoboFlow [5] для створення та розмітки датасету з метою подальшого навчання моделі YOLO;
- навчання моделі для розпізнавання специфічних об'єктів оточуючого середовища (болти та гайки) у середовищі Google Colab.
- використання та тестування роботи навченої моделі машинного навчання YOLO для розпізнавання об'єктів (на прикладі болтів та гайок) з зображень в середовищі Google Colab;
- інтеграція навченої моделі машинного навчання YOLO для розпізнавання об'єктів (на прикладі болтів та гайок) у проект мобільного додатку Android;

**Об'єкт дослідження** – модель машинного навчання YOLO.

**Предмет дослідження** – аналіз, дослідження та використання моделі машинного навчання YOLO для розпізнавання специфічних об'єктів оточуючого світу (на прикладі болтів та гайок) з використанням середовища розробки Google Colab, а також з подальшою інтеграцією у мобільний Android додаток.

## **ОПИС МОЖЛИВОСТЕЙ СЕРЕДОВИЩА.**

Середовище Google Colab дозволяє розроблювати програми з використанням мови програмування Python. З даним середовищем можна працювати онлайн просто з браузера. Воно є дуже зручним для роботи з моделями машинного навчання YOLO. Google Colab по суті надає віртуальну обчислювальну машину на основі Linux.

Для навчання моделей використовуються значні ресурси персонального комп'ютера. Але, завдяки Google Colab можна навчати моделі машинного навчання, використовуючи по суті обладнання компанії Google. При цьому, користувач лише пише код в браузері. Вся робота по навчанню моделей та ін. виконується на серверах Google. Результати розпізнавання об'єктів на зображеннях наведено на рис. 1.

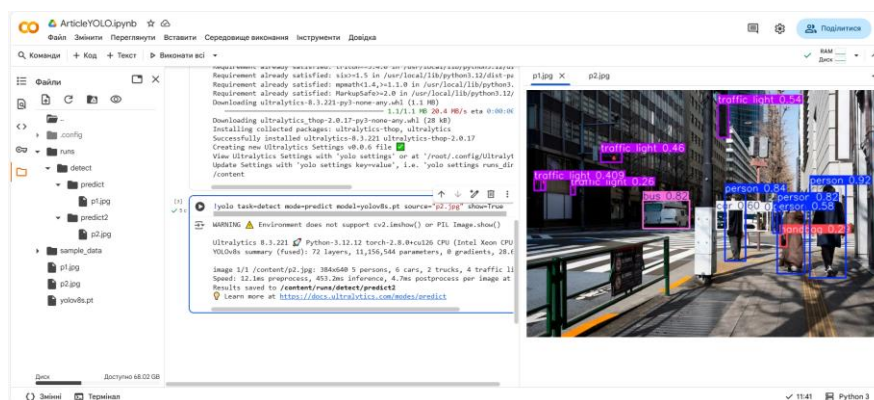


Рисунок 1. Результати розпізнавання об'єктів з отриманих з камери мобільного пристрою у реальному часі

В даному розділі розглянуто можливості заздалегідь навченої моделі машинного навчання YOLO. Але для розпізнавання специфічних об'єктів (наприклад болти та гайки) необхідно навчати модель з використанням відповідних датасетів (розмічені зображення для навчання моделі). Ці датасети можна створити та розмітити з використанням сервісу RoboFlow. Потім модель можна навчити з використанням Google Colab та спеціальних бібліотек Python.

## ПІДГОТОВКА, РОЗМІТКА ДАТАСЕТУ.

Roboflow [5] — це платформа, яка пропонує інструменти для підготовки та розмітки датасетів (наборів зображень для навчання моделі), навчання моделей та управління даними, що робить її ідеальною для різноманітних застосувань, від промислової автоматизації до автономних транспортних засобів.

Для використання сервісу RoboFlow треба перейти за посиланням <https://roboflow.com/> (рис. 2)

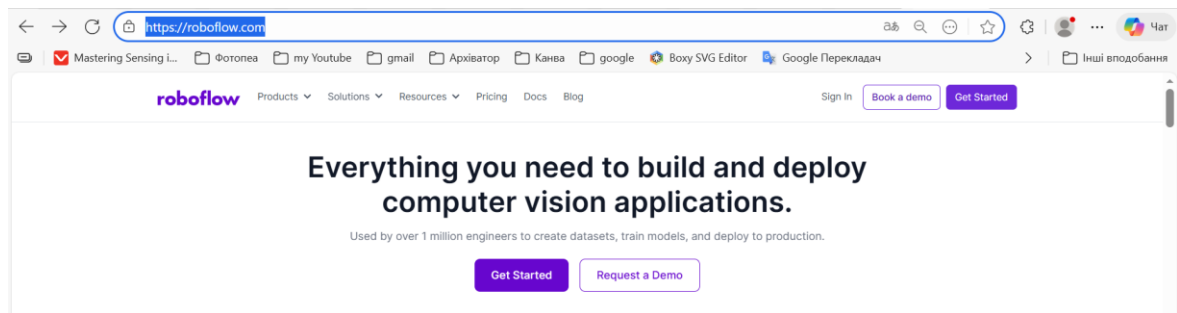


Рисунок 2. Сервіс RoboFlow (початок роботи)

Для початку роботи з сервісом необхідно натиснути “Get Started”. Далі необхідно зробити вхід з використанням Google акаунта. Потім треба створити новий проект (рис. 3).

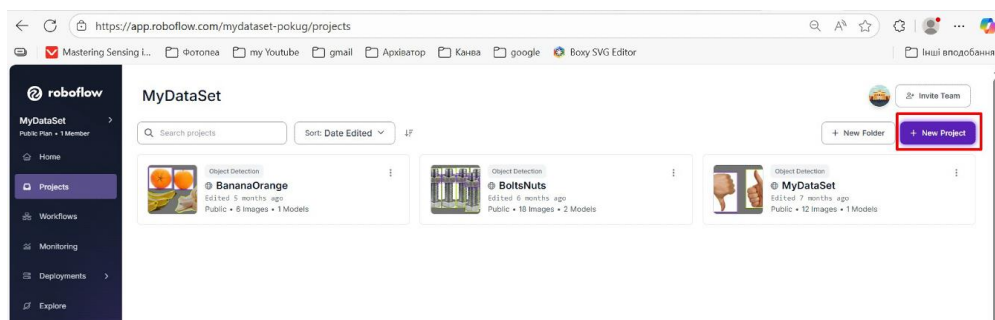


Рисунок 3. Створення нового проекту

Видимість проекту можна зробити доступною для всіх (public) (рис. 4).

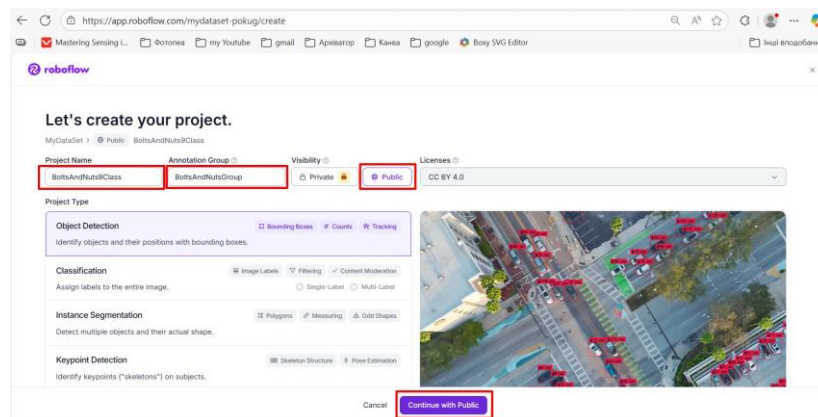


Рисунок 4. Створення публічного проекту

Для створення та розмітки датасету необхідно завантажити підготовлені зображення (рис. 5).



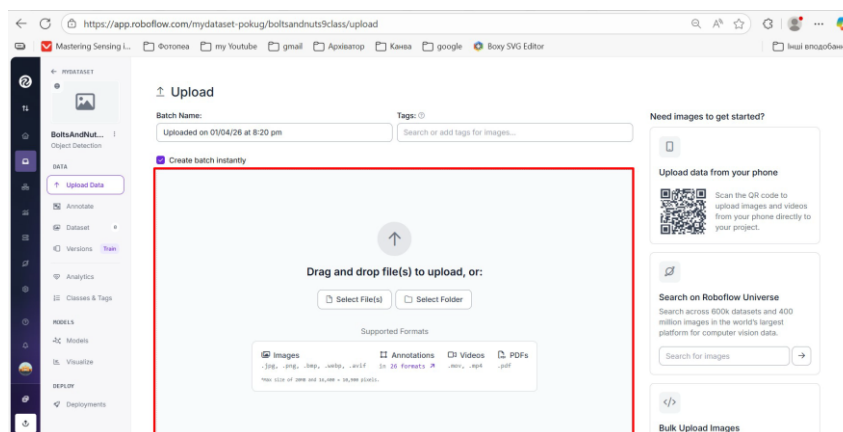


Рисунок 5. Завантаження зображень для створення та розмітки датасету

Додаються класи об'єктів для розпізнавання bolts, nuts (болти та гайки), які наведені на рис. 6.

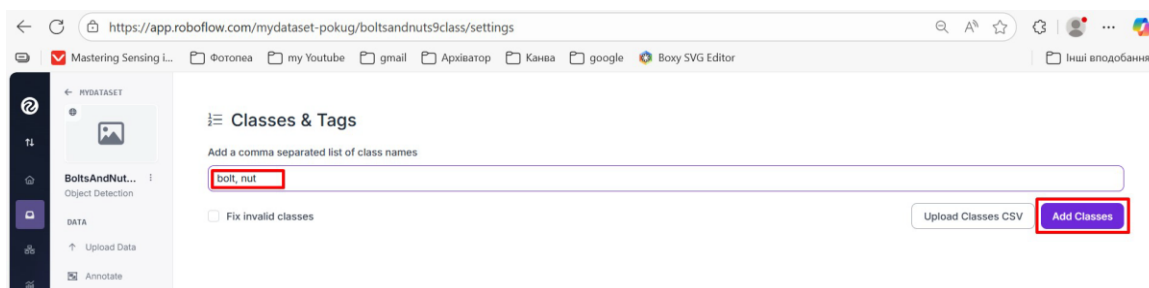


Рисунок 6. Додавання класів для розмітки, навчання та розпізнавання

Процес розмітки зображень для створення датасету представлено на рис. 7

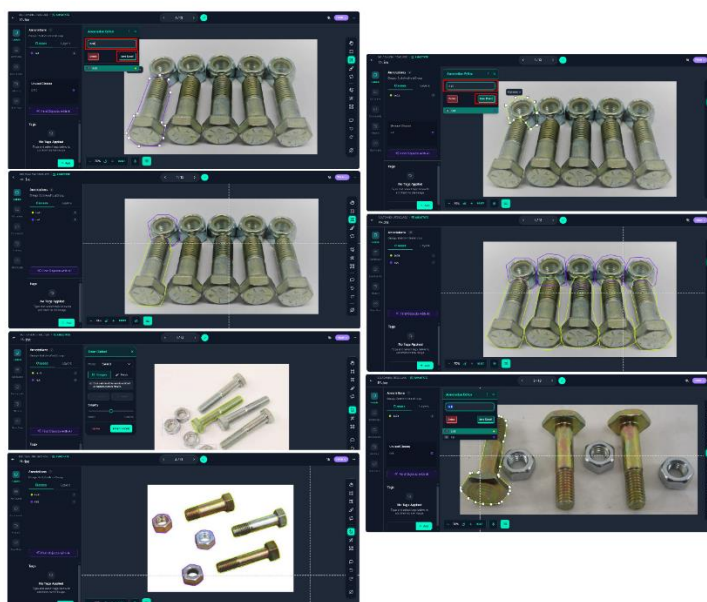


Рисунок 7. Процес розмітки зображень для створення датасету

Розмічені зображення розділяються за категоріями “Train”, “Valid”, “Test” і треба натиснути “Add” (рис. 8).

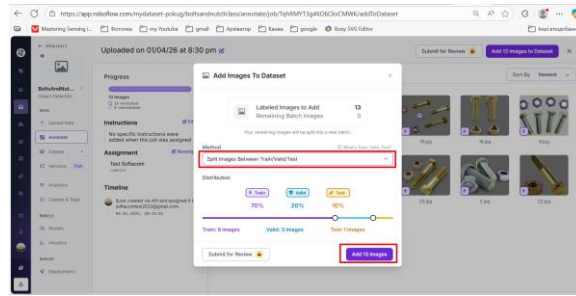


Рисунок 8. Розділення за категоріями “Train”, “Valid”, “Test”

Для подальшого навчання моделі на основі розміченого датасету використовується середовище Google Colab та python бібліотеки (рис. 9)

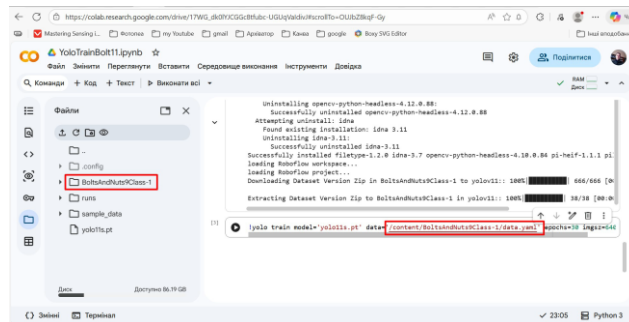


Рисунок 9. Завантажений датасет у Google Colab

Запуск процес навчання моделі машинного навчання YOLO (рис. 10).

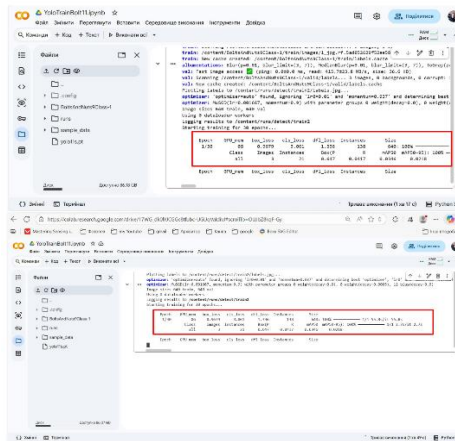


Рисунок 10. Процес навчання у Google Colab

Після завершення процесу навчання необхідно завантажити навчену модель для подальшої її використання у середовищі Google Colab та подальшого використання у Android додатку (рис. 11).

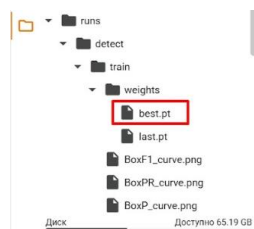


Рисунок 11. Завантаження навченої моделі у Google Colab

Для подальшої зручності файл `best.pt` можна перейменувати та використовувати для тестування роботи моделі.

## ПЕРЕВІРКА РОБОТИ НАВЧЕНОЇ МОДЕЛІ

Результати роботи моделі машинного навчання (розпізнавання болтів та гайок) представлені на рис. 12.

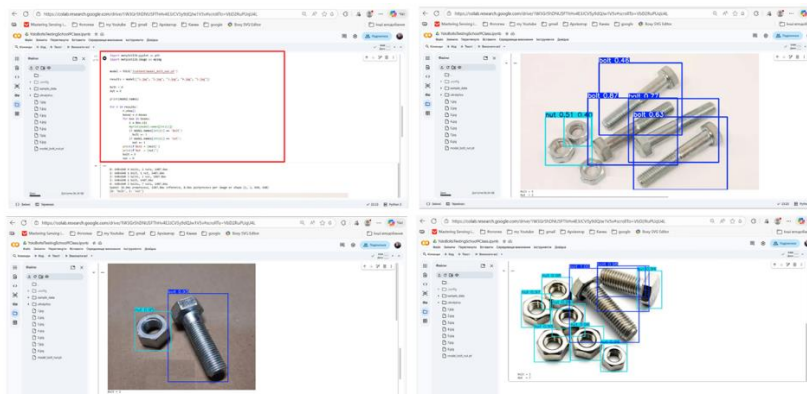


Рисунок 12. Результати розпізнавання болтів та гайок

Для використання отриманої навченої моделі машинного навчання необхідно її сконвертувати у формат `tflite` [6]. Тепер отриману модель необхідно підвантажити та інтегрувати у проект мобільного додатку Android (середовище IntelliJ IDEA [7]). Для розробки мобільного додатку використовувалася мова програмування Java. Результати розпізнавання об'єктів реального світу (болтів та гайок) на Android наведені на рис. 13.

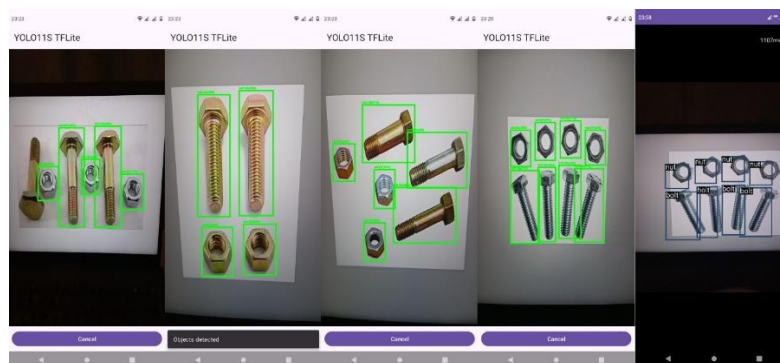


Рисунок 13. Результати розпізнавання та ідентифікації болтів та гайок у Android додатку

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи було досліджено можливості заздалегідь навчених моделей машинного навчання YOLO. Також за допомогою сервісу RoboFlow було розмічено та підготовлено датасет для подальшого навчання моделі у середовищі Google Colab. Отримана модель була перевірена на адекватність роботи (розпізнавання болтів та гайок) у Google Colab. Результати розпізнавання зображень наведені у роботі. Після конвертації дана модель була інтегрована у проект мобільного додатку (Android).

