

**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Міністерство освіти і науки України**

**Донбаська державна машинобудівна академія
Міністерство освіти і науки України**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СЕНЧИШИН ВІКТОР СТЕПАНОВИЧ

УДК 621.791.92

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ
ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ**

05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології
(шифр і назва спеціальності)
05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.С. Сенчишин

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор
Пулька Чеслав Вікторович

***Ідентичність всіх примірників
дисертації ЗАСВІДЧУЮ:***

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.02,
кандидат технічних наук, доцент _____

С.Л. Міранцов

Тернопіль – 2021

АНОТАЦІЯ

Сенчишин В.С. Підвищення ефективності індукційного наплавлення шляхом застосування механічної вібрації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології». –Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності індукційного наплавлення порошкоподібними твердими сплавами шляхом застосування вертикальної та горизонтальної механічної вібрацій, що дозволило підвищити експлуатаційні характеристики та стабільності товщини шару наплавленого металу.

Підвищення довговічності та надійності робочих поверхонь деталей машин і механізмів є важливими завданнями подальшого розвитку промислового комплексу України. Ці процеси визначають технологічну ефективність роботи ґрунтообробної та збиральної техніки загалом. Рішення таких завдань, зазвичай, здійснюють з метою підвищення їх стійкості проти спрацювання та одночасного забезпечення самозагострювання в процесі експлуатації і досягається за рахунок зміцнення робочих поверхонь різними методами наплавлення.

В сільському господарстві широко використовують тонкі деталі у вигляді робочих органів ґрунтообробних і збиральних машин, а саме: лемехи плугів, лапи культиваторів, диски луцильників, ножі-гичкорізи та інші, які працюють в умовах абразивного спрацювання та значних статистичних і динамічних навантажень. Вище згадані деталі повинні володіти високою міцністю і зносостійкістю. Їх процес зношування протікає при неперервній взаємодії металу з ґрунтом і рослинами, що в свою чергу призводить до затуплення леза в процесі експлуатації. З метою забезпечення різальних властивостей, робочі

органи повинні бути схильні до самозагострювання в процесі експлуатації. Найкращим чином ці вимоги забезпечуються виготовленням біметалевих (двохшарових) робочих деталей, міцність яких забезпечується основним матеріалом, з якого виготовлений робочий орган, а зносостійкість і самозагострювання - плакуючим шаром нанесеним на основний метал. Самозагострювання залежить від співвідношення товщини і зносостійкості основного і плакуючого прошарків.

В роботі проведено огляд існуючих методів наплавлення тонких деталей машин, в тому числі деталей ґрунтообробних машин, представлено їх переваги та недоліки. Показано що, для зміцнення деталей ґрунтообробних знарядь і інших деталей сільськогосподарських машин найбільш широко застосовується індукційне наплавлення зносостійкими порошкоподібними твердими сплавами.

Проте основним недоліком процесу індукційного наплавлення є низька стабільність товщини наплавленого шару металу і, відповідно, незадовільна зносостійкість робочих органів у процесі їх експлуатації.

Розглянуто область застосування механічної вібрації при зварюванні та обробленні деталей після наплавлення. Відзначено, що застосування віброоброблення в процесі зварювання та після наплавлення призводить до утворення рівномірної і більш дрібнозернистої структури металу.

На основі аналізу запропоновано удосконалений спосіб індукційного наплавлення робочих поверхонь тонких деталей машин з застосуванням механічної вібрації та способом її прикладення до деталі в процесі наплавлення, що є актуальним науково-технічним завданням.

Крім того розглянуто конструкції індукторів та нагрівальних систем для індукційного наплавлення тонких деталей, в тому числі і дисків, які дозволяють концентрувати потужність в зоні наплавлення для досягнення рівномірної температури в зоні наплавлення. Оскільки порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу за рахунок теплопередачі, що є важливим для досягнення рівномірної товщини наплавленого шару металу, а також проведений аналіз конструкцій установок та автоматичних ліній для

індукційного наплавлення тонких деталей.