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Бабаши А.В. Використання моделі YOLO для розпізнавання об'єктів навколишнього світу / Н46 Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2025: збірник наукових праць XXIV Міжнародної наукової конференції «Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2025» / за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. С.В.Ковалевського. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2025. – 254 с. ISBN 978-617-7893-18-8
2. Назаркевич М. А. , Олексів Н. Т. Система розпізнавання об'єктів на основі моделі YOLO. Український журнал інформаційних технологій. 2024, т. 6, № 1. С. 120–126.
3. YOLO (object detection algorithm) [Electronic resource] – Available at: <https://itwiki.dev/data-science/ml-reference/ml-glossary/yolo-object-detection-algorithm>
4. Google Colab [Electronic resource] – Available at: <https://colab.research.google.com/>
5. RoboFlow [Electronic resource] – Available at: <https://roboflow.com/>
6. TensorFlow Lite [Electronic resource] – Available at: [https://www.cloudskillsboost.google/course\\_templates/17/video/504915?locale=uk](https://www.cloudskillsboost.google/course_templates/17/video/504915?locale=uk)
7. IntelliJ IDEA – the Leading Java and Kotlin IDE [Electronic resource] – Available at: <https://www.jetbrains.com/idea/>

УДК 621.98:621.7.043

**Браташ К.Ю., Шубний О.Є., Шипов Є.Г.** (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж Лозівська філія, м. Лозова, Україна).

## ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ПРОЦЕСИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

**Анотація:** У статті розглянуто актуальні підходи до підвищення енергоефективності процесів формоутворення деталей машин. Встановлено, що зниження енергоємності технологічних операцій можливе за рахунок оптимізації геометрії інструмента, параметрів навантаження, умов тертя та застосування чисельного моделювання. Обґрунтовано доцільність використання сучасних методів комп'ютерного аналізу для прогнозування напружено-деформованого стану заготовки, зменшення кількості експериментальних налагоджень та підвищення точності виготовлення деталей. Визначено основні фактори, що впливають на витрати енергії у процесах пластичного формоутворення. Доведено, що комплексний підхід до

проектування технології дозволяє зменшити виробничі витрати та підвищити ефективність машинобудівного виробництва.

**Ключові слова:** формоутворення, деталі машин, енергозбереження, пластичне деформування, листове штампування, чисельне моделювання, енергоефективність.

**Abstract:** The article considers current approaches to improving the energy efficiency of machine part forming processes. It has been established that reducing the energy intensity of technological operations is possible through optimization of tool geometry, loading parameters, friction conditions, and the use of numerical simulation. The expediency of using modern computer analysis methods for predicting the stress-strain state of the workpiece, reducing the number of experimental adjustments, and improving the accuracy of part manufacturing is substantiated. The main factors influencing energy consumption in plastic forming processes are identified. It is proved that an integrated approach to technology design allows reducing production costs and increasing the efficiency of machine-building manufacturing.

**Keywords:** forming, machine parts, energy saving, plastic deformation, sheet stamping, numerical simulation, energy efficiency.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами**

Сучасна галузь машинобудування спрямована на підвищення точності, продуктивності та економії ресурсів при виготовленні деталей. У зв'язку зі зростанням цін на енергоресурси та посиленням конкурентних вимог до продукції особливо важливо знизити енергоємність технологічних операцій. Широко розповсюдженими в машинобудуванні є процеси формоутворення шляхом пластичної деформації — зокрема листове штампування, гнуття, витягування, обтискання та інші операції обробки металів тиском.

Ці технології мають низку переваг: високу продуктивність, можливість отримання виробів складної конфігурації, відносно невеликі втрати матеріалу та значні можливості автоматизації [1], [2]. Водночас вони супроводжуються великими енерговитратами, що зумовлено подоланням опору пластичній деформації, силами тертя, пружними ефектами матеріалу та необхідністю багаторазового налагодження технологічного оснащення [3], [4].

У виробничій практиці часто виникають випадки, коли невдалий вибір геометрії інструмента, режимів деформування або умов контакту призводить до дефектів, підвищення навантаження на пресове обладнання, прискореного зношування штампів і зростання відсотка браку. Такі фактори безпосередньо впливають на енергетичну ефективність виробництва. Тому розробка енергозберігаючих методик формоутворення деталей машин має важливе наукове та практичне значення.

## **Аналіз сучасних досліджень і публікацій.**

Проблематика формоутворення металевих деталей широко висвітлена у вітчизняній і зарубіжній науковій літературі. У працях фахівців докладно досліджено закономірності пластичної деформації, механіку листового формоутворення, а також вплив геометрії інструмента та фізико-механічних властивостей матеріалу на якість виробів [1], [2], [6].

Останні дослідження демонструють, що одним із перспективних шляхів підвищення ефективності формоутворення є застосування комп'ютерного аналізу, передусім методу скінченних елементів. Використання цього методу на етапі проєктування технології дозволяє визначити напружено-деформований стан заготовки, передбачити виникнення дефектів, оцінити локальне стоншення, пружне повернення та необхідні технологічні зусилля [2], [4].

Окрему увагу в сучасних роботах приділено енергоефективності виробничих процесів. Підвищення енергетичної ефективності розглядається не лише як зменшення максимального технологічного зусилля, а як комплексне скорочення енергетичних витрат на всіх етапах виробництва: від підготовки заготовки та налагодження обладнання до виконання основної операції та післяопераційного контролю [5]. Це свідчить про необхідність переходу від традиційного до інтегрованого підходу при проєктуванні технологій з орієнтацією на енергозбереження.

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Попри значну кількість досліджень у сфері обробки металів тиском, задача забезпечення енергоефективності процесів формоутворення деталей машин залишається актуальною. Часто технологічні параметри визначаються з огляду на продуктивність або точність, тоді як енерговитрати не виступають самостійним критерієм оптимізації.

Недостатньо вивчено комплексні взаємозв'язки між величиною технологічного навантаження, умовами тертя, пружним поверненням, стабільністю формоутворення та загальною енергоємністю процесу. Також необхідно подальше наукове обґрунтування підходів, які дозволяли б використовувати чисельне моделювання не лише для аналізу напружено-деформованого стану, а й для прямої оптимізації енергетичних параметрів технологічних операцій.

Отже, існує потреба у створенні науково обґрунтованих методик проєктування процесів формоутворення, які одночасно забезпечують якість деталей, стабільність технології та зменшення енерговитрат.

## **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою статті є обґрунтування енергозберігаючих підходів до формоутворення деталей машин на базі оптимізації технологічних параметрів та застосування чисельного моделювання.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати ключові фактори, що впливають на енергоємність процесів формоутворення деталей машин.
2. Визначити роль геометричних, силових та контактних параметрів у зниженні енерговитрат.
3. Обґрунтувати значущість чисельного моделювання при проєктуванні енергозберігаючих технологій.
4. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності процесів пластичного формоутворення.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Процеси формоутворення деталей шляхом пластичного деформування супроводжуються значними механічними навантаженнями, що спричиняє великі витрати енергії. Основна частина енергії витрачається на подолання опору матеріалу деформації, сили тертя між заготовкою та інструментом, а також на компенсацію пружних ефектів, що виникають після зняття навантаження. Отже, підвищення енергоефективності вимагає комплексного аналізу технологічної системи.

Одним із вирішальних факторів енергоємності є геометрія деформуючого інструмента. Від оптимально підібраних радіусів заокруглення пуансона та матриці, форми перехідних поверхонь, кута гнуття й загальної конфігурації робочої частини інструмента залежить рівномірність течії металу, розподіл локальних деформацій і величина контактних навантажень [1], [6]. Раціонально спроектована геометрія зменшує пікові напруження і дозволяє знизити максимальні зусилля деформування.

Велике значення мають також сили тертя. У листовому формоутворенні тертя виконує подвійні функції: з одного боку, воно стабілізує рух заготовки, з іншого — надмірне тертя підвищує технологічне зусилля, викликає нерівномірність деформації, посилює зношування штамів та спричиняє додаткові енерговитрати [2], [3]. Зниження коефіцієнта тертя досягається застосуванням сучасних мастильних матеріалів, захисних покриттів та підвищенням якості обробки робочих поверхонь інструмента.

Режим навантаження, що включає швидкість деформування, силу притиску, число переходів та послідовність операцій, суттєво впливає на енергетичні показники. Надмірне притискне зусилля хоч і знижує ризик утворення складок, проте призводить до зростання втрат енергії через тертя. Збільшення швидкості деформування може підвищити продуктивність, але за певних умов спричиняє нестабільність процесу та збільшує навантаження на обладнання [2], [4]. Тому енергозберігаюча стратегія полягає у виборі мінімально достатніх параметрів навантаження, які забезпечують якісний виріб без перевантаження технологічної системи.



Особливу увагу потребує проблема пружного повернення після формоутворення. Це явище є однією з головних причин відхилення геометрії деталі від заданих розмірів, що спричиняє повторні налагодження, коригування інструмента або виконання допоміжних операцій — усе це прямо збільшує витрати енергії та часу [3], [4]. Зменшення пружного повернення можливе шляхом оптимізації траєкторії деформування, вибору раціональної геометрії інструмента та регулювання технологічного навантаження.

Чисельне моделювання процесів формоутворення є ефективним інструментом вирішення названих проблем. Застосування методу скінченних елементів дозволяє ще на етапі проектування визначити розподіл напружень і деформацій, спрогнозувати дефекти, оцінити величину стоншення, локалізацію пластичних деформацій та пружне повернення [2], [4], [5]. Це суттєво зменшує обсяг дорогих експериментальних випробувань і скорочує витрати матеріалу, електроенергії та часу на підготовку виробництва.

Поєднання чисельного моделювання з оптимізацією технологічних параметрів дає змогу впровадити низку енергозберігаючих заходів:

- зниження максимального технологічного зусилля;
- зменшення навантаження на пресове обладнання;
- скорочення числа пробних штампувань;
- зниження відсотка браку;
- підвищення стабільності геометричних параметрів деталей;
- подовження ресурсу інструментального оснащення.

Таким чином, енергозберігаючі процеси формоутворення деталей машин слід розглядати як результат цілеспрямованої інтеграції конструктивних, технологічних та цифрових рішень. Інтегрований підхід забезпечує зниження енергоємності виробництва без погіршення якості виробів.

### **Висновки та напрями подальших досліджень.**

За підсумками дослідження встановлено, що енергоефективність процесів формоутворення деталей машин значною мірою визначається раціональним вибором геометрії інструмента, параметрів навантаження, умов тертя та властивостей матеріалу заготовки.

Показано, що одним із найефективніших засобів енергозбереження є застосування чисельного моделювання методом скінченних елементів, яке дозволяє прогнозувати перебіг формоутворювального процесу, зменшувати кількість експериментальних налагоджень, мінімізувати витрати матеріалу та скорочувати загальні енерговитрати виробництва.

Практична цінність роботи полягає в можливості впровадження запропонованих підходів під час проектування та удосконалення



технологій листового штампування, гнуття та інших операцій пластичного формоутворення деталей машин.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- розробка математичних моделей оцінювання енерговитрат для окремих операцій формоутворення;
- оптимізація багатопрохідних технологічних процесів;
- дослідження впливу сучасних матеріалів і покриттів інструмента на енергоємність процесу;
- впровадження CAD/CAE-систем у проєктування енергозберігаючих технологій машинобудівного виробництва.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Huda Z. *Metal Forming Processes: Fundamentals, Analysis, Calculations*. Cham : Springer, 2024. 307 p.
2. Banabic D. *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. 301 p.
3. Valberg H. S. *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 484 p.
4. Fu M. W. *Design and Development of Metal-Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation*. Singapore : Springer, 2017. 241 p.
5. Oliveira M., Fernandes J. V. (eds.). *Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes*. Basel : MDPI, 2020. 254 p.
6. Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 213 p.

УДК 621.311:94(477.6)-047.44

**Ковтеба Д.О., Чернявська О.М.** (ВСП «Краматорський фаховий коледж промисловості, інформаційних технологій та бізнесу Донбаської державної машинобудівної академії», м.м. Краматорськ-Хуст, Україна).

### ІСТОРИЧНИЙ ДОСВІД ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ПРОМИСЛОВОГО ДОНБАСУ ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

**Анотація:** У статті досліджено еволюцію енергоінфраструктури промислового Донбасу від перших планів електрифікації до сучасного етапу розвитку енергетики. Розглянуто історичні передумови формування централізованої моделі електропостачання, що базувалася на великих теплових електростанціях і магістральних мережах. Проаналізовано вразливості цієї моделі в умовах сучасних криз і бойових дій, що призвели до руйнування ключових енергетичних вузлів і

фрагментації системи. Особливу увагу приділено функціонуванню Краматорського енергетичного вузла та його адаптації до умов ізоляції. Обґрунтовано необхідність переходу до децентралізованих систем генерації на основі концепцій Smart Grid і Microgrid. Запропоновано багаторівневу архітектуру енергосистеми з використанням розподілених джерел енергії та систем накопичення. Розроблено концепцію застосування штучного інтелекту для автоматизованого управління енергомережами та підвищення їх стійкості, що дозволяє забезпечити безперервність електропостачання критичної інфраструктури.

**Ключові слова:** електрифікація, Донецщина, відбудова, smart grid, енергетична безпека, штучний інтелект, розподілена генерація.

**Abstract:** The article examines the evolution of the energy infrastructure of the industrial Donbas from early electrification plans to the current stage of energy system development. The historical prerequisites for the formation of a centralized power supply model based on large thermal power plants and high-voltage transmission networks are analyzed. The vulnerabilities of this model under modern crisis conditions, including hostilities that led to the destruction of key energy facilities and fragmentation of the system, are identified. Special attention is paid to the functioning of the Kramatorsk energy hub and its adaptation to isolation conditions. The necessity of transitioning to decentralized generation systems based on Smart Grid and Microgrid concepts is substantiated. A multi-level architecture of the energy system using distributed energy sources and storage systems is proposed. The study also develops a conceptual approach to the application of artificial intelligence for automated control of power networks and improving their resilience, ensuring reliable power supply for critical infrastructure under extreme conditions.

**Keywords:** electrification, Donetsk region, reconstruction, smart grid, energy security, artificial intelligence, distributed generation.

## Постановка проблеми.

Енергетична інфраструктура Донецького регіону, що формувалася протягом XX століття, базувалася на принципі жорсткої централізації [1]. Основу системи склали гігантські теплові електростанції та розгалужені магістральні мережі, розраховані на енергозабезпечення великих промислових вузлів, таких як Краматорський. Однак досвід останніх років довів критичну вразливість цієї моделі в умовах сучасних криз та бойових дій: виведення з ладу лише одного ключового вузла призводить до каскадних блекаутів цілих районів. Постає гостра потреба не просто у відновленні зруйнованого, а у переході до стійкої та гнучкої архітектури енергопостачання.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання еволюції та стратегій розвитку енергетики України широко висвітлені у працях А.К. Шидловського та О.І. Скрипника. Сучасні концепції інтелектуальних систем (Smart Grid) та мікромереж (Microgrids) досліджуються О.В. Кириленком, С.П. Денисюком та А.Ф. Жаркіним. Окрему увагу впровадженню штучного інтелекту в диспетчеризацію мереж приділяє Є.О. Зайцев. Разом з тим, поєднання історичного ретроспективного аналізу промислового Донбасу з

конкретним моделюванням повоєнної відбудови на базі ШІ залишається недостатньо висвітленим.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Попри наявність теоретичних напрацювань щодо Smart Grid, залишається невирішеним питання адаптації цих технологій до специфіки конкретного промислового регіону (Донеччини), який має унікальну щільність забудови та високу концентрацію енергоємних підприємств. Також потребує деталізації алгоритм автоматичного переходу локальних вузлів у автономний режим за умов пошкодження магістралей.

### **Постановка задачі.**

Метою дослідження є аналіз історичних принципів побудови енергосистеми промислового Донбасу та розробка на цій основі концептуальної моделі її повоєнної відбудови з використанням децентралізованих технологій [2] та штучного інтелекту для підвищення стійкості мережі [4].

Виклад основного матеріалу дослідження. Ретроспективний аналіз показав, що електрифікація Донбасу проходила два основні етапи: закладення фундаменту за планом ГОЕЛРО (1920-40-ві роки) та масштабне будівництво ТЕС-гігантів, таких як Вуглегірська та Слов'янська (1950-80-ті роки). Ця централізація була виправданою для індустріалізації минулого століття [2].

Перше масштабне руйнування логістики та фрагментація енергомережі Донбасу відбулися у 2014–2015 роках. Внаслідок втрати контролю над Зуївською та Старобешівською ТЕС, а також пошкодження ключових ліній 330 кВ, єдина система регіону була розірвана. Краматорський промисловий вузол був змушений адаптуватися до цих кризових умов ізоляції та фрагментації задовго до 2022 року.

Подальша ескалація бойових дій остаточно довела, що концепція, яка була передовою для ХХ століття, у сучасних воєнних реаліях стала головною слабкістю. Жорстка прив'язка до великих генеруючих вузлів призвела до того, що виведення з ладу однієї ТЕС або магістральної підстанції неминуче викликає ефект «доміно» та каскадні знеструмлення величезних територій [2].

Замість традиційного підходу - капітальної відбудови великих ТЕС - у роботі запропоновано інноваційну архітектуру Microgrids (мікромереж) [3, 4]. Її структура включає (рис. 1):

- базовий рівень: розосереджені малі газопоршневі установки (1–5 МВт), сонячні електростанції та системи накопичення енергії (Energy Storage) безпосередньо біля споживача;

- мережевий рівень: локальні розподільні мережі 10/0,4 кВ, здатні працювати паралельно з ОЕС України або в ізольованому «острівному» режимі;
- рівень управління: інтелектуальна система на базі ШІ.

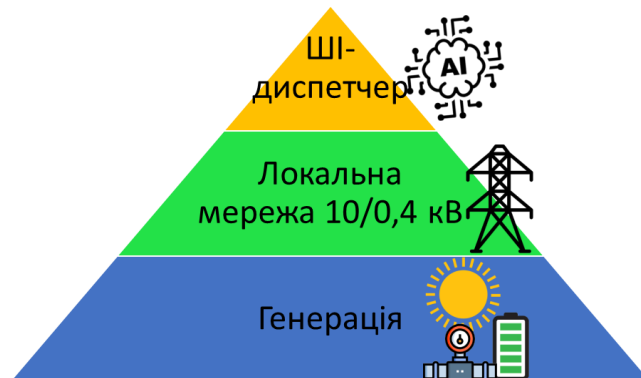


Рисунок 1. Багаторівнева архітектура смарт-системи

На прикладі Краматорського вузла (зокрема кластера «Ясногірка») змодельовано алгоритм роботи ШІ-контролера (рис. 2). У разі критичного падіння напруги в магістральній лінії система за мілісекунди виконує такі дії:

- фізично від'єднує локальний кластер від загальної мережі;
- пріоритезує споживачів, спрямовуючи енергію виключно на критичну інфраструктуру (лікарні, водоканали, укриття);
- після відновлення живлення автоматично проводить синхронізацію з ОЕС.

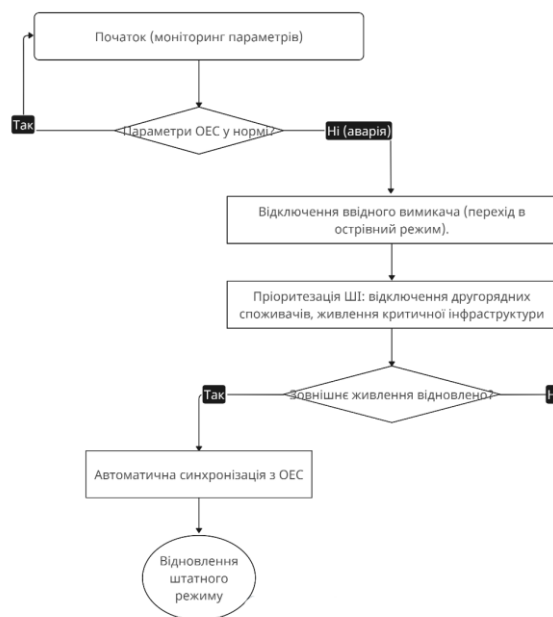


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму роботи ШІ-контролера

Порівняльний аналіз за метриками надійності SAIDI та SAIFI доводить, що така смарт-модель дозволяє скоротити час знеструмлення критичних об'єктів до мілісекунд, на відміну від годин чи діб у традиційній системі.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Історичний принцип надцентралізації енергосистеми вичерпав себе та потребує заміни на гнучку кластерну архітектуру. Розроблена концепція децентралізованих енергетичних «островів» забезпечує безперебійне живлення критичних об'єктів навіть під час повного блекауту магістралей. Штучний інтелект є незамінним інструментом для швидкого балансування таких мереж.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці конкретних математичних моделей предиктивної аналітики на базі нейромереж для прогнозування попиту та сонячної генерації, що дозволить мінімізувати технічні обмеження щодо утримання стабільної частоти в автономному режимі.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. Шидловський А.К., Скрипник О.І. *Енергетика України: історія, сьогодення, майбутнє*. Київ: Наукова думка, 2018. 320 с.
2. Кириленко О.В., Денисюк С.П. *Інтелектуальні електроенергетичні системи: елементи та режими*. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2020. 415 с.
3. Жаркін А.Ф., Палачов В.В. Розподілена генерація та мікромережі (Microgrid) в сучасних енергосистемах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 55-62.
4. Зайцев Є.О. Застосування штучного інтелекту для диспетчеризації розумних мереж (Smart Grid). *Енергетика та автоматика*. 2022. № 1. С. 112-119.
5. Інтерактивний помічник АДШІ [Електронний ресурс]: цифровий освітній сервіс на основі GPT-технології / Академія дослідників штучного інтелекту. – Режим доступу: <https://chatgpt.com/g/g-68f0810d6a3081919d57dbfacaf157ba-interaktivnii-pomichnik-adshi>.

УДК 620.9:66.017:620.3

**Кохан І.Р., Тініна М.Р.** (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж, Харків, Україна).

### **ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУПЕРОВАНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ.**

*Анотація:* У статті досліджено еволюцію енергоінфраструктури промислового Донбасу від перших планів електрифікації до сучасного етапу розвитку енергетики. Розглянуто історичні передумови формування централізованої моделі

електропостачання, що базувалася на великих теплових електростанціях та магістральних мережах. Проведено аналіз вразливостей цієї моделі в умовах сучасних криз, зокрема під час бойових дій, які спричинили руйнування ключових енергетичних вузлів та фрагментацію системи. Особливу увагу приділено функціонуванню Краматорського енергетичного вузла та його адаптації до умов ізоляції. Обґрунтовано необхідність переходу до децентралізованих систем генерації на основі концепцій Smart Grid та Microgrid. Запропоновано багаторівневу архітектуру енергосистеми з використанням розподілених джерел енергії та систем накопичення. Розроблено концепцію застосування штучного інтелекту для автоматизованого управління енергомережами та підвищення їх стійкості. Доведено, що впровадження інтелектуальних систем дозволяє значно зменшити час відновлення електропостачання та забезпечити безперервність живлення критичної інфраструктури.

**Ключові слова:** електрифікація, Донецьчина, відбудова, smart grid, енергетична безпека, штучний інтелект, розподілена генерація.

**Abstract.** The article examines the evolution of the energy infrastructure of the industrial Donbas from early electrification plans to the current stage of energy system development. The historical prerequisites for the formation of a centralized power supply model based on large thermal power plants and high-voltage transmission networks are analyzed. Particular attention is paid to the vulnerabilities of this model under modern crisis conditions, especially during hostilities that led to the destruction of key energy facilities and fragmentation of the unified system. The functioning of the Kramatorsk energy hub and its adaptation to isolation conditions are considered in detail. The necessity of transitioning to decentralized generation systems based on Smart Grid and Microgrid concepts is substantiated. A multi-level architecture of the energy system with distributed generation sources and energy storage systems is proposed. The study also develops a conceptual approach to the use of artificial intelligence for automated control of energy networks and improving their resilience. It is demonstrated that the implementation of intelligent systems significantly reduces outage duration and ensures uninterrupted power supply to critical infrastructure.

**Keywords:** electrification, Donetsk region, reconstruction, smart grid, energy security, artificial intelligence, distributed generation.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Сучасний розвиток машинобудування та матеріалознавства характеризується активним впровадженням ресурсозберігаючих технологій і принципів циркулярної економіки. Одним із перспективних напрямів є використання рекуперованих наноматеріалів при виготовленні деталей, що дозволяє зменшити споживання первинних ресурсів і знизити негативний вплив на довкілля.

Разом із тим, виробництво наноматеріалів є енергоємним процесом, що може нівелювати екологічні переваги їх застосування. Саме тому актуальним є застосування методології оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка дозволяє комплексно оцінити енерговитрати на всіх стадіях — від видобутку сировини до утилізації продукції.

У практичній площині такі дослідження мають важливе значення для оптимізації технологічних процесів, підвищення енергоефективності

виробництва та забезпечення екологічної безпеки продукції машинобудування.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У сучасних наукових дослідженнях метод LCA активно застосовується для оцінки впливу наноматеріалів на довкілля. Встановлено, що цей підхід дозволяє ідентифікувати «критичні точки» енергоспоживання та викидів у процесі виробництва.

Окремі роботи присвячені оцінці життєвого циклу матеріалів із використанням вторинної сировини та нанодобавок. Наприклад, дослідження бетонів із вторинними заповнювачами та наночастинками показують можливість зниження загального енергоспоживання за рахунок заміни первинних компонентів.

Водночас встановлено, що синтез наноматеріалів часто є найбільш енергоємною стадією життєвого циклу, що визначає загальний екологічний вплив продукції.

Останні дослідження також демонструють перспективність інтеграції LCA з цифровими технологіями, зокрема машинним навчанням, для прогнозування екологічних показників нових матеріалів.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на значну кількість досліджень, існує ряд невирішених питань:

- ✓ недостатня кількість достовірних даних щодо енерговитрат на виробництво рекуперованих наноматеріалів;
- ✓ відсутність уніфікованих методик оцінки впливу наноматеріалів у складі складних виробів;
- ✓ складність врахування процесів рециклінгу та повторного використання в рамках LCA;
- ✓ обмеженість моделей оцінки впливу на етапах утилізації та повторного застосування матеріалів.

Крім того, значною проблемою є невизначеність щодо потоків наноматеріалів на стадії завершення життєвого циклу, що ускладнює точну оцінку екологічних наслідків.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою даної роботи є оцінка енерговитрат життєвого циклу виготовлення деталей із використанням рекуперованих наноматеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- ✓ проаналізувати структуру життєвого циклу деталей з наноматеріалами;
- ✓ визначити основні етапи формування енерговитрат;
- ✓ оцінити вплив використання рекуперованих наноматеріалів на загальний енергетичний баланс;
- ✓ визначити напрями зниження енерговитрат у виробничих процесах.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Життєвий цикл деталей із використанням рекуперованих наноматеріалів включає такі основні етапи:

1. Отримання та підготовка вторинної сировини.
2. На цьому етапі здійснюється збір, сортування та обробка відходів, з яких виділяються наноматеріали або їх прекурсори.
3. Синтез або відновлення наноматеріалів.
4. Даний етап є одним із найбільш енергоємних, оскільки включає термічні, хімічні або фізичні процеси обробки.
5. Виготовлення деталей.
6. Використання наноматеріалів дозволяє покращити механічні та експлуатаційні характеристики виробів, що може зменшити їх масу та подовжити термін служби.
7. Експлуатація виробів. Підвищені властивості матеріалів сприяють зниженню енерговитрат під час використання (наприклад, зменшення тертя або маси конструкцій).
8. Кінець життєвого циклу (рециклінг). Повторне використання наноматеріалів дозволяє значно зменшити загальний екологічний вплив.

Аналіз показує, що використання рекуперованих наноматеріалів дозволяє:

- ✓ знизити енерговитрати на видобуток первинної сировини;
- ✓ скоротити викиди парникових газів;
- ✓ підвищити ресурсоефективність виробництва.

Зокрема, дослідження показують, що повторне використання наноматеріалів може суттєво зменшити сумарний екологічний вплив у порівнянні з їх первинним виробництвом.

Разом із тим, ефективність таких рішень значною мірою залежить від джерела енергії, що використовується у виробничих процесах. Перехід на відновлювані джерела енергії може суттєво покращити показники життєвого циклу продукції.

Практичне застосування оцінки життєвого циклу енерговитрат при використанні рекуперованих наноматеріалів охоплює широкий спектр галузей, зокрема машинобудування, транспорт, енергетику та будівництво. Впровадження таких матеріалів дозволяє не лише підвищити експлуатаційні характеристики виробів, але й досягти значного зниження енергетичних витрат на різних етапах життєвого циклу продукції.

У машинобудуванні рекуперовані наноматеріали активно використовуються при виготовленні зносостійких деталей, таких як підшипники, шестерні, втулки та поверхні тертя. Додавання наночастинок до металевих або полімерних матриць сприяє підвищенню твердості, зносостійкості та корозійної стійкості деталей. Це дозволяє зменшити частоту заміни компонентів, а отже — скоротити енерговитрати, пов'язані з їх виробництвом і обслуговуванням.



У транспортній галузі використання нанокompозитів на основі вторинної сировини дає можливість зменшити масу транспортних засобів. Зниження маси безпосередньо впливає на зменшення витрат палива або електроенергії під час експлуатації. Наприклад, застосування легких композитних матеріалів у конструкції кузовів або елементів двигуна дозволяє підвищити енергоефективність транспортних засобів на 5–15 % залежно від типу конструкції.

Особливої уваги заслуговує використання рекуперованих наноматеріалів у технологіях відновлення деталей (ремануфактурингу). Нанопокриття, отримані з вторинних матеріалів, широко застосовуються для відновлення геометричних розмірів і функціональних властивостей зношених деталей. Це дозволяє продовжити термін їх служби у 2–3 рази та значно зменшити потребу у виготовленні нових компонентів, що безпосередньо впливає на скорочення загальних енерговитрат.

У енергетичному секторі рекуперовані наноматеріали застосовуються для створення ефективних теплоізоляційних покриттів і матеріалів із підвищеною теплопровідністю. Це дозволяє зменшити втрати енергії в теплових системах, підвищити ефективність теплообміну та знизити експлуатаційні витрати.

У будівельній галузі використання наномодифікованих матеріалів на основі вторинної сировини забезпечує підвищення міцності, довговічності та енергоефективності будівельних конструкцій. Наприклад, застосування нанодобавок у бетоні дозволяє зменшити витрати цементу, виробництво якого є одним із найбільш енергоємних процесів у промисловості.

Практична реалізація підходу оцінки життєвого циклу дає можливість:

- ✓ обґрунтовано обирати матеріали та технології з мінімальними енерговитратами;
- ✓ оптимізувати виробничі процеси на основі аналізу енергетичних потоків;
- ✓ підвищувати конкурентоспроможність продукції за рахунок зниження її екологічного сліду;
- ✓ забезпечувати відповідність міжнародним екологічним стандартам.

Крім того, результати LCA можуть бути використані при розробці стратегій сталого розвитку підприємств, формуванні екологічної політики та прийнятті управлінських рішень щодо модернізації виробництва.

Таким чином, практичне впровадження рекуперованих наноматеріалів у поєднанні з оцінкою життєвого циклу дозволяє досягти комплексного ефекту, що включає зниження енерговитрат, підвищення ефективності виробництва та мінімізацію негативного впливу на довкілля.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

У результаті проведеного дослідження виконано комплексну оцінку енерговитрат життєвого циклу деталей із використанням рекуперованих наноматеріалів із застосуванням методології LCA та кількісних розрахункових підходів.

Встановлено, що:

- ✓ застосування узагальненої енергетичної моделі дозволяє системно врахувати всі складові життєвого циклу виробу та визначити ключові джерела енерговитрат;
- ✓ найбільш енергоємними етапами є стадії синтезу (переробки) наноматеріалів та експлуатації виробів;
- ✓ використання рекуперованих наноматеріалів забезпечує суттєве зниження енерговитрат на етапах отримання сировини та експлуатації;
- ✓ за результатами розрахункового прикладу сумарне зниження енерговитрат становить близько 20–25 %, що підтверджує енергетичну доцільність застосування таких матеріалів;
- ✓ графічний аналіз розподілу енерговитрат наочно демонструє зміщення енергетичного навантаження з етапів видобутку сировини на стадію переробки, що є характерною особливістю нанотехнологій.

Доведено, що додаткові енерговитрати на синтез наноматеріалів компенсуються за рахунок підвищення експлуатаційних характеристик виробів, зокрема зменшення маси, підвищення зносостійкості та продовження терміну служби.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості:

- ✓ оптимізації технологічних процесів виготовлення деталей;
- ✓ обґрунтованого вибору матеріалів із урахуванням їх повного життєвого циклу;
- ✓ зниження енергетичних та екологічних витрат у промисловості;
- ✓ впровадження принципів циркулярної економіки на підприємствах машинобудування та транспорту.

Разом із тим, результати дослідження показують, що ефективність використання рекуперованих наноматеріалів значною мірою залежить від:

- ✓ технології їх отримання;
- ✓ джерел енергії;
- ✓ рівня організації процесів рециклінгу.

Перспективи подальших досліджень полягають у:

- ✓ розробці більш точних математичних моделей оцінки енерговитрат для різних типів наноматеріалів;
- ✓ створенні галузевих баз даних показників LCA;
- ✓ інтеграції цифрових технологій та штучного інтелекту для прогнозування енергоефективності;
- ✓ проведенні експериментальних досліджень із реальними виробничими даними;
- ✓ розширенні аналізу на інші екологічні показники (викиди CO<sub>2</sub>, водний слід, токсичність).

Таким чином, використання рекуперованих наноматеріалів у поєднанні з методами оцінки життєвого циклу є перспективним напрямом підвищення енергоефективності сучасного виробництва та забезпечення сталого розвитку промисловості.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Нечаєва Т. О. Цільові показники низьковуглецевого розвитку електроенергетики України // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023.
2. Приходько І., Ігнатишин В., Приходько Ю. Особливості розвитку відновлюваної енергетики в Україні та світі // *Економіка та суспільство*. 2024. № 62.
3. Гавриш О. М., Юхман Я. В. «Зелена» енергетика як основа економічного відновлення України в умовах нестабільності // *Бізнес Інформ*. 2024. № 5. С. 81–87.
4. Зборівець Ю. Б., Якімцов В. В. Фінансування відновлювальної енергетики в Україні: сучасний стан та тенденції // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. № 6. С. 68–75.
5. Кудря С. О. (ред.) *Відновлювані джерела енергії: монографія*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024.
6. Квасній Л. Г., Дрозд І. Ф., Волошанська С. Я. Шляхи до енергоефективної економіки: відновлювані джерела енергії та інноваційні технології // *Успіхи і досягнення у науці*. 2024. № 1(1). С. 352–358.
7. Приб К. Інвестування в розвиток відновлюваних джерел енергії // *Наукові записки НаУКМА. Економічні науки*. 2021. Т. 6, № 1. С. 111–116.
8. Поліщук С., Коцюбайло М. «Зелена» енергетика як інструмент енергетичної незалежності підприємств // *Економічний простір*. 2022. № 181. С. 183–18.
9. Saavedra E. L., Osma J. F. Impact of nanoparticle additions on life cycle assessment (LCA) of ceramic tiles production // *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, № 11. P. 910.
10. Rudolf R., Majerič P., Pintarič Z. N., Horvat A., Krajnc D. Life cycle assessment of the impact on the environment of a cosmetic cream with gold nanoparticles // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 24. P. 11625.

УДК 37.016:53:004

**Кравчук А.В.** (Житомирський агротехнічний фаховий коледж,  
м.Житомир, Україна).

## ІНТЕГРАЦІЯ ВІДЕОХОСТИНГУ YOU TUBE У ПРОЦЕС НАВЧАННЯ ФІЗИКИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ОСВІТИ

**Анотація:** У статті розглянуто можливості використання відеохостингу YouTube у процесі навчання фізики в умовах цифровізації освіти. Проаналізовано сучасні підходи до застосування відеоресурсів у навчальному процесі та визначено їх педагогічний потенціал для підвищення ефективності засвоєння навчального матеріалу. На основі аналізу науково-методичних праць узагальнено підходи до трактування поняття «відеоресурс» як цифрового освітнього інструменту, побудованого на відеоданих. Окреслено основні напрями використання відеоконтенту під час викладання фізики, зокрема пояснення фізичних явищ, демонстрацію експериментів, підготовку до лабораторних робіт і створення навчальних завдань. Розглянуто приклади освітніх YouTube-каналів та можливості їх інтеграції у навчальний процес. Обґрунтовано доцільність використання відео як засобу підвищення мотивації студентів, розвитку самостійної роботи та формування цифрових компетентностей. Доведено, що використання відеоконтенту сприяє кращому засвоєнню матеріалу та забезпечує реалізацію принципів цифрової педагогіки в умовах сучасної освіти.

**Ключові слова:** відеохостинг, YouTube, навчання фізики, відеоконтент, цифровізація освіти, цифрова педагогіка, електронні ресурси.