В роботі проведений аналіз і синтез досліджень вібраційної обробки металевих розплавів. Розглянуто вплив вібраційної обробки на якість зварних з'єднань, а також на процес кристалізації металевих розплавів і їх структуру після остигання металу. На основі положення колоїдної хімії і атомної фізики, розроблена розрахунково-математична модель для оцінки параметрів структури наплавлень за вібрації. В основу моделі покладені математичні співвідношення, що описують розпад структурних складових при наплавленні при застосуванні вібрації. За допомогою розробленої моделі встановлено, що оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу досягаються за амплітуди та частоти механічних коливань 0,2 мм та 50 Гц відповідно. Отримані розрахунки добре узгоджуються з отриманими експериментальними даними, що підтверджує коректність і достатню точність сформульованої моделі.

Для експериментального дослідження зміни відхилення товщини шару наплавленого металу та його стійкості проти спрацювання залежно від впливу амплітуди та частоти коливання і способу прикладання механічної вібрації було розроблено спеціальні методики та спеціальне лабораторне обладнання.

На основі проведених експериментальних досліджень показано, що застосування механічної вібрації в процесі наплавлення порошкоподібним твердим сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт1) на сталь Ст. 3 призводить до зміни розмірів структурних складових карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$ та рівномірного розподілу вмісту хрому по товщині наплавленого шару металу, при цьому структурні складові подрібнюються з (10...12) мкм без вібрації до (7...10) мкм при вертикальній та до 3,5...7 мкм при горизонтальній вібрації.

В роботі показано, що механічна вібрація в процесі наплавлення із застосуванням порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 (Сормайт 1) дозволяє підвищити зносостійкість наплавленого шару металу з 2,2 без вібрації до 3,1 та 3,4 при вертикальній і горизонтальній вібрації та твердість наплавленого шару металу з 3500 МПа до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно. На основі аналізу гістограм і полігонів щільності розподілу випадковості процесу функціональної

зміни товщини відхилення наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі встановлено, що відхилення товщини шару наплавленого металу знаходиться в межах: без вібрації (0,62...0,87) мм; з вертикальною вібрацією (0,41...0,51) мм; з горизонтальною вібрацією (0,07...0,11) мм.

Експериментально встановлено, що при застосуванні горизонтальної вібрації відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі від її раціонального значення рівного 1 мм знаходиться у допустимих межах від 0,03 мм до 0,04 мм за зміни амплітуди коливань (0,2...0,35) мм, напруги на контурі високочастотного генератора (5,3...5,8) кВ і часу наплавлення (30...40) с. За результатами аналітично-емпіричних досліджень встановлені раціональні параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної горизонтальної вібрації: амплітуда коливання (0,2...0,35) мм; середня напруга наплавлення 5,5 кВ; середній час наплавлення 35 с.

З використанням результатів проведених у дисертаційній роботі аналітичних та експериментальних досліджень розроблена трипозиційна роторна лінія для індукційного наплавлення сталевих дисків на базі технологічного процесу із застосуванням механічної вібрації, які захищені 4 патентами на корисні моделі України.

Вона дозволяє здійснювати на першій позиції завантаження і розвантаження дисків, на другій – одночасне засипання шихти, а на третій – одночасне наплавлення всієї зони та механічні горизонтальні коливання деталі амплітудою 0,2 мм та частотою 50 Гц. Механізм горизонтальних коливань, змонтований у обертаючому столі, в якому на кожній із трьох позицій виконані прорізи в які встановлено корпуси, з можливістю їх вільного переміщення у горизонтальному напрямку, що містять шпинделі із тризубими фіксаторами, корпуси оснащені електромагнітами з датчиками годинникового типу та пружинами і встановлені за допомогою гнучких ланок на опорах кочення задля їх переміщення по напрямних, які змонтовані в обертаючому столі на місцях виконаних прорізів, а електромагніти механізму завантаження-розвантаження дисків виконані з трапецієподібним заглибленням із можливістю зручного

встановлення та знімання деталей у тризубих фіксаторах.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розвитку методології розрахунку оптимальних параметрів структури наплавленого металу в основі якої покладені співвідношення, що описують розпад структурних складових при індукційному наплавленні зносостійким порошкоподібним сплавом із застосуванням механічної вібрації в процесі наплавлення. Подрібнення структури вібраційним полем проаналізовано таку його проміжну стадію, як коагуляцію і взаємодію його частинок, розглядаючи рідкий метал як електроліт. Отримані математичні формули для визначення значень амплітуди і частоти вібрації, які забезпечують відповідні розміри структурних складових, що дозволяють покращити службові характеристики наплавленого шару металу.