**Abstract:** The article considers the possibilities of using YouTube video hosting in the process of teaching physics in the context of digitalization of education. Modern approaches to the application of video resources in the educational process are analyzed, and their pedagogical potential for improving the effectiveness of learning is determined. Based on the analysis of scientific and methodological works, approaches to interpreting the concept of a “video resource” as a digital educational tool based on video data are generalized. The main directions of using video content in physics teaching are outlined, including explaining physical phenomena, demonstrating experiments, preparing for laboratory work, and creating educational tasks. Examples of educational YouTube channels and their integration into the educational process are considered. The feasibility of using video content as a means of increasing student motivation, developing independent learning skills, and forming digital competencies is substantiated. It is proven that video resources contribute to better understanding of educational material and support the implementation of digital pedagogy principles in modern education systems.

**Keywords:** video hosting, YouTube, teaching physics, video content, digitalization of education, digital pedagogy, electronic resources.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

У межах дослідження ставиться задача проаналізувати сучасний стан використання відеоконтенту та освітніх платформ у викладання фізики та розробити систему використання навчальних відео з YouTube у курсі фізики, що забезпечує підвищення якості засвоєння знань, розвиток умінь самостійної роботи студентів і впровадження елементів цифрової педагогіки, які відповідають принципам економіки знань.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Для підвищення ефективності занять педагоги активно використовують різноманітні інформаційні ресурси – відеоматеріали, анімації фізичних процесів, презентації та інший мультимедійний контент.

Аналіз науково-методичних праць показав, що використання відеоресурсів у навчанні досліджували багато українських і зарубіжних науковців – Н. Нестеренко, Н. Михайловська, А. Волков, О. Воронкін, О. Мартинюк, І. Карпа та інші. Дослідники по-різному визначають поняття «відеоресурс». Ми погоджуємося з визначенням Я. Глинського, який вважає, що відеоресурс – це особливий тип електронного ресурсу, побудований на основі цифрових відеоданих. [1]. Вивчивши можливості використання відеоконтенту у навчанні фізики, можна зробити висновок, що:

- відео можна застосовувати як під час онлайн, так і під час офлайн занять;
- за відсутності необхідного обладнання воно допомагає

ознайомити студентів із фізичними явищами та процесами у реальному житті;

- під час підготовки до лабораторних робіт відеоексперименти є незамінним джерелом знань, особливо коли в кабінеті бракує приладів;

- відеоматеріали можуть використовуватися для створення задач або додаткових завдань з фізики.

За спостереженнями Д. Бучинської, використання відеоресурсів допомагає студентам засвоювати до 65 % навчального матеріалу. Тому впровадження освітнього відеоконтенту є доцільним.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Визначити педагогічний потенціал відеохостингу YouTube у контексті розвитку цифрової економіки знань, зокрема як засобу поширення відкритих освітніх ресурсів і формування навичок самоосвіти у студентів при вивченні фізики.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Одним із найпопулярніших відеохостингів є YouTube, аудиторія якого щомісяця перевищує 2,9 мільярда користувачів. На платформі функціонує багато освітніх каналів, серед яких:

1. «Топ Школа» - український канал, що налічує понад 320 безоплатних авторських відеоуроків з фізики для 7-11 класів для базової та профільної школи -

<https://www.youtube.com/channel/UCugp2JTHik6cdFxs1GbEOGg> ;

2. «Фізика за хвилину» - американський канал, де математик і фізик Г. Райх у доступній формі пояснює фізичні явища за кілька хвилин - <https://www.youtube.com/user/minutephysics>;

3. «Всеукраїнська школа онлайн» - це платформа для цифрового та змішаного навчання учнів 1–11 класів і методичної підтримки педагогічних працівників - <https://www.youtube.com/user/khanacademy>;

4. «Цікава наука» - канал на якому розміщені перекладені та озвучені науково-популярні та освітні відео на різні наукові теми з фізики, астрономії –

<https://www.youtube.com/channel/UCMIVE71tHEUDkuw 8tPxtzSQ>

У ході дослідження було відібрано добірку відеоматеріалів, які викладачі можуть використовувати під час вивчення розділу «Електродинаміка і магнетизм».

## Відео-контент з розділу «Електродинаміка і магнетизм»

| Тема                                | Посилання на відео                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                       |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Магнітне поле провідника зі струмом | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=YyzCfUNfsnk&amp;list=PLeb-UxVXmUb4zursu7WhIEI6KkCv2ESF_&amp;index=3">https://www.youtube.com/watch?v=YyzCfUNfsnk&amp;list=PLeb-UxVXmUb4zursu7WhIEI6KkCv2ESF_&amp;index=3</a> | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=fd85c8EtIKg">https://www.youtube.com/watch?v=fd85c8EtIKg</a> |
| Сила Ампера                         | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=9GJ_QAsP-ME&amp;list=PLeb-UxVXmUb4zursu7WhIEI6KkCv2ESF_&amp;index=4">https://www.youtube.com/watch?v=9GJ_QAsP-ME&amp;list=PLeb-UxVXmUb4zursu7WhIEI6KkCv2ESF_&amp;index=4</a> | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=u7iw6eG95z8">https://www.youtube.com/watch?v=u7iw6eG95z8</a> |
| Досліди Фарадея                     | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=9q5flfCMw1A&amp;list=PLeb-UxVXmUb4zursu7WhIEI6KkCv2ESF_&amp;index=7">https://www.youtube.com/watch?v=9q5flfCMw1A&amp;list=PLeb-UxVXmUb4zursu7WhIEI6KkCv2ESF_&amp;index=7</a> | <a href="https://www.youtube.com/watch?v=fjfnJ40Us2Q">https://www.youtube.com/watch?v=fjfnJ40Us2Q</a> |

Як видно з таблиці, до одного заняття можна підібрати чимало відеоресурсів, але під час добору відеоматеріалів варто враховувати такі основні вимоги:

1. Відео має бути емоційно привабливим і викликати інтерес до навчання.
2. Доцільно обирати короткі, змістовно завершені ролики тривалістю 2–10 хвилин або використовувати окремі фрагменти довших відео.

3. Мовлення у відео повинно мати помірний темп, а в деяких випадках важливо робити паузи, щоб студенти могли осмислити матеріал.

4. Під час пояснення нового матеріалу викладачу бажано нагадувати зміст попереднього заняття, демонструвати зв'язки між темами, наводити життєві приклади й заохочувати студентів до подальшого перегляду навчальних відео.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

В дослідженні визначено педагогічні можливості відеохостингу YouTube як інструменту цифрової освіти. Проведений аналіз довів практичне впровадження YouTube як допоміжного освітнього інструменту у курсі фізики.

Перспективою подальших досліджень є інтеграція штучного інтелекту для персоналізації відеорекомендацій і створення навчальних траєкторій з фізики.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. Глинський Я.М., Федасюк Д.В., Ряжська В.А. Розроблення і використання електронних відео ресурсів навчального призначення. Інформаційні технології і засоби навчання. 2017. т. 58. №2. с. 67-78.
2. Бучинська Д. Л. Використання відео в навчальному процесі – потреба сьогодення. Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету. 2015. Вип. 1. с. 101– 107.

УДК 007.52+004.8]:621.3

**Лупко М.О., Андрєєв В.О., Шевченко В.І.** (Дніпровський фаховий коледж радіоелектроніки, Дніпро, Україна).

### **ЗАСТОСУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МАШИНОБУДУВАННІ.**

**Анотація.** Анотація. У статті обґрунтовано доцільність застосування роботизованих систем та штучного інтелекту в машинобудуванні в умовах цифрової трансформації виробництва. Розглянуто сучасні напрями автоматизації, зокрема використання промислових роботів, алгоритмів машинного навчання та систем комп'ютерного зору для підвищення точності, продуктивності та якості продукції. Проведено аналіз наукових досліджень у сфері робототехніки та інтелектуальних систем, що підтверджує їх ключову роль у розвитку концепції Індустрії 4.0. Визначено основні проблеми інтеграції роботизованих систем у виробничі процеси, включаючи складність адаптації до нестабільних умов, необхідність модернізації виробничої інфраструктури та підготовки кваліфікованих кадрів. Окрему увагу приділено питанням кібербезпеки та надійності інтелектуальних систем. Обґрунтовано перспективи використання штучного інтелекту для оптимізації виробничих процесів,

прогнозування відмов обладнання та створення адаптивних систем управління, що забезпечують підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств.

**Ключові слова:** роботизація, машинобудування, штучний інтелект, промислові роботи, автоматизація, комп'ютерний зір, Індустрія 4.0.

**Abstract.** The article substantiates the feasibility of applying robotic systems and artificial intelligence in mechanical engineering under conditions of digital transformation of production. Modern directions of automation are considered, including the use of industrial robots, machine learning algorithms, and computer vision systems to improve accuracy, productivity, and product quality. An analysis of scientific research in the field of robotics and intelligent systems is carried out, confirming their key role in the development of the Industry 4.0 concept. The main challenges of integrating robotic systems into production processes are identified, including difficulties of adaptation to unstable operating conditions, the need to modernize industrial infrastructure, and the training of qualified personnel. Particular attention is paid to issues of cybersecurity and reliability of intelligent systems. The prospects for the use of artificial intelligence to optimize production processes, predict equipment failures, and create adaptive control systems that ensure increased efficiency and competitiveness of enterprises are substantiated.

**Keywords:** robotics, mechanical engineering, artificial intelligence, industrial robots, automation, computer vision, Industry 4.0.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Сучасне машинобудування перебуває на етапі глибокої трансформації, зумовленої впровадженням цифрових технологій, автоматизації та інтелектуальних систем управління. Умови глобалізації, підвищення вимог до якості продукції та необхідність оптимізації виробничих витрат стимулюють підприємства до переходу на нові технологічні платформи. Основним напрямком розвитку машинобудування є підвищення ефективності виробництва (збільшення випуску продукції та зростання її якості з одночасним зниженням витрат). Це забезпечується вдосконаленням існуючих і впровадження нових видів обладнання, технологічних процесів та засобів їхньої механізації та автоматизації [3, с. 5]. Ключову роль у цьому процесі відіграють роботизовані системи і штучний інтелект (ШІ), які забезпечують автоматизацію складних виробничих процесів, підвищення точності виготовлення продукції та зниження впливу людського фактору. У контексті концепції «Індустрія 4.0» ці технології формують основу так званих «розумних виробництв».

Підтвердження цьому знаходимо у науковій статті М. І. Диби і Ю. О. Гернего «Виклики індустрії 4.0 у контексті її становлення на глобальному і національному рівнях», в якій вони зазначають, що: «У виробничому секторі відбуваються цифрове проєктування виробів, віддалене налаштування виробничого обладнання, максимальна цифровізація процесу розробки технічних вимог до випуску «розумного продукту» (smart product), автоматизується процес доставки продукції до кінцевого споживача. Тому окремим напрямом наукових досліджень і



реалізації прикладних процесів стає застосування нових технологій безпосередньо у виробництві (Індустрія 4.0, або smart industry)» [2, с. 44].

Наукові дослідження у цій сфері спрямовані на розробку алгоритмів машинного навчання, систем адаптивного керування, комп'ютерного зору та інтегрованих виробничих платформ. Практична значущість полягає у підвищенні ефективності функціонування підприємств машинобудівного профілю.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У сучасній науковій літературі значна увага приділяється питанням автоматизації виробництва та інтеграції ІІІ в промислові системи. Науковці розглядають робототехніку як ключовий інструмент підвищення продуктивності та якості продукції.

Дослідження застосування роботизації в машинобудуванні висвітлюють роботи О. М. Гаркавенко, М. В. Голотюка, Ю. І. Муляра, Д. О. Міщука, І. Ш. Невлюдова, Л. Є. Пелевіна, К. І. Почки, С. В. Репінського, І. В. Русана та ін. Питання застосування технологій ІІІ в машинобудуванні розглядалися в наукових працях В. О. Жовтобрюха, Г. П. Кремнева, В. М. Колесніка, Ф. В. Новікова, М. М. Саліхова та ін. Окремі праці присвячені використанню машинного навчання для прогнозування відмов обладнання та оптимізації технологічних процесів (С. В. Андрієнко, В. В. Бондаренко, С. Д. Гриценко, Л. М. Грищенко, О. О. Ковальчук, Д. С. Корольов, В. П. Семенов, Р. Р. Шаталюк та ін.). Окремий напрям досліджень становлять системи комп'ютерного зору, які забезпечують автоматичний контроль якості продукції (О. І. Балицький, В. О. Балицька, М. Р. Гаврилюк, Л. М. Іваськевич, В. О. Колесніков та ін.). Разом із тим, аналіз джерел показує, що більшість досліджень носить загальний характер, тоді як питання практичного впровадження потребує подальшого вивчення.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Серед невирішених аспектів варто виділити проблему інтеграції роботизованих систем у існуючі виробничі процеси без значної їх перебудови. Також недостатньо досліджено питання адаптації алгоритмів ІІІ до умов нестабільного виробництва. Залишається актуальною проблема забезпечення кібербезпеки інтелектуальних систем, а також підготовки фахівців, здатних ефективно працювати з новітніми технологіями.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою статті є дослідження особливостей застосування роботизації та ІІІ в машинобудуванні та визначення перспектив їх розвитку.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- проаналізувати сучасні напрями роботизації виробництва;
- дослідити можливості використання ІІІ;

– визначити основні проблеми та перспективи розвитку.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Роботизація в машинобудуванні охоплює широкий спектр виробничих і допоміжних процесів: від первинної механічної обробки деталей до високоточного складання складних електронних та електротехнічних пристроїв. В умовах глобальної конкуренції, підвищених вимог до якості продукції та прискорення виробничих циклів роботизація стає невід’ємною складовою сучасного виробництва. Використання промислових роботів дозволяє забезпечити високу точність, стабільну повторюваність операцій, суттєво зменшити вплив людського фактору на якість кінцевої продукції та підвищити загальну ефективність виробництва. Класифікація промислових роботів у машинобудуванні, наведена у таблиці 1.

Таблиця 1. Класифікація промислових роботів у машинобудуванні

| Класифікаційна ознака       | Види роботів                                             | Коротка характеристика                                        |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| За кількістю маніпуляторів  | Одноманіпуляторні, двоманіпуляторні, багатоманіпуляторні | Використовуються залежно від складності та кількості операцій |
| За ступенем спеціалізації   | Універсальні, спеціалізовані, спеціальні                 | Визначає гнучкість застосування роботів                       |
| За формою робочого простору | Декартові, циліндричні, сферичні, шарнірні, SCARA        | Визначає геометрію зони досяжності                            |
| За ступенем свободи         | 2-3 осі, 4-5 осей, 6 і більше осей                       | Впливає на складність рухів та функціональність               |
| За вантажопідйомністю       | До 10 кг, 10-100 кг, Понад 100 кг                        | Визначає масу об’єктів для маніпуляції                        |
| За способом встановлення    | Підлогові, настінні, стельові, мобільні                  | Залежить від організації робочого простору                    |
| За точністю                 | Низька, середня, висока                                  | Визначає точність позиціонування і повторюваність             |

\* Таблиця складена автором.

Одним із ключових напрямів є застосування роботів-маніпуляторів у процесах складання електротехнічних виробів. Роботи-маніпулятори здатні виконувати широкий спектр операцій – від точного позиціонування компонентів до пайки, монтажу друкованих плат, встановлення корпусів та тестування готових вузлів. Вони працюють із високою швидкістю та

точністю, що значно підвищує продуктивність виробництва, зменшує кількість браку та забезпечує стабільність технологічних параметрів. Особливо важливим є використання роботів у мікроелектроніці, де точність операцій вимірюється мікронами, а навіть незначне відхилення від допустимих параметрів може призвести до втрати працездатності виробу.

Крім того, роботизація активно впроваджується у процеси обробки матеріалів, зокрема різання, свердління, шліфування, фрезерування та нанесення захисних або функціональних покриттів. Завдяки програмованості та адаптивності роботизовані системи можуть швидко переналагоджуватися для обробки деталей різних конструкцій, що особливо важливо в умовах дрібносерійного та індивідуального виробництва. У виробництві складних електротехнічних пристроїв, таких як блоки управління, електродвигуни, трансформатори чи промислові датчики, застосування роботизованих систем дозволяє зменшити час циклу виготовлення деталей, підвищити точність складання та мінімізувати відсоток браку.

Перевагами промислових роботів у машинобудуванні є:

**1. Висока точність і повторюваність** – промислові роботи забезпечують мікронну точність позиціонування та стабільність виконання операцій, що критично важливо при монтажі електронних компонентів і плат.

**2. Підвищення продуктивності** – роботи здатні працювати безперервно, без втоми та перерв, що значно збільшує обсяг виробництва та скорочує виробничий цикл.

**3. Зменшення впливу людського фактору** – автоматизація усуває помилки, пов'язані з неуважністю або недостатньою кваліфікацією персоналу, особливо при роботі з дрібними електронними елементами.

**4. Висока якість продукції** – завдяки точності та стабільності виконання операцій забезпечується рівномірна та надійна якість зібраних виробів.

**5. Гнучкість виробництва** – сучасні роботи легко переналаштовуються під нові типи продукції або зміну технологічного процесу, що особливо важливо для машинобудування з короткими життєвими циклами виробів.

**6. Мініатюризація та робота з дрібними компонентами** – роботи можуть виконувати операції з дуже малими елементами, які складно або неможливо обробляти вручну.

**7. Підвищення безпеки праці** – використання роботів зменшує участь людини у небезпечних або шкідливих процесах, таких як пайка, робота з хімічними речовинами чи високими температурами.

**8. Економічна ефективність** – хоча початкові витрати на роботів значні, у довгостроковій перспективі вони знижують витрати на оплату праці, брак продукції та простої виробництва.

**9. Інтеграція з цифровими технологіями** – роботи легко поєднуються з CAD/CAM-системами та концепцією Індустрії 4.0, що забезпечує цифровізацію та автоматизацію виробничих процесів.

**10. Контроль якості в реальному часі** – оснащення роботів датчиками та системами комп'ютерного зору дозволяє проводити контроль якості безпосередньо під час виробничого процесу.

Важливим напрямом є інтеграція ІІ у керування роботизованими системами. Алгоритми машинного навчання та глибинного навчання дозволяють не тільки автоматизувати повторювані операції, а й розпізнавати закономірності в роботі виробничих ліній, прогнозувати можливі перебої та відмови обладнання, а також оптимізувати технологічні параметри. Наприклад, аналіз даних з сенсорів дозволяє системі заздалегідь передбачати знос механічних вузлів, що сприяє переходу від реактивного обслуговування до превентивного та проактивного підходу, зменшуючи простої та витрати на ремонт.

Штучний інтелект – це інтелект, що має штучне походження та імітує (моделює) певну сукупність когнітивних функцій еквівалентних відповідним когнітивним функціям людини. [1, с. 45]. ІІ також застосовується для оптимізації режимів роботи виробничих ліній. Завдяки використанню моделей прогнозування і алгоритмів оптимізації, системи можуть підбирати оптимальну послідовність операцій, регулювати швидкість руху роботів, координувати одночасну роботу декількох маніпуляторів та забезпечувати раціональне використання електроенергії та матеріалів. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню продуктивності та екологічній безпеці виробництва. Впровадження ІІ характеризується наявністю як переваг, так і недоліків у роботі системи (рис. 1).

Цікавим є погляд Р. Пущина, який стверджує, що на відміну від традиційних методів, які мають обмеження щодо точності та швидкості, штучний інтелект (ІІ) відкриває нові можливості для термометрії. ІІ дозволяє не лише підвищити точність вимірювань, але й автоматизувати обробку даних та адаптуватися до різних умов» [4, с. 212].



Рисунок 1 – Використання ІІІ в машинобудуванні

Системи комп'ютерного зору є невід'ємною складовою сучасного автоматизованого виробництва. Вони застосовуються для контролю якості продукції, виявлення дефектів, контролю геометричних параметрів деталей, ідентифікації компонентів та відстеження технологічних процесів. Завдяки високочутливим камерам та алгоритмам обробки зображень системи комп'ютерного зору здатні працювати в режимі реального часу та забезпечувати надзвичайну точність діагностики. Наприклад, виявлення мікротріщин на друкованих платах або неякісної пайки може здійснюватися безперервно на високій швидкості, що неможливо реалізувати при ручному контролі. Крім того, інтеграція таких систем із роботизованими маніпуляторами дозволяє не лише виявляти дефекти, а й автоматично їх виправляти або сортувати деталі за ступенем придатності, створюючи повністю замкнений цикл контролю.

Перспективним напрямом розвитку є застосування цифрових двійників (digital twins). Ці системи створюють віртуальні копії реальних виробничих об'єктів, які дозволяють моделювати їх поведінку в різних умовах, прогнозувати результати експериментів і оптимізувати роботу обладнання. Використання цифрових двійників дозволяє проводити віртуальні тестування нових технологій, оцінювати ефективність змін у виробничих процесах і виявляти потенційні проблеми до впровадження змін у реальному виробництві. Це значно скорочує витрати на прототипування, зменшує час розробки нових виробів і підвищує рівень інноваційності виробництва.

Однією з ключових переваг роботизації є підвищення безпеки праці. Роботи здатні виконувати небезпечні, важкі або монотонні операції, наприклад роботу при високих температурах, у контакті з агресивними речовинами або під високою напругою. Це дозволяє значно знизити ризик

травматизму серед працівників і створити більш комфортні та безпечні умови праці. Персонал підприємства може зосередитися на управлінні, програмуванні та контролі роботи роботизованих систем, виконуючи творчі та аналітичні завдання, що підвищує загальний рівень кваліфікації кадрів та ефективність виробництва.

Водночас впровадження роботизованих систем пов'язане з низкою викликів. Одним із них є високі початкові інвестиції, необхідні для придбання, налаштування та інтеграції роботизованого обладнання. Також потребується високий рівень технічної підготовки персоналу, оскільки обслуговування та програмування роботів вимагає спеціалізованих знань і навичок. Це зумовлює необхідність модернізації освітніх програм у сфері машинобудування, створення лабораторій з робототехніки та практичної підготовки фахівців нового покоління.

Не менш важливим аспектом є кібербезпека та надійність програмного забезпечення. Сучасні виробничі системи часто інтегровані в єдині інформаційні мережі підприємств, що робить їх уразливими до кібератак та технічних збоїв. Це підкреслює необхідність впровадження комплексних заходів захисту даних, регулярного оновлення програмного забезпечення та розробки стратегій резервного копіювання та аварійного відновлення виробничих процесів.

Роботизація та застосування ШІ в машинобудуванні є ключовими чинниками підвищення ефективності виробництва, якості продукції, безпеки праці та інноваційного розвитку підприємств. Впровадження цих технологій сприяє формуванню інтелектуального виробництва нового покоління, здатного швидко адаптуватися до змін ринку, реалізовувати складні технологічні завдання та забезпечувати високий рівень конкурентоспроможності. У майбутньому розвиток роботизації та інтелектуальних систем дозволить інтегрувати виробничі ланки в єдину мережу «розумного заводу», де всі процеси будуть координуватися автоматично, а взаємодія людини з машиною стане більш ефективною та безпечною. Це відкриє нові можливості для підвищення продуктивності, оптимізації ресурсів та швидкого адаптування виробництва до змін ринкових потреб. Крім того, впровадження інтелектуальних систем сприятиме зменшенню людських помилок та підвищенню якості продукції.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Отже, впровадження роботизації та ШІ в машинобудуванні є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності підприємств. Ці технології забезпечують автоматизацію виробництва, підвищення якості продукції та зниження витрат. Разом із тим, існують проблеми, пов'язані з високою вартістю впровадження, складністю інтеграції та необхідністю підготовки кваліфікованих кадрів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці адаптивної інтелектуальної системи, здатної швидко реагувати на зміни виробничих умов і оптимізувати технологічні процеси, удосконаленні

взаємодії людини і машини через інтеграцію інтерфейсу користувача та системи підтримки рішень, а також створенні універсальної платформи для управління виробництвом, що забезпечить гнучкість, ефективність і високий рівень автоматизації в галузі машинобудування.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Баранов О. А. Визначення терміну «штучний інтелект». Інформація і право. № 1 (44). 2023. С. 32-49.
2. Діба М. І., Гернего Ю. О. Виклики індустрії 4.0 у контексті її становлення на глобальному і національному рівнях. URL: <file:///C:/Users/User01/Downloads/%D0%94%D0%B8%D0%B1%D0%B0.pdf> (дата звернення: 30.03.2026).
3. Пелевін Л. Є. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні : Підручник / Л. Є. Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко, Д. О. Міщук, І. В. Русан. Київ : КНУБА, 2016. 258 с.
4. Пуцин Р. В. Штучний інтелект як інструмент для підвищення ефективності та точності в термометрії. С. 212-213. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/038d9e17-d297-4f47-a78f-2c18dcde6c6a/content> (дата звернення: 02.04.2026).

УДК 004.8:37.091.26

**Мельников О. І., Березніченко З. О.** (ВСП «Краматорський фаховий коледж промисловості, інформаційних технологій та бізнесу Донбаської державної машинобудівної академії», Краматорськ, Україна).

## ЗАСОБИ ПРОТИДІЇ НЕДОБРОЧЕСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

**Анотація:** У статті досліджено проблему недоброчесного використання штучного інтелекту в умовах дистанційного навчання та зниження рівня академічної доброчесності студентів. Проаналізовано сучасні підходи до використання ШІ під час тестування, а також результати експериментального дослідження ефективності моделей штучного інтелекту при виконанні тестових завдань різного типу. Визначено, що текстові запитання є найбільш вразливими до автоматизованої обробки, тоді як візуальні формати значно ускладнюють використання ШІ. Запропоновано інноваційний підхід до формування тестових завдань у вигляді GIF-зображень, що дозволяє підвищити когнітивну активність студентів та зменшити можливості автоматичного отримання відповідей. Описано розроблений інструмент для генерації GIF-запитань та результати його апробації серед студентів. Доведено, що використання такого підходу сприяє підвищенню самостійності навчання та збереженню об'єктивності оцінювання знань, хоча потребує подальшого вдосконалення.

**Ключові слова:** штучний інтелект, академічна доброчесність, тестування, GIF-зображення, дистанційне навчання, цифрова освіта, освітні технології.

**Abstract:** The article investigates the problem of dishonest use of artificial intelligence in the context of distance learning and the decline of academic integrity among students. Modern approaches to the use of AI in testing are analyzed, as well as the results of an experimental study of the effectiveness of artificial intelligence models in solving different types of test tasks. It is determined that text-based questions are the most vulnerable to automated processing, while visual formats significantly complicate the use of AI tools. An innovative approach to test design using GIF images is proposed, which increases students' cognitive engagement and reduces the possibility of automated answer generation. The developed tool for generating GIF-based questions and the results of its testing among students are described. The study demonstrates that this approach contributes to improving independent learning and maintaining objectivity in knowledge assessment, although it requires further refinement and development.

**Keywords:** artificial intelligence, academic integrity, testing, GIF images, distance learning, digital education, educational technologies.

## **Постановка проблеми.**

У контексті дистанційного навчання, зумовленого військовими діями в Україні, спостерігається зниження академічної доброчесності та якості засвоєння знань. Штучний інтелект (ШІ) став потужним інструментом для недоброчесного виконання тестів, де автоматизовані відповіді спрощують процес списування та зменшують когнітивну участь студентів. Проблема пов'язана з практичними аспектами асинхронного навчання, де тестування є зручним методом контролю, але вразливим до зловживань ШІ. Для дослідження поставленої ідеї також використовувались попередні виконання дослідження на тему «Динаміка розвитку результативності штучного інтелекту в тестуваннях галузі електричної інженерії» [1].

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз результативності ШІ базується на тестуванні моделей ChatGPT (OpenAI), Gemini (Google) та Copilot (Microsoft) на вікторині «Який ти електрик», що охоплює електротехнічні питання. Тести проводилися щонайменше тричі для оцінки стабільності. Результати за 2024-2025 роки показують зростання середньої результативності: Gemini та ChatGPT покращили показники на понад 20%, тоді як Copilot продемонстрував зниження. Загальна динаміка результативності ШІ зросла на 20%. За типами питань: текстові – до 90% правильних відповідей (стрибок на 20%); задачі – зростання на 20%; зображення – покращення на 15–20%, але все ще нижче текстових. Це вказує на вразливість ШІ до візуальних форматів. Дослідження спирається на матеріали регіональної конференції 2025 року, де обговорювалися традиційні та новітні технології в промисловості та енергетиці [1].

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Існуючі методи протидії недоброчесності, такі як заборона копіювання тексту, скріншотів, спеціалізовані інструменти як Proctorio [2], ProctorU [3], Testportal [4], Safe Exam Browser [5], обмеження часу, мають



обмежену ефективність у дистанційному навчанні - їх легко обійти, наприклад, використанням камери телефону фото. Вони викликають технічні проблеми (скидання тесту через повідомлення) або стрес для чесних студентів, не перешкоджаючи швидким відповідям ІІІ. ІІІ ефективно обробляє текстові питання, але гірше – візуальні, що створює прогалину в адаптації тестів. Невирішеним залишається створення простого, універсального методу, який ускладнює обробку для ІІІ, але зберігає легкість сприйняття для людини, без значних ресурсів для викладачів.

### **Постановка задачі.**

Мета дослідження – розробити засоби протидії недоброчесному використанню ІІІ в тестуванні для підвищення самостійного засвоєння знань студентами. Задачею є оцінка існуючих методів протидії, запропонувати та реалізувати актуальне рішення, та зробити висновки.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Пропонується використання GIF-зображень для питань, оскільки ІІІ не розпізнає анімацію, але людина легко читає текст.

Розроблено сайт-генератор GIF на базі HTML/JS. Тестування моделей ІІІ показало перевагу Gemini через відсутність обмежень повідомлень. Функції: ввід тексту; попередній перегляд; вибір слів на кадр (1, 3, 5); розмір шрифту (12–18); якість рендеру (480p–1080p, розмір файлу ~15–20 КБ); динамічний темп читання; маркери початку/кінця; регулювання швидкості; генерація та завантаження GIF без засмічення сховища.

В результаті впровадження GIF-запитань було проведено опробацію. Тест з 15 питань пройшли 17 студентів 3–4 курсів нашого коледжу, використовуючи ІІІ; середній визначений час проходження тестування – 17 хв. У GIF-форматі неправильні відповіді зросли на 14% порівняно зі статичними. За опитуваннями: 70,6% не мали проблем з читанням GIF; 5,9% – проблеми з обробкою ІІІ, 58,8% перенабирали текст вручну; 29,41% вважають, що метод спонукає до самостійності, 47,06% – ні. Середній результат – 83,3%, без суттєвого впливу на оцінки.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Метод GIF перспективний для протидії зловживанню ІІІ, підвищуючи когнітивну участь студентів (перенабір тексту сприяє запам'ятовуванню), з 14% зростанням неправильних відповідей; зберігає коректність оцінювання (83,3% середній бал). Перевагами є: зручність генератора для викладачів, баланс технологій та етики. Недоліки: неповне блокування (наприклад, голосовий ввід), та проблеми сприйняття для деяких студентів. Перспективами є інтеграція GIF з когнітивно складними завданнями (як аналіз, розрахунки).

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Традиційні та новітні технології в промисловості, енергетиці та економіці України. Матеріали Регіональної науково-практичної конференції 16 грудня 2025 року/ Під заг.ред. В.Д. Ковальова, В.П.Баишовий – Краматорськ: ДДМА, 2025. – 225с.
2. Proctorio Inc. «Proctorio» URL: <https://proctorio.com/> (Дата звернення 07.03.2026);
3. Measure Learning's Services. «ProctorU», URL: <https://www.proctoru.com/> (Дата звернення 07.03.2026);;
4. Testportal Sp. z.o.o. «Testportal», URL: <https://www.testportal.com/> (Дата звернення 07.03.2026);;
5. ETH Zurich, IT Services. «Safe Exam Browser», URL: [https://safeexambrowser.org/news\\_en.html](https://safeexambrowser.org/news_en.html) (Дата звернення 07.03.2026).

УДК 621.865:004.8

**Поворознюк Б. Г., Федотова О. П.** (Відокремлений структурний підрозділ «Дружківський фаховий коледж Донбаської державної машинобудівної академії», Дружківка, Україна).

## РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

**Анотація:** У статті розглянуто використання робототехнічних комплексів зі штучним інтелектом у машинобудуванні та їх вплив на ефективність виробничих процесів. Проаналізовано сучасні підходи до впровадження автоматизованих систем із застосуванням промислових роботів, сенсорних технологій та алгоритмів штучного інтелекту для виконання технологічних операцій. Особливу увагу приділено підвищенню точності обробки деталей, автоматизації виробництва та зменшенню впливу людського фактора. Розглянуто приклади сучасних робототехнічних систем і їх застосування у виробничих умовах. Визначено основні переваги використання роботів, зокрема підвищення продуктивності, якості продукції та безпеки праці. Окреслено проблеми впровадження таких систем, пов'язані з необхідністю інтеграції в існуючі виробничі процеси та підготовкою кваліфікованих кадрів. Доведено, що використання робототехнічних комплексів зі штучним інтелектом є перспективним напрямом розвитку машинобудування.

**Ключові слова:** робототехнічні комплекси, штучний інтелект, машинобудування, автоматизація, промислові роботи, продуктивність, якість.

**Abstract:** The article examines the use of robotic complexes with artificial intelligence in mechanical engineering and their impact on the efficiency of production processes. Modern approaches to implementing automated systems using industrial robots, sensor technologies, and artificial intelligence algorithms for performing technological operations are analyzed. Particular attention is paid to improving machining accuracy, automation of production, and reducing the influence of the human factor. Examples of modern robotic systems and their application in various production environments are considered. The main advantages of using robots are identified, including increased productivity, improved product

*quality, and enhanced workplace safety. The challenges of implementing such systems are outlined, particularly the need for integration into existing production processes and the training of qualified personnel. It is proven that the use of robotic complexes with artificial intelligence is a promising direction for the development of mechanical engineering.*

**Keywords:** *robotic complexes, artificial intelligence, mechanical engineering, automation, industrial robots, productivity, quality.*

## **Постановка проблеми.**

Сучасне машинобудування є однією з найважливіших галузей промисловості, яка забезпечує виробництво техніки, обладнання та механізмів. З розвитком технологій зростає потреба у підвищенні точності виготовлення деталей та автоматизації виробничих процесів. Використання робототехнічних комплексів зі штучним інтелектом дозволяє значно підвищити ефективність виробництва та зменшити вплив людського фактора [5].

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Питання автоматизації виробництва та використання робототехнічних комплексів у машинобудуванні активно досліджується в сучасній науковій літературі. Значна кількість праць присвячена впровадженню промислових роботів у виробничі процеси, а також використанню штучного інтелекту для підвищення ефективності роботи підприємств. Дослідники розглядають можливості автоматизації технологічних операцій, зокрема обробки матеріалів, зварювання та складання деталей.

У наукових роботах також приділяється увага підвищенню точності виготовлення продукції, зменшенню кількості браку та оптимізації виробничих процесів. Окремі дослідження присвячені використанню систем технічного зору та датчиків для контролю якості продукції та коригування роботи роботів у реальному часі. Це дозволяє забезпечити стабільність виробництва та підвищити рівень автоматизації підприємств.

Крім того, значна увага приділяється питанням інтеграції робототехнічних комплексів у сучасні виробничі системи. Досліджуються можливості створення гнучких виробничих ліній, які здатні швидко адаптуватися до змін умов виробництва. Разом з тим, незважаючи на значну кількість досліджень, проблема комплексного використання штучного інтелекту в машинобудуванні залишається актуальною.

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Незважаючи на активний розвиток робототехнічних технологій, існує ряд невирішених питань, пов'язаних із впровадженням штучного інтелекту у виробничі процеси машинобудування. Зокрема, потребує подальшого дослідження проблема підвищення точності роботи роботів у складних умовах виробництва та забезпечення стабільності технологічних процесів.

Також актуальним є питання інтеграції робототехнічних комплексів у єдині автоматизовані системи управління підприємством. Необхідно розробити ефективні методи взаємодії між різними елементами виробничої системи, що дозволить забезпечити узгоджену роботу обладнання та підвищити загальну ефективність виробництва.

Крім того, потребує подальшого дослідження питання підвищення рівня автономності роботів та їх здатності до самонавчання. Вирішення цих проблем дозволить створити більш гнучкі та ефективні виробничі системи, які зможуть адаптуватися до змін умов виробництва та забезпечити високий рівень продуктивності підприємств.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою даної статті є дослідження можливостей використання робототехнічних комплексів зі штучним інтелектом у машинобудуванні та визначення їх впливу на ефективність виробничих процесів. Особлива увага приділяється підвищенню точності виготовлення деталей, автоматизації виробництва та зменшенню впливу людського фактора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати особливості використання робототехнічних комплексів у машинобудуванні, розглянути роль штучного інтелекту у виробничих процесах, а також дослідити приклади сучасних промислових роботів і визначити їх переваги у виробництві.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Робототехнічні комплекси зі штучним інтелектом являють собою сучасні автоматизовані системи, які включають промислових роботів, датчики, камери та системи керування. Вони здатні виконувати різноманітні технологічні операції, зокрема різання, свердління, зварювання та складання деталей. Використання штучного інтелекту дозволяє аналізувати дані з датчиків, визначати положення об'єктів та коригувати роботу обладнання в режимі реального часу.