Наукова новизна отриманих результатів:

- *вперше* розроблено розрахунково-математичну модель, яка описує зміну параметрів структури наплавленого шару металу залежно від співвідношення характеристик і властивостей порошкоподібних сплавів та отримано аналітичні залежності для визначення амплітуди та частоти коливань за яких забезпечуються оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу;

- встановлено, що застосування механічної вібрації в процесі наплавлення порошкоподібним твердим сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт1) призводить до зміни розмірів структурних складових карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$, які подрібнюються з 10 ... 12 мкм без вібрації до 7 ... 10 мкм при вертикальній і 3,5 ... 7 мкм при горизонтальній вібрації та рівномірного розподілу вмісту хрому по товщині наплавленого шару металу.

- *вперше* показано, що механічна вібрація в процесі наплавлення призводить до підвищення зносостійкості наплавленого металу з 2.2 без вібрації до 3.1 та 3.4 відповідно при вертикальній та горизонтальній вібрації із застосуванням порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 (Сормайт 1) та зростання твердості наплавленого шару металу з 3500 МПа до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно;

– отримано емпіричні математичні моделі товщини відхилення наплавленого металу залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення та способів прикладання механічної вібрації.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблена технологія, обладнання та обґрунтовані основні параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації в процесі наплавлення тонких деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин, які дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики наплавлених деталей та стабільність товщини шару наплавленого металу.

- розроблені рекомендації для виробничого застосування індукційного способу наплавлення деталей машин із застосуванням механічної вібрації.

Результати роботи пройшли виробничу перевірку на підприємствах: ПП «Чіп» (Волинська обл., м. Володимир-Волинський) та KZESO ПрАТ «Каховський завод електрозварювального устаткування» (Херсонська обл., м. Каховка), а також використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців освітнього рівня бакалавр і магістр за спеціальністю «Зварювання» та 131 «Прикладна механіка» під час вивчення дисциплін «Наплавлення та напилення», «Підвищення зносостійкості та відновлення спрацьованих деталей машин та механізмів», «Прогнозування розвитку зварювальної науки і техніки».

Ключові слова: індукційне наплавлення, механічна вібрація, зносостійкість, амплітуда коливань, порошкоподібний твердий сплав, товщина наплавленого металу.

ANNOTATION

Senchyshyn V.S. Improving the efficiency of induction surfacing by applying mechanical vibration. – Qualifying scientific work, manuscript copyright.

Ph. D. thesis in Engineering Science by speciality 05.03.06 - «Welding and related processes and technologies». - Ternopil Ivan Puluy National Technical University, Ternopil.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem of increasing the efficiency of induction surfacing by powdered hard alloys by applying vertical and horizontal mechanical vibrations, which allowed to increase the operational characteristics and stability of the deposited metal layer thickness.

Improving the durability and reliability of machine parts and mechanisms working surfaces are important tasks for the further development of Ukraine industrial complex. These processes determine the technological efficiency of tillage and harvesting equipment in general. The solution of such problems, as a rule, is carried out for the purpose of increase the resistance against wear and at the same time providing self-sharpening in the course of operation and is reached at the expense of working surfaces strengthening by various methods of surfacing.

In agriculture, thin parts are widely used in the form of working bodies of tillage and harvesting machines, namely: plowshares, cultivator paws, cultivator discs, knife-cutters and others that work in abrasive operation conditions with significant statistical and dynamic loads. The above parts must have high strength and wear resistance. Their wear process takes place with the continuous interaction of the metal with the soil and plants, which in turn leads to blunting of the blade during operation. In order to ensure the cutting properties, the working bodies must be subject to self-sharpening during operation. These requirements are best ensured by the manufacture of bimetallic (two-layer) working parts, the strength of which is provided by the base material from which the working body is made, and wear resistance and self-sharpening - by the plating layer coated on the base metal. Self-sharpening depends on the ratio of thickness and wear resistance of the main and plating layers.

The thesis presents the existing methods of thin machine parts surfacing, including parts of tillage machines, presents their advantages and disadvantages. It's shown that to strengthen the details of tillage and other parts of agricultural machinery most widely used induction surfacing by wear-resistant powdery hard alloys.