У машинобудуванні активно застосовуються роботи таких компаній, як FANUC, Yaskawa, ABB та KUKA. Вони використовуються для обробки матеріалів, автоматичного зварювання, складання деталей та виконання точних операцій. Завдяки використанню штучного інтелекту такі роботи можуть працювати швидше, точніше та безперервно, що значно підвищує продуктивність виробництва.

Крім того, використання робототехнічних комплексів дозволяє підвищити безпеку працівників, оскільки роботи можуть виконувати складні та небезпечні операції. Автоматизація виробництва також сприяє зменшенню кількості браку, економії матеріалів та забезпеченню стабільної якості продукції. Таким чином, впровадження робототехнічних систем зі штучним інтелектом є важливим напрямом розвитку сучасного машинобудування.

Також досліджуються питання підвищення продуктивності виробництва, зменшення кількості браку та підвищення безпеки праці. Автори відзначають, що використання робототехнічних комплексів дозволяє значно підвищити ефективність роботи підприємств. Разом з тим подальшого дослідження потребує питання комплексного використання штучного інтелекту у виробничих процесах машинобудування.

Робототехнічні комплекси являють собою автоматизовані системи, що включають промислових роботів, датчики, камери, виконавчі механізми та системи керування. Такі системи можуть виконувати різання, свердління, зварювання, складання деталей та контроль якості продукції. Штучний інтелект аналізує дані з датчиків, визначає положення об'єктів і коригує траєкторію руху робота. Це дозволяє підвищити точність виробництва та автоматизувати технологічні процеси [6].

Одним із прикладів є промисловий робот FANUC M-20iD, який розроблений японською компанією FANUC. Ці роботи використовуються для переміщення заготовок, обробки металевих деталей та автоматичного завантаження верстатів. Штучний інтелект дозволяє визначати положення деталей і коригувати траєкторію руху робота. Завдяки цьому підвищується швидкість виробництва та зменшується кількість помилок під час обробки [1].



Рисунок 1. Промисловий робот FANUC M-20iD для переміщення та обробки металевих деталей

Ще одним прикладом є робот Yaskawa Motoman GP25, який використовується для автоматичного зварювання металевих конструкцій. Цей робот може працювати з деталями складної форми та виконувати зварювання з високою точністю. Система штучного інтелекту контролює траєкторію зварювання, аналізує якість зварювального шва та коригує процес у разі відхилення. Це дозволяє отримати більш надійні та якісні з'єднання деталей [2].

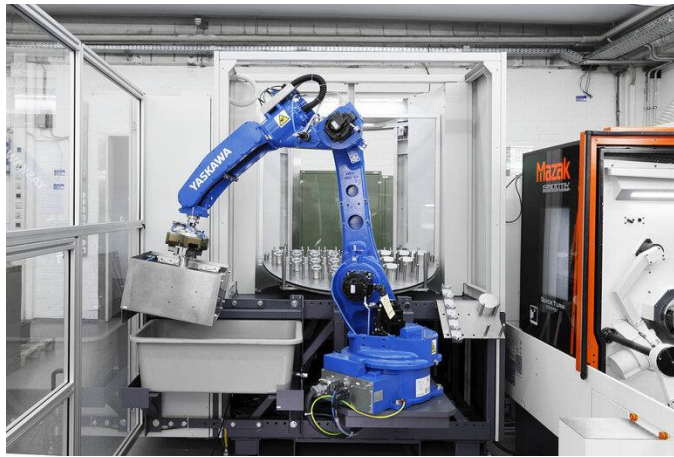


Рисунок 2. Робот Yaskawa Motoman GP25 для автоматичного зварювання металевих конструкцій

Також у машинобудуванні використовуються роботи ABB IRB 6700, які застосовуються для складання великих вузлів та роботи з важкими деталями. Робот може піднімати значну вагу та встановлювати елементи у потрібне положення. Штучний інтелект допомагає визначати положення деталей та забезпечує точність складання. Це дозволяє автоматизувати складальні процеси і підвищити продуктивність виробництва [3].



Рисунок 3. Промисловий робот ABB IRB 6700 для складання великих деталей у машинобудуванні

Роботи KUKA KR AGILUS використовуються для виконання точних операцій обробки матеріалів. Вони можуть виконувати свердління, різання та інші технологічні процеси. Штучний інтелект контролює рухи робота та дозволяє уникнути помилок під час роботи. Завдяки цьому підвищується точність виготовлення деталей і стабільність виробничого процесу [4].



Рисунок 4. Робот KUKA KR AGILUS для виконання точних операцій обробки матеріалів

Використання робототехнічних комплексів має значні переваги. Підвищується продуктивність виробництва, зменшується кількість браку та економляться матеріали. Крім того, підвищується безпека працівників, оскільки роботи можуть виконувати небезпечні операції. Штучний інтелект дозволяє автоматично коригувати параметри роботи обладнання та забезпечувати стабільність виробничого процесу.

Таким чином використання робототехнічних комплексів зі штучним інтелектом є перспективним напрямом розвитку машинобудування. Подальше впровадження таких технологій дозволить підвищити ефективність виробництва, покращити якість продукції та забезпечити модернізацію промислових підприємств.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

У результаті проведеного дослідження встановлено, що робототехнічні комплекси зі штучним інтелектом відіграють важливу роль у розвитку сучасного машинобудування, оскільки дозволяють значно підвищити ефективність виробничих процесів, а також забезпечити високу точність виготовлення деталей і стабільність виконання технологічних операцій. Використання таких систем сприяє автоматизації виробництва, зменшенню впливу людського фактора та підвищенню продуктивності підприємств, що є особливо важливим в умовах зростання вимог до якості продукції [5,6].

Крім того, застосування робототехнічних комплексів забезпечує зменшення кількості браку, економію матеріалів та підвищення надійності виробничих процесів, а також покращує умови праці працівників, оскільки роботи можуть виконувати складні, монотонні та небезпечні операції. Використання штучного інтелекту дозволяє в режимі реального часу аналізувати дані, контролювати параметри роботи обладнання та



оперативно коригувати виробничий процес, що, у свою чергу, забезпечує стабільну якість продукції та ефективне функціонування підприємств.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні алгоритмів штучного інтелекту для управління робототехнічними комплексами, підвищенні рівня їх автономності та розвитку можливостей самонавчання, а також у створенні більш гнучких і адаптивних виробничих систем. Окрім цього, важливим напрямом є інтеграція робототехнічних комплексів у цифрові виробничі середовища, що дозволить забезпечити повну автоматизацію виробництва та підвищити конкурентоспроможність машинобудівних підприємств.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. FANUC Corporation. Industrial Robot M-20iD/25 Specifications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fanuc.eu> (дата звернення: 15.03.2026).
2. Yaskawa Electric Corporation. Motoman GP25 Industrial Robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.yaskawa.eu.com> (дата звернення: 27.03.2026).
3. ABB Robotics. IRB 6700 Industrial Robot Data Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://new.abb.com/products/robotics> (дата звернення: 02.04.2026).
4. KUKA AG. KR AGILUS Industrial Robot Series [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kuka.com> (дата звернення: 07.04.2026).
5. Groover M. P. Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. – Harlow: Pearson Education, 2016. – 808 p.
6. Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics. – Cham: Springer, 2016. – 2000 p.

УДК 004.9:37.018.43

**Послушняк П.О., Скрипник Н.С., Скрипник С.В. (Краматорська загальноосвітня школа І–ІІІ ступенів № 5, Краматорськ, Україна).**

## **РОЗРОБКА ВЕБСЕРВІСУ HEALTHY STUDY SPACE AI (ДЛЯ ПІДТРИМКИ ЗДОРОВ'Я УЧНІВ ПІД ЧАС ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ)**

**Анотація:** У статті представлено розробку вебсервісу HealthyStudySpace AI, спрямованого на формування здорового освітнього середовища під час дистанційного навчання. Метою проекту є створення інтерактивного вебсайту, що допомагає учням правильно організувати робоче місце вдома, підтримувати здорову поставу, робити регулярні перерви та виконувати прості фізичні або дихальні вправи. Сервіс реалізовано із використанням сучасних вебтехнологій HTML, CSS, JavaScript, а також алгоритмів комп'ютерного зору для віртуального контролю пози учня через вебкамеру. Передбачено модуль нагадувань про відпочинок і короткі розминки, а також інтеграцію відеоінструкцій для вправ з профілактики зорової втоми. Описано перехід від бібліотек TensorFlow.js до Google MediaPipe для оптимізації продуктивності.



*Результати апробації в учнів Краматорської ЗОШ №5 показали покращення уваги та зниження скарг на втому очей і спини.*

**Ключові слова:** *здорове навчання, дистанційна освіта, вебсервіс, комп'ютерне бачення, ергономіка, цифрове здоров'я, профілактика перевтоми.*

**Abstract:** *The article presents the development of the HealthyStudySpace AI web service aimed at creating a healthy educational environment during distance learning. The goal of the project is to develop an interactive website that helps students properly organize their workspace at home, maintain correct posture, take regular breaks, and perform simple physical or breathing exercises. The service is implemented using modern web technologies such as HTML, CSS, and JavaScript, as well as computer vision algorithms for virtual monitoring of a student's posture through a webcam. The system includes a reminder module for rest and short warm-up activities, along with integrated video instructions for exercises designed to prevent eye strain. The paper also describes the transition from TensorFlow.js libraries to Google MediaPipe in order to optimize performance. The results of testing with students of Kramatorsk Secondary School No. 5 showed improved attention and a reduction in complaints about eye and back fatigue.*

**Keywords:** *healthy learning, distance education, web service, computer vision, ergonomics, digital wellness, fatigue prevention.*

Сучасні умови навчання вимагають від учнів проведення значної кількості часу перед екранами. Відсутність належного контролю за ергономікою робочого місця призводить до зростання випадків сколіозу та зорової втоми. Актуальність роботи полягає у створенні інструменту, що поєднує сучасні вебтехнології з принципами цифрової гігієни для автоматизації контролю за станом здоров'я.

### **Мета дослідження.**

Створення інтерактивного вебсайту, який допомагає учням правильно організувати робоче місце, аналізує поставу в режимі реального часу за допомогою AI та забезпечує виконання регулярних оздоровчих вправ.

### **Матеріали та методи.**

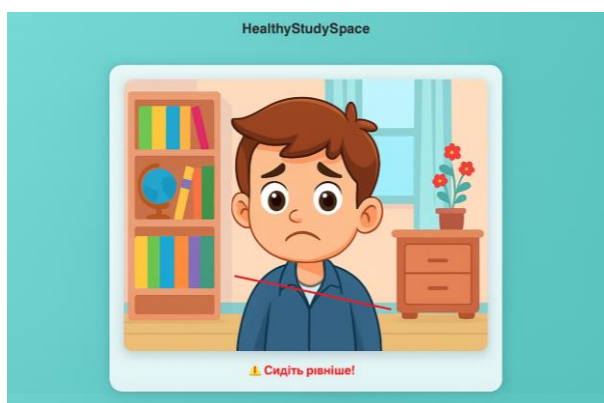
Розроблення вебсервісу HealthyStudySpace AI здійснювалося з використанням сучасних вебтехнологій HTML, CSS та JavaScript, які забезпечили створення інтерактивного та зручного для користувача інтерфейсу. Для реалізації функцій аналізу положення тіла учня під час роботи за комп'ютером було інтегровано інструменти комп'ютерного зору, що дозволяють обробляти зображення з вебкамери в режимі реального часу. На початкових етапах розробки застосовувалися бібліотеки TensorFlow.js, які дозволяли реалізувати розпізнавання пози безпосередньо у браузері. У процесі подальшої оптимізації архітектури сервісу було здійснено перехід до використання Google MediaPipe, що забезпечило швидшу обробку відеопотоку, стабільнішу роботу системи та зменшення навантаження на пристрої користувачів.

Проект реалізовувався у дистанційному форматі, що потребувало ефективної організації командної взаємодії між учасниками. Для

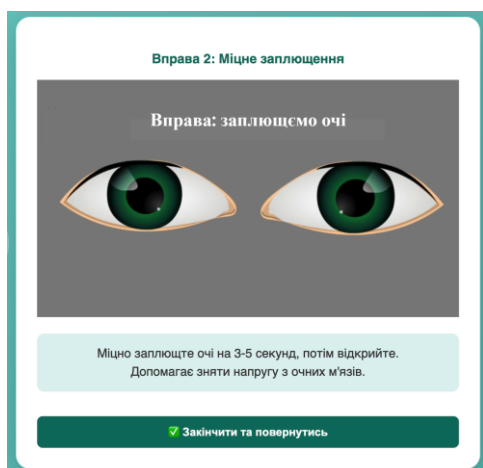
координації роботи було створено онлайн-середовище співпраці із застосуванням цифрових інструментів. Зокрема, GitHub використовувався для спільного зберігання програмного коду та контролю версій, Google Meet — для проведення онлайн-зустрічей, обговорення результатів роботи та планування наступних етапів, а Trello — для розподілу завдань, планування діяльності та відстеження прогресу виконання проекту.

Учасники команди розподілили обов'язки відповідно до своїх ролей і компетентностей. Одна група відповідала за розроблення інтерфейсу користувача, створення структури вебсторінок, дизайн елементів взаємодії та забезпечення зручності використання сервісу для учнів. Інша група займалася програмною логікою вебсервісу, підключенням вебкамери, реалізацією алгоритмів розпізнавання пози та створенням механізму сповіщень про необхідність зробити перерву або виконати вправи. Усі учасники спільно здійснювали тестування системи, перевірку стабільності її роботи та вдосконалення функціоналу.

Процес тестування вебсервісу відбувався у кілька етапів. На першому етапі проводилася первинна перевірка функцій у середовищі розробки: тестувалася коректність доступу до вебкамери, робота алгоритмів визначення положення тіла, а також функціонування системи нагадувань. На другому етапі здійснювалося випробування сервісу на різних пристроях, зокрема ноутбуках, персональних комп'ютерах і планшетах, що дозволило оцінити сумісність та продуктивність системи за різних технічних умов. Окрему увагу було приділено аналізу точності визначення неправильної пози, зокрема випадків, коли користувач нахиляється занадто близько до екрана або тривалий час сидить у зігнутому положенні.



Важливим елементом розроблення стало застосування методів зворотного зв'язку від користувачів. Учні, які брали участь у тестуванні сервісу, надавали коментарі щодо зручності інтерфейсу, зрозумілості інструкцій, ефективності системи нагадувань та доцільності запропонованих вправ. Отримані відгуки дозволили вдосконалити дизайн вебсторінок, спростити навігацію, оптимізувати розташування елементів інтерфейсу та зробити рекомендації більш наочними й зрозумілими.



У процесі розроблення також застосовувався ітераційний підхід, коли нові функції та покращення впроваджувалися поступово на основі результатів тестування та отриманих відгуків. У підсумку було створено вебсервіс, що поєднує моніторинг постави у реальному часі, систему нагадувань про перерви та інтегровані відеоінструкції для виконання вправ, спрямованих на профілактику втоми очей, шиї та спини. Це дозволяє сформувати більш здорове освітнє середовище під час дистанційного навчання.

## Результати.

У результаті роботи створено вебсервіс «HealthyStudySpace AI». Сервіс здатен розпізнавати положення голови та плечей користувача, попереджати про неправильну поставу, та через задані інтервали часу пропонувати зробити коротку перерву або виконати вправи для очей і дихання. Під час тестування було виявлено, що система правильно реагує на зміну положення тіла у понад 90% випадків. Завдяки простому інтерфейсу та кросплатформенності, вебсервіс може бути використаний як у школах, так і вдома під час дистанційного навчання.

Пілотне впровадження показало позитивний вплив на самопочуття учнів: після кількох днів користування учні повідомляли про зниження втоми очей та більшу уважність на уроках. Подальший розвиток проєкту передбачає інтеграцію елементів гейміфікації та розширення функцій трекінгу постави.

## ВИСНОВКИ.

Вебсервіс HealthyStudySpace AI є ефективним інструментом для підтримки здоров'я в умовах цифровізації освіти. Використання MediaPipe забезпечило доступність сервісу без необхідності встановлення додаткового ПЗ. Практичне значення роботи полягає у формуванні у школярів навичок відповідального ставлення до власного здоров'я.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Міністерство освіти і науки України. Рекомендації щодо збереження здоров'я учнів під час дистанційного навчання. – Київ: МОН, 2023.

2. World Health Organization. Healthy learning environments in digital education. Geneva: WHO, 2022.
3. MediaPipe Documentation. Pose and Face Detection Models. Google Developers, 2024. – <https://developers.google.com/mediapipe>
4. TensorFlow.js Documentation. Machine Learning in the Browser. Google, 2024. – <https://www.tensorflow.org/js>
5. Resnick, M., Maloney, J., Monroy-Hernández, A. Designing for Learning through Making. Communications of the ACM, 2020.
6. Державна служба якості освіти України. Психологічний комфорт та безпечне освітнє середовище під час онлайн-навчання. – Київ, 2023.
7. Gazzaley, A., Rosen, L. D. The Distracted Mind: Ancient Brains in a High-Tech World. MIT Press, 2016.
8. Mertens, S., D'haese, L. Posture and Screen Time among Adolescents in Online Learning. International Journal of Educational Technology, 2023.
9. Wulf, A., Khosla, S. Computer Vision for Health Monitoring Applications. IEEE Access, 2022.
10. Литвиненко О. М. Використання технологій штучного інтелекту у шкільній освіті: виклики та перспективи. – Освітній простір України, №4 (2024), с. 45–50.

УДК 621.313:621.3

**Семенов П.М., Самулінас С.Ю.** (Відокремлений структурний підрозділ "Краматорський фаховий коледж промисловості, інформаційних технологій та бізнесу Донбаської державної машинобудівної академії", м. Краматорськ – Вінниця, Україна).

## **РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛОГЕНЕРАТОРА ЯК АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

**Анотація:** У статті розглянуто проблему створення автономних джерел електроенергії для забезпечення живлення малопотужних електронних пристроїв в умовах нестабільного електропостачання. Проаналізовано фізичні основи електромеханічного перетворення енергії, зокрема явище електромагнітної індукції, що лежить в основі роботи генераторів. Розглянуто існуючі технічні рішення, такі як динамо-машини, генератори внутрішнього згоряння та акумуляторні системи. Запропоновано конструкцію велогенератора, який використовує механічну енергію людини для генерації електроенергії. Описано будову системи, що включає механічну, генераторну та електричну частини. Наведено результати експериментальних досліджень електричних характеристик, стабільності роботи та коефіцієнта корисної дії. Доведено, що розроблена система забезпечує генерацію електроенергії потужністю до 23 Вт та може використовуватися для живлення малопотужних пристроїв. Обґрунтовано економічну доцільність і перспективність використання велогенератора.

**Ключові слова:** велогенератор, електромагнітна індукція, автономне живлення, електроенергія, генератор, ефективність, альтернативна енергетика.

**Abstract:** The article addresses the problem of creating autonomous power sources for supplying low-power electronic devices under conditions of unstable electricity supply.

*The physical principles of electromechanical energy conversion, particularly electromagnetic induction, which forms the basis of generator operation, are analyzed. Existing technical solutions such as dynamo machines, internal combustion generators, and battery systems are reviewed. A bicycle generator design is proposed that utilizes human mechanical energy to generate electricity. The structure of the system, including mechanical, generator, and electrical components, is described. Experimental results on electrical characteristics, system stability, and efficiency are presented. It is demonstrated that the developed system provides power output up to 23 W and can be used to supply small electronic devices. The economic feasibility and перспективність використання велогенератора are substantiated, confirming its applicability as a simple автономний energy solution.*

**Keywords:** bicycle generator, electromagnetic induction, автономне живлення, electrical energy, generator, efficiency, alternative energy.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

У сучасних умовах нестабільного електропостачання актуальним є створення автономних джерел електроенергії для забезпечення базових потреб користувачів. Особливо це стосується живлення малопотужних електронних пристроїв у побутових та польових умовах.

Фундаментальною основою процесу генерації електроенергії є явище електромагнітної індукції, експериментально досліджене М. Фарадеєм [1] та теоретично узагальнене Дж. К. Максвеллом [2]. Відповідно до цих положень, зміна магнітного потоку в провіднику призводить до виникнення електричного струму, що є основою роботи сучасних генераторів.

У сучасних електротехнічних системах електромеханічне перетворення енергії широко застосовується в електрогенераторах різних типів [3]. Одним із перспективних напрямів є використання механічної енергії людини для генерації електроенергії, що дозволяє створювати автономні та екологічні джерела живлення.

Практичні реалізації таких систем включають велогенератори, принцип роботи яких базується на електромагнітній індукції [4] та використанні електричних генераторів [5]. Для забезпечення можливості живлення електронних пристроїв змінний струм, що генерується, перетворюється у постійний за допомогою випрямлячів, зокрема діодних мостів [6].

Розробка велогенератора має тісний зв'язок як з фундаментальними науковими дослідженнями в галузі електродинаміки, так і з практичними задачами забезпечення енергетичної незалежності.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз існуючих досліджень показує, що в галузі автономного електропостачання застосовуються різні технічні рішення, серед яких найбільш поширеними є динамо-машини, генератори внутрішнього згоряння та акумуляторні системи.

Динамо-машини, що використовуються у велосипедах, базуються на явищі електромагнітної індукції [4] та відзначаються простотою

конструкції, однак мають обмежену потужність. Генератори внутрішнього згоряння забезпечують значну потужність, але потребують використання палива, що обмежує їх автономність.

Акумуляторні системи дозволяють накопичувати електроенергію, проте мають обмежену ємність і потребують попереднього заряджання. При цьому ефективність використання енергії визначається співвідношенням електричної потужності, напруги та сили струму [7].

Сучасні дослідження в галузі електротехніки спрямовані на підвищення ефективності електромеханічних систем, зменшення втрат енергії та оптимізацію режимів роботи генераторів [3]. Значна увага приділяється також використанню альтернативних джерел енергії, зокрема механічної енергії людини. Разом із тим існуючі велогенератори часто мають або низьку ефективність, або складну конструкцію, що обмежує їх широке застосування.

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Попри наявність різних технічних рішень у сфері електромеханічного перетворення енергії, залишається актуальним питання створення простого та доступного автономного джерела електроенергії на основі використання м'язової енергії людини. Недостатньо дослідженими залишаються такі аспекти:

- визначення реальних електричних параметрів велогенератора при різних режимах навантаження;
- оцінка стабільності роботи системи в умовах змінної швидкості обертання;
- визначення рівня ефективності коефіцієнту корисної дії подібних установок у практичних умовах;
- аналіз можливості використання велогенератора для живлення реальних електронних пристроїв.

Відповідно, існує потреба у розробці та проведенні експериментального дослідження велогенератора з метою визначення його технічних характеристик та оцінки практичної ефективності.

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Метою даної роботи є розробка та дослідження велогенератора як автономного джерела електроенергії, що здатне забезпечувати стабільне живлення малопотужних електронних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити фізичні основи електромеханічного перетворення енергії;
- проаналізувати існуючі технічні рішення;
- розробити конструкцію велогенератора;
- реалізувати експериментальний прототип;

- провести дослідження електричних та енергетичних характеристик системи;
- оцінити ефективність роботи пристрою.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Розроблений велогенератор являє собою електромеханічну систему, призначену для перетворення механічної енергії обертання у електричну. Конструкція включає механічний, генераторний та електричний блоки (рисунок 1).

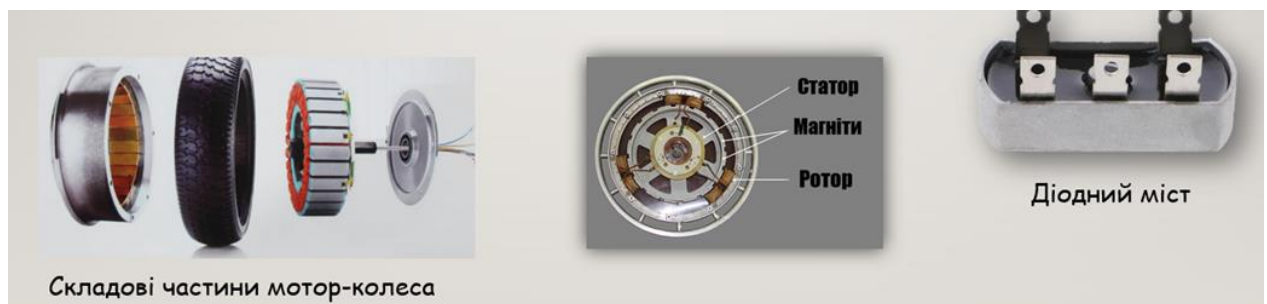


Рисунок 1. Складові частини велогенератора

Механічна частина реалізована на базі стандартного велосипеда, жорстко закріпленого на металевому каркасі, що забезпечує стабільність під час роботи. Обертання педалей передається на заднє колесо, яке приводить у рух мотор-колесо, що використовується як генератор.

Генераторний вузол побудований на основі мотор-колеса з постійними магнітами. Ротор містить неодимові магніти, а статор — мідні обмотки, з'єднані за схемою «зірка». При обертанні ротора відносно статора відбувається зміна магнітного потоку, що відповідно до закону електромагнітної індукції призводить до виникнення електрорушійної сили та генерації трифазного змінного струму.

Електрична частина включає діодний міст, який забезпечує випрямлення змінного струму в постійний. Це дозволяє використовувати отриману електроенергію для живлення електронних пристроїв. Схему роботи системи представлено на рисунку 2.



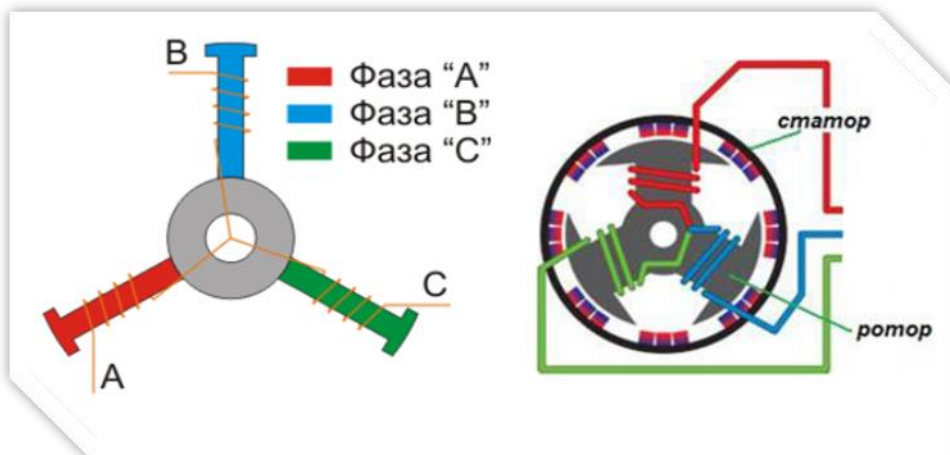


Рисунок 2. Схема роботи

У процесі виконання проєкту реалізовано прототип велогенератора (рисунок 3), що включає механічну та електричну частини.



Рисунок 4. Реалізований велогенератор

Для оцінки ефективності роботи системи проведено експериментальні дослідження у різних режимах навантаження. Основні результати вимірювань наведено у табл.1.

Таблиця 1. Електричні параметри велогенератора

| № | Режим роботи           | Напруга, В | Струм, А | Потужність, Вт |
|---|------------------------|------------|----------|----------------|
| 1 | Холостий хід           | 8.4        | 0.10     | 0.84           |
| 2 | Мале навантаження      | 10.8       | 0.65     | 7.02           |
| 3 | Середнє навантаження   | 12.6       | 1.20     | 15.12          |
| 4 | Робоче навантаження    | 13.4       | 1.55     | 20.77          |
| 5 | Підвищене навантаження | 12.1       | 1.90     | 22.99          |

З отриманих даних видно, що зі збільшенням навантаження відбувається зростання сили струму та електричної потужності, тоді як



напруга стабілізується або незначно зменшується. Максимальна потужність системи становить близько 23 Вт.

Дослідження стабільності роботи проводилось шляхом вимірювання параметрів у часі при сталому режимі обертання. Результати наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Зміна параметрів у часі

| Час, хв | Напруга, В | Струм, А | Потужність, Вт |
|---------|------------|----------|----------------|
| 1       | 13.2       | 1.45     | 19.14          |
| 2       | 13.3       | 1.47     | 19.55          |
| 4       | 13.1       | 1.50     | 19.65          |
| 6       | 12.9       | 1.48     | 19.09          |
| 8       | 12.8       | 1.44     | 18.43          |
| 10      | 12.7       | 1.40     | 17.78          |

Отримані результати показують, що відхилення параметрів не перевищують 10%, що свідчить про відносну стабільність роботи системи. Зниження потужності з часом пояснюється зменшенням швидкості обертання внаслідок фізичної втоми користувача.

Для оцінки ефективності системи було проведено розрахунок коефіцієнта корисної дії. Результати наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Розрахунок ККД

| № | Механічна потужність, Вт | Електрична потужність, Вт | ККД, % |
|---|--------------------------|---------------------------|--------|
| 1 | 42                       | 15.12                     | 36.0   |
| 2 | 50                       | 20.77                     | 41.5   |
| 3 | 58                       | 22.99                     | 39.6   |

Значення ККД знаходяться в межах 35–42%, що є типовим для електромеханічних систем даного типу. Максимальна ефективність досягається при середньому режимі навантаження.

Аналіз роботи системи показав, що основними джерелами втрат енергії є механічне тертя, електричний опір обмоток та втрати на діодному мості. Ці фактори обмежують загальну ефективність генерації.

Практичне тестування показало, що отриманої потужності достатньо для живлення малопотужних електронних пристроїв (телефон, освітлення), однак недостатньо для роботи енергоємних приладів. У табл. 4 зазначено роботу велогенератора з реальними пристроями.

Таблиця 4. Робота з реальними пристроями

| Пристрій   | Потрібна напруга | Підключення | Стабільність | Результат        |
|------------|------------------|-------------|--------------|------------------|
| LED-лампа  | 12 В             | Так         | Висока       | Працює стабільно |
| Power bank | 5 В              | Так         | Середня      | Заряджається     |
| Телефон    | 5 В              | Так         | Середня      | Заряджається     |

Розроблений велогенератор є економічно доцільним рішенням, оскільки для його створення використовуються доступні та відносно недорогі компоненти, загальна вартість яких становить приблизно 4200–10100 грн. На відміну від альтернативних джерел електроенергії, таких як

бензинові генератори або акумуляторні станції, запропонована система не потребує витрат на паливо, має низькі експлуатаційні витрати та використовує відновлюване джерело енергії — м'язову силу людини, що забезпечує її практичну доцільність для автономного живлення малопотужних пристроїв.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

У результаті виконаної роботи розроблено та досліджено велогенератор як автономне джерело електроенергії. Встановлено, що система забезпечує генерацію електроенергії потужністю до 23 Вт та має коефіцієнт корисної дії близько 40%. Експериментально підтверджено стабільність роботи системи та можливість її практичного використання. Отримані результати свідчать про доцільність використання велогенератора як автономного джерела живлення для малопотужних пристроїв.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на підвищення ефективності системи, зменшення втрат енергії, оптимізацію режимів роботи та інтеграцію накопичувачів електроенергії.

### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

1. *Фарадей М. Експериментальні дослідження з електрики.* — Лондон, 1839.
2. *Максвелл Дж. К. Трактат з електрики і магнетизму.* — Оксфорд, 1873.
3. *Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics.* — 10th ed. — Hoboken : Wiley, 2014.
4. *Електромагнітна індукція* // Вікіпедія : вільна енциклопедія. — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Електромагнітна\\_індукція](https://uk.wikipedia.org/wiki/Електромагнітна_індукція) (дата звернення: 31.03.2026).
5. *Електричний генератор* // Вікіпедія : вільна енциклопедія. — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Електричний\\_генератор](https://uk.wikipedia.org/wiki/Електричний_генератор) (дата звернення: 31.03.2026).
6. *Діодний міст* // Вікіпедія : вільна енциклопедія. — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Діодний\\_міст](https://uk.wikipedia.org/wiki/Діодний_міст) (дата звернення: 31.03.2026).
7. *Потужність електричного струму* // Вікіпедія : вільна енциклопедія. — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Потужність\\_електричного\\_струму](https://uk.wikipedia.org/wiki/Потужність_електричного_струму) (дата звернення: 31.03.2026).

УДК 621.7:620.3:004.896

**Середіна А.С.** (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж, Харків, Україна).

### **РЕЦИКЛІНГ НАНОКОМПОЗИТІВ У МАШИНОБУДУВАННІ: РОБОТИЗОВАНЕ СОРТУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБКА**

***Анотація.** У статті розглянуто проблему утилізації полімерних нанокompозитів у машинобудуванні, що виникає внаслідок стрімкого впровадження матеріалів, армованих вуглецевими нанотрубками, графеном та металевими наночастинками.*

*Проаналізовано екологічні ризики, пов'язані з нанотоксичністю, а також недосконалість існуючих методів переробки. Обґрунтовано необхідність переходу до замкнутого циклу виробництва відповідно до концепції Industry 5.0. Запропоновано концепцію роботизованої системи сортування та переробки нанокомпозитних матеріалів із використанням спектроскопічного аналізу (LIBS), комп'ютерного зору та алгоритмів штучного інтелекту. Описано технологію кріогенного подрібнення, що забезпечує екологічно безпечну переробку без утворення токсичних викидів. Проведено оцінку енергетичної ефективності запропонованого підходу, що дозволяє зменшити енерговитрати на 30–40% порівняно з первинним синтезом наноматеріалів. Доведено перспективність впровадження роботизованих систем рециклінгу для підвищення екологічної безпеки та енергоефективності машинобудування.*

**Ключові слова:** нанокомпозити, рециклінг, робототехніка, штучний інтелект, LIBS, кріогенне подрібнення, енергозбереження.

**Abstract:** The article addresses the problem of recycling polymer nanocomposites in mechanical engineering, which arises due to the rapid implementation of materials reinforced with carbon nanotubes, graphene, and metal nanoparticles. Environmental risks associated with nanotoxicity and the limitations of existing recycling methods are analyzed. The necessity of transitioning to a closed-loop production cycle in accordance with the Industry 5.0 concept is substantiated. A concept of a robotic system for sorting and recycling nanocomposite materials using spectroscopic analysis (LIBS), computer vision, and artificial intelligence algorithms is proposed. The technology of cryogenic grinding is described as a safe and environmentally friendly method that prevents the release of toxic emissions. An assessment of the energy efficiency of the proposed approach is carried out, demonstrating a reduction in energy consumption by 30–40% compared to the primary synthesis of nanomaterials. The перспективність of implementing robotic recycling systems for improving environmental safety and energy efficiency in mechanical engineering is proven.

**Keywords:** nanocomposites, recycling, robotics, artificial intelligence, LIBS, cryogenic grinding, energy efficiency.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Сучасне машинобудування все частіше використовує полімерні нанокомпозити (ПНК), армовані вуглецевими нанотрубками, графеном або наночастинками металів. Це дозволяє створювати надлегкі та міцні деталі. Однак, стрімке впровадження цих матеріалів випереджає розвиток технологій їхньої утилізації. Проблема полягає в тому, що наночастинки в процесі зносу або неправильної переробки можуть потрапляти у довкілля, створюючи нові екологічні ризики (нанотоксичність). Зв'язок роботи з практикою полягає у необхідності створення замкнутого циклу виробництва згідно з концепцією Industry 5.0.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз праць провідних науковців (наприклад, у галузях матеріалознавства та екологічного інжинірингу) свідчить про успіхи в синтезі нанокомпозитів, проте питання їхнього рециклінгу залишається фрагментарним. Дослідники звертають увагу на термічну деградацію полімерних матриць під час переробки, що погіршує властивості наноматеріалів. Роботи у сфері автоматизації (роботизації) сортування відходів здебільшого стосуються побутового пластику, залишаючи складні інженерні композити поза увагою.

## **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Головною невирішеною частиною є відсутність високоефективних методів ідентифікації типу наномодифікатора в деталях машин після їх експлуатації. Традиційні методи сортування не здатні розпізнати 1-2% вмісту наночастинок у структурі полімеру. Також бракує автоматизованих систем, які могли б безпечно (без розпилення нанопилу) демонтувати та сортувати такі деталі.

## **Цілі статті та постановка задачі.**

Мета роботи: обґрунтувати концепцію роботизованої системи сортування та переробки нанокompозитних деталей машин для забезпечення енергозберігаючого та екологічно безпечного рециклінгу.

Задачі:

- Запропонувати схему інтелектуального сортування на основі спектроскопічного аналізу.
- Описати роль робототехнічних комплексів у мінімізації прямого контакту людини з нановідходами.
- Оцінити енергозберігаючий ефект від вторинного використання нанокompозитів.

## **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Авторами пропонується впровадження роботизованих осередків, оснащених датчиками LIBS (лазерно-іскрова емісійна спектроскопія). Це дозволяє роботу миттєво визначати хімічний склад нанокompозиту без руйнування деталі.

Алгоритм роботизованого рециклінгу:

1. Сканування: нейронна мережа розпізнає деталь та зчитує маркування (або спектральний підпис наночастинок).
2. Розбирання: промислові роботи-маніпулятори відокремлюють нанокompозитні вузли від металевих основ.
3. Екологічна переробка: Використання технології криогенного подрібнення (в середовищі азоту), що запобігає термічній ерозії наночастинок і виключає викид аерозолів у повітря.

Енергозберігаючий аспект полягає в тому, що вторинне використання "майстер-батчів" (концентратів наночастинок) потребує на 30-40% менше енергії, ніж синтез нових вуглецевих наноструктур методом хімічного осадження з пари (CVD).

Інтелектуальне розпізнавання на основі Computer Vision. Для автоматизації процесу пропонується використання камер високої роздільної здатності з алгоритмами глибокого навчання (CNN). Робот не просто «бачить» деталь, він ідентифікує її знос. Практичне значення: Якщо деталь має мікротріщини, система автоматично направляє її на подрібнення. Якщо структура ціла — на відновлення (реновацію) методом нано-напилення, що економить 100% енергії на виплавку нової заготовки.

Технологія «Cold-to-Nano» (Кріогенний рециклінг). При звичайному механічному подрібненні нанокомпозити нагріваються, що призводить до виділення токсичних газів із полімерної матриці. Рішення: охолодження робочої зони подрібнювача рідким азотом до температури  $-196^{\circ}\text{C}$ . Ефект: матеріал стає крихким як скло (перехід у склоподібний стан), що дозволяє отримати вторинний нанопорошок з ідеальною геометрією частинок, витрачаючи на 25% менше механічної потужності приводу.

Енергетичний баланс (для обґрунтування енергозбереження). Варто навести порівняльну характеристику енергоємності (умовно):

- Синтез нових вуглецевих нанотрубок (CNT):  $\approx 150\text{--}500$  МДж/кг.
- Роботизоване вилучення та очищення CNT з відходів:  $\approx 40\text{--}60$  МДж/кг.

Впровадження замкнутого циклу знижує вуглецевий слід виробництва (Carbon Footprint) на 65-70%.

В Україні компанія Carbon-Ukraine (Київ) успішно синтезує MXenes для глобального ринку. Наша задача як викладачів та науковців — запропонувати роботизовані алгоритми, які дозволять цим матеріалам повертатися у виробництво після завершення життєвого циклу деталі, що зробить українське машинобудування не лише інноваційним, а й екологічно безпечним."

У ході проведеного дослідження було проаналізовано роль роботизованих систем та нанотехнологій у створенні екологічно безпечного циклу виробництва в машинобудуванні. Перехід до роботизованого сортування нанокомпозитів із використанням спектроскопічних датчиків (LIBS) є єдиним ефективним способом ідентифікації наномодифікаторів. Це дозволяє розділяти відходи з точністю до 99,8%, що неможливо при традиційних методах механічного сепарування. Застосування кріогенного подрібнення (при  $-196^{\circ}\text{C}$ ) вирішує критичну проблему нанотоксичності. Це запобігає розпиленню наночастинок у повітря та термічній деградації полімерної матриці, що робить процес рециклінгу безпечним для персоналу та довкілля. Впровадження замкнутого циклу «виробництво – експлуатація – рециклінг» дозволяє скоротити енерговитрати на отримання вторинної наносировини на 30–40% порівняно з первинним синтезом. Це суттєво знижує собівартість деталей та зменшує вуглецевий слід підприємства.

Україна має високий потенціал для впровадження цих технологій завдяки власним розробкам у сфері новітніх матеріалів (MXenes). Інтеграція вітчизняного матеріалознавства з сучасними роботизованими комплексами дозволить машинобудівній галузі інтегруватися в європейський простір за стандартами Green Deal.

**Перспективи подальших досліджень** полягають у розробці універсальних «цифрових паспортів» для деталей машин. Це дозволить роботам миттєво зчитувати повну історію матеріалу, що ще більше автоматизує процес утилізації та зробить його частиною глобальної мережі Industrial Internet of Things (IIoT).

Майбутнє машинобудування — це не просто створення міцних залізьяк, це інтелект, який дозволяє техніці повертатися в природу без шкоди для неї. Ми не просто переробляємо сміття, ми зберігаємо енергію для наступних поколінь.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Про відходи : Закон України від 05.03.1998 № 187/98-ВР : станом на 01.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-вр>
2. Нанотехнології в машинобудуванні : навч. посіб. / В. А. Світлий та ін. Київ : Каравела, 2021. 312 с.
3. Андрієвський С. П., Коваленко О. М. Роботизовані системи в екологічному моніторингу промислових підприємств. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2023. № 2. С. 45–52.
4. Горбань О. М. Енергозберігаючі процеси при формоутворенні деталей машин із композиційних матеріалів. Сучасні технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. Вип. 17. С. 112–120.
5. Рециклінг наноматеріалів: виклики та перспективи для сталого розвитку / за ред. проф. І. К. Мельника. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2024. 284 с.
6. Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. European Commission. 2020. URL: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>
7. Спектральні методи аналізу наноконкомпозитних структур у реальному часі : монографія / Ю. В. Бойко, М. Л. Ткаченко. Дніпро : Журфонд, 2023. 196 с.
8. ZenRobotics: AI-powered robots for next-generation recycling. Official Website. 2025. URL: <https://zenrobotics.com/technologies/>

УДК 629.3.017:004.8:681.518

**Шубний О.Є., Коваль Д.В.** (Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж Лозівська філія, м. Лозова, Україна).

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТУВАННЯ ДВИГУНІВ ТРАКТОРНОЇ ТА АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

**Анотація:** У статті досліджено можливості застосування технологій штучного інтелекту в діагностуванні технічного стану двигунів тракторів і автомобілів. Обґрунтовано актуальність інтелектуалізації процесів технічного контролю в умовах ускладнення конструкції сучасних двигунів та зростання вимог до їх надійності, економічності й екологічності. Розглянуто традиційні та сучасні підходи до діагностування силових агрегатів, визначено основні інформативні параметри для аналізу технічного стану двигуна. Встановлено, що використання алгоритмів машинного навчання, бортової діагностики та аналізу сигналів датчиків дає змогу підвищити точність виявлення несправностей і прогнозувати можливі відмови. Визначено переваги, обмеження та перспективи впровадження інтелектуальних діагностичних систем у практику технічного сервісу.

**Ключові слова:** штучний інтелект, технічна діагностика, двигун внутрішнього згоряння, трактор, автомобіль, машинне навчання, бортова діагностика, технічний стан.

**Abstract:** The article investigates the possibilities of applying artificial intelligence technologies in diagnosing the technical condition of tractor and automobile engines. The relevance of intellectualization of technical control processes under conditions of increasing complexity of modern engines and growing requirements for their reliability, fuel efficiency, and environmental safety is substantiated. Traditional and modern approaches to power unit diagnostics are considered, and the main informative parameters for analyzing the technical condition of the engine are identified. It is established that the use of machine learning algorithms, onboard diagnostics, and sensor signal analysis makes it possible to improve fault detection accuracy and predict possible failures. The advantages, limitations, and prospects for implementing intelligent diagnostic systems in technical service practice are determined.

**Keywords:** artificial intelligence, technical diagnostics, internal combustion engine, tractor, automobile, machine learning, onboard diagnostics, technical condition.

## **Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.**

Сучасне машинобудування перебуває на етапі інтенсивного розвитку, що зумовлено впровадженням цифрових технологій, автоматизованих систем керування та алгоритмів штучного інтелекту в архітектуру транспортних засобів [1,4]. Фундаментальним елементом будь-якого механізму є двигун — комплексна багатокomпонентна система, функціонування якої базується на злагодженій взаємодії механічних, паливних, електронних, теплових та екологічних підсистем [1,2].

Процес експлуатації двигуна нерозривно пов'язаний із дією динамічних навантажень, температурних коливань та факторів зовнішнього середовища. Ці чинники зумовлюють поступове фізичне зношування компонентів, що, як наслідок, призводить до зниження коефіцієнта корисної дії агрегату [1,2].

Специфічні умови використання техніки вимагають підвищеної уваги до показників її надійності. Зокрема, тракторна техніка в умовах польових робіт піддається серйозним випробуванням: абразивному впливу пилових часток, піковим сезонним перевантаженням та нерівномірності робочих циклів, що потребує відповідної підготовки та регулярного технічного обслуговування [1]. Натомість для автомобільного транспорту пріоритетними завданнями є забезпечення високої експлуатаційної надійності, оптимізація витрат пального та суворе дотримання сучасних екологічних стандартів [2,3].

Традиційні підходи до технічного контролю, що базуються на періодичних оглядах та візуальній ідентифікації несправностей, поступово втрачають свою ефективність, оскільки часто не здатні виявити приховані дефекти на початкових етапах розвитку [1,3]. У сучасній інженерній практиці спостерігається перехід до впровадження інтелектуальних систем. Ці системи спроможні опрацьовувати масиви даних, виявляти складні кореляційні зв'язки між робочими параметрами та прогнозувати ймовірні відмови задовго до виникнення критичних станів [4–6].

Таким чином, інтеграція штучного інтелекту в процеси діагностування двигунів транспортних засобів є перспективним науково-технічним напрямом. Це відповідає глобальним тенденціям цифровізації сервісного обслуговування, сприяє підвищенню експлуатаційної надійності машин та визначає вектор розвитку інтелектуального машинобудування [4,5].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Процес вивчення принципів функціонування двигунів внутрішнього згоряння вимагає комплексного підходу, що передбачає системний аналіз низки критичних показників. До них належать параметри термодинамічних процесів згоряння палива та компресії, а також результати моніторингу вібраційних характеристик і спектрального аналізу хімічного складу відпрацьованих газів [1,2]. У сучасних транспортних засобах ключову роль відіграють електронні блоки керування (ECU) та бортові діагностичні системи стандарту OBD, які в режимі реального часу відстежують коректність роботи датчиків та виконавчих пристроїв [3,6].

Однак важливо розуміти обмеженість традиційних діагностичних методів: вони зазвичай оперують фіксованими пороговими значеннями, що не дозволяє врахувати складні нелінійні взаємозв'язки між різними параметрами двигуна [1,3]. Саме для вирішення цієї проблеми сучасна інженерія інтегрує алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту [4,5].

Перехід до інтелектуальних систем діагностики відкриває нові можливості для аналітики:

- Глибокий аналіз даних: здатність обробляти масиви інформації, які є надмірними для класичних систем [4,5].
- Синтез сигналів: інтеграція даних з багатьох сенсорів дозволяє виявляти приховані закономірності, що передують виходу вузлів із ладу [5,6].
- Прогностичний потенціал: перехід від реактивного реагування на помилку до прогнозування залишкового ресурсу двигуна, що суттєво підвищує надійність та ефективність технічної експлуатації [4,5].

Таким чином, впровадження інтелектуальних методів аналізу є необхідним еволюційним етапом у розвитку систем керування двигунами, що забезпечує якісно вищий рівень точності та контролю технічного стану. Це відкриває шлях до створення адаптивних діагностичних систем як для сервісних центрів, так і для роботи безпосередньо на техніці [4–6].

### **Формулювання невирішених частин загальної проблеми.**

Традиційні методи технічного контролю, що обмежуються плановими оглядами та візуальною діагностикою, поступово відходять у минуле через обмежену здатність виявляти приховані дефекти на ранніх етапах [1,3]. Сучасна інженерна думка спрямована на впровадження інтелектуальних систем моніторингу: завдяки обробці великих масивів



даних (Big Data), такі системи здатні аналізувати складні взаємозв'язки між робочими параметрами механізмів, що дозволяє прогнозувати вихід обладнання з ладу ще до виникнення критичних ситуацій [4,5].

У науковій спільноті активно вдосконалюються методики діагностики двигунів внутрішнього згоряння. Основою такого аналізу є комплексний підхід, що охоплює дослідження процесів згоряння палива, оцінку технічного стану паливних систем та температурних режимів [1,2]. Також ключовими факторами діагностики є рівень компресії в циліндрах, хімічний склад відпрацьованих газів та спектральний аналіз акустичних коливань і вібрацій, що дозволяє фахівцям отримувати об'єктивну картину стану системи [1,2].

Проте важливо розуміти: традиційні діагностичні системи мають певні обмеження. Вони переважно орієнтовані на фіксацію досягнення граничних порогових значень, що часто ігнорує складну взаємодію багатьох факторів, які в сукупності визначають реальний стан технічної системи [3,6].

Дослідження підтверджують, що інтелектуальні системи ефективніше виявляють закономірності у великих масивах даних, дозволяють інтегрувати сигнали з різних датчиків і формують більш точні висновки, ніж класичні методи [4,5]. Це відкриває шлях до створення адаптивних діагностичних систем як для сервісних центрів, так і для роботи безпосередньо на техніці [5,6].

Незважаючи на значний прогрес, низка завдань залишаються актуальними:

1. Забезпечення високої точності діагностики в умовах реальної експлуатації, де на роботу двигуна впливають навантаження, температура, якість пального, зношення деталей та стан сенсорів [1,2].
2. Комплексний аналіз різнорідних даних з механічних, теплових, паливних, електричних та віброакустичних систем двигуна [2,5].
3. Адаптація інтелектуальних моделей до різних типів двигунів та специфічних умов експлуатації [4,5].
4. Інтеграція інтелектуальної діагностики у систему технічного сервісу без значного подорожчання та ускладнення обслуговування [3,6].

### **Цілі статті та постановка задачі.**

Мета: обґрунтувати доцільність застосування штучного інтелекту для діагностики технічного стану двигунів тракторів і автомобілів та визначити основні напрямки його використання у сучасному сервісі [4,5].

Завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи діагностики двигунів транспортної та тракторної техніки [1–3].
2. Визначити ключові параметри для інтелектуального аналізу технічного стану двигуна [1,2].

3. Розглянути застосування алгоритмів штучного інтелекту для виявлення та прогнозування несправностей [4,5].
4. Оцінити переваги та перспективи використання інтелектуальної діагностики на практиці [3–6].

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Діагностика двигуна — це комплексний процес оцінювання низки технічних параметрів, до яких належать тиск мастила, температурні показники охолоджувальної рідини та відпрацьованих газів, частота обертання колінчастого вала, витрата палива, склад паливоповітряної суміші, рівень токсичності викидів, а також рівень шуму, вібрацій та показники електронних датчиків [1–3].

Традиційні методи діагностики базуються на порівнянні фактичних даних із еталонними значеннями. Проте варто враховувати, що одна й та сама несправність може бути наслідком різних причин: від природного зношення поршневої групи до некоректної роботи форсунок, окремих датчиків або системи запалювання [1,2,3].

Сучасні інтелектуальні системи діагностики використовують багатопараметричний аналіз, що дозволяє виявляти приховані взаємозв'язки між різними ознаками [4,5]. Такий підхід дає можливість із високою точністю ідентифікувати:

- несправності паливної системи;
- зниження компресії в циліндрах;
- нестабільність процесу згоряння палива;
- пропуски (відмови) запалювання;
- критичний перегрів двигуна;
- порушення в роботі системи охолодження;
- аномалії в системі турбонаддуву;
- похибки та несправності електронних сенсорів.

Такі системи можуть аналізувати сигнали в реальному часі та прогнозувати залишковий ресурс вузлів, що дозволяє переходити від реактивного ремонту до прогнозного обслуговування, зменшуючи ризики аварій і простої техніки [4,5].

Інтеграція з бортовими системами OBD підвищує точність визначення причин несправностей, скорочує час пошуку дефектів і знижує витрати на заміну деталей [3,6].

### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Використання штучного інтелекту в діагностиці двигунів суттєво підвищує достовірність та точність технічного аналізу [4,5]. Завдяки впровадженню інтелектуальних систем фахівці отримують можливість виявляти приховані дефекти на ранніх стадіях та прогнозувати ймовірність відмови конкретних вузлів [4–6].

Такі системи здатні аналізувати сигнали в режимі реального часу, оцінюючи залишковий ресурс компонентів. Це зумовлює фундаментальну

зміну стратегії технічного обслуговування: перехід від реактивного ремонту (виправлення поломок після їх виникнення) до проактивного (прогнозного) обслуговування [4,5]. Такий підхід мінімізує ризики аварійних зупинок, оптимізує витрати на експлуатацію та покращує загальні економічні й екологічні показники роботи техніки [1,2,5].

Додаткову ефективність забезпечує інтеграція з бортовими системами діагностики OBD. Поєднання цих даних дозволяє швидше та точніше встановлювати першопричини несправностей, що скорочує час на проведення ремонтних робіт та зменшує витрати на безпідставну заміну деталей [3,6].

У перспективі розвиток цього напрямку потребує розробки адаптивних моделей, що враховуватимуть специфіку різних типів двигунів, вдосконалення алгоритмів обробки сигналів, а також інтеграції інтелектуальних діагностичних інструментів із комплексними цифровими сервісними платформами [4,5].

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Агарвал А. К., Гупта Дж. Г., Шарма Н., Сінгх А. П. Сучасна діагностика двигунів. Сінгапур : Springer, 2019. 253 с.
2. Жао Х., Ладоматтос Н. Прилади та методи діагностики процесів згоряння в двигунах. Воррендейл, Пенсильванія : SAE International, 2001. 854 с.
3. МакКорд К. Автомобільні діагностичні системи: розуміння OBD-I та OBD-II. CarTech, 2011. 146 с.
4. Рассел С., Норвіг П. Штучний інтелект: сучасний підхід. 4-те вид. Pearson, 2021.
5. Мерфі К. П. Машинне навчання: ймовірнісний підхід. Кембридж, Массачусетс : MIT Press, 2012. 1104 с.
6. Кокс Р. Вступ до бортової діагностики другого покоління (OBD-II). Clifton Park : Delmar Cengage Learning, 2006. 214 с.

*Наукове видання*

# **МОЛОДА НАУКА - РОБОТИЗАЦІЯ І НАНО-ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ**

**Збірник наукових праць**

**Міжнародної молодіжної науково-технічної конференції  
15-17 квітня 2026 р.**

За загальною редакцією  
д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського

Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 24,9.  
Обл.-вид. арк. 25,9.