However, the main disadvantage of the induction surfacing process is the low stability of the metal-deposited layer thickness and unsatisfactory wear resistance of the working bodies during their operation.

The field of application of mechanical vibration during welding and processing of details after surfacing is considered. It is noted that the use of vibration treatment during welding and after surfacing leads to the formation of a uniform and more lower-grained metal structure.

Based on the analysis, an improved method of induction surfacing of working surfaces of thin machine parts with the use of mechanical vibration and a method of its application during the surfacing process proposed, which is an urgent scientific and technical task.

In addition, the design of inductors and heating systems for induction surfacing of thin parts, including disks, which allow concentrate power in the surfacing zone to achieve a uniform temperature in the surfacing zone are considered. Since the powdered hard alloy melts from the surface of the base metal due to heat transfer, which is important to achieve a uniform thickness of the weld metal layer, as well as the analysis of plant designs and automatic lines for induction surfacing of thin parts considered.

The analysis and synthesis of researches of metal melts vibration processing are carried out in the work. The influence of vibration treatment on the quality of welded joints, as well as on the process of crystallization of metal melts and their structure after cooling of the metal is considered. Based on the basic provisions of colloid chemistry and atomic physics, calculation-mathematical model developed to estimate the parameters of vibration surfacing structure. The model based on mathematical relations describing the decay of structural components during surfacing by using vibration. By using the developed model, it is established that the optimal dimensions

of the structural components of the weld metal are achieved at the amplitudes and frequencies of mechanical oscillations 0.2 mm and 50 Hz, respectively. The obtained calculations are in good agreement with the obtained experimental data, which confirms the correctness and sufficient accuracy of the formulated model.

Special techniques and special laboratory equipment has been developed for the experimental study of changes in the deviation of the deposited metal layer thickness and its wear resistance depending on the influence of amplitude and frequency of oscillation and the method of applying mechanical vibration.

Based on the conducted experimental researches it is shown that application of mechanical vibration in the course of surfacing by a powdery hard alloy III-C1 (Sormight1) on steel CT3 leads to a change in the size of the structural components. For the carbide types $(Fe, Cr)_7C_3$ and $(Fe, Cr)_3C$ and uniform distribution of the chromium content in the thickness of the deposited metal layer, during which structural components are crushed from (10 ... 12) microns without vibration, up to (7 ... 10) microns with vertical and up to 3.5 ... 7 microns during horizontal vibration.

It is shown that the mechanical vibration in the process of surfacing by using a powdered hard alloy III-C1 (Sormight1) allows to increase the wear resistance of the weld metal layer from 2.2 without vibration. With vertical and horizontal vibration 3.1 and 3.4, and the hardness of the weld metal layer from 3500 MPa without vibration to 4800 MPa and 5400 MPa, with vertical and horizontal vibration. Based on the analysis of histograms and polygons of randomness distribution of functional change process of the deposited metal layer thickness deviation on the working surface of the part, it is established that the deviation of the deposited metal layer thickness is within: without vibration (0.62... 0.87) mm; with vertical vibration (0.41... 0.51) mm; with horizontal vibration (0.07... 0.11) mm.

It is experimentally established that when applying horizontal vibration, the deviation of the thickness of the deposited metal layer on the working surface of the part from its rational value of 1 mm is within acceptable limits from 0.03 mm to 0.04 mm. Changes in the amplitude of oscillations (0.2... 0.35) mm. Voltage on the circuit of the high-frequency generator (5.3... 5.8) kV, surfacing time (30... 40) s. According

to the results of analytical and empirical studies, rational parameters of induction surfacing with the use of mechanical horizontal vibration have been established: oscillation amplitude (0.2... 0.35) mm; average surfacing voltage 5.5 kV; average surfacing time 35 s.

Using the results of analytical and experimental research conducted in the dissertation, a three-position rotor line for induction surfacing of steel disks based on the technological process using mechanical vibration, which are protected by 4 patents for utility models of Ukraine is developed.

It allows on the first position to load and unload disks, on the second position - simultaneous filling of the charge and on the third position - the simultaneous surfacing of the entire area and mechanical horizontal oscillations of the part with an amplitude of 0.2 mm and a frequency of 50 Hz. The mechanism of horizontal oscillations, mounted in a rotating table, in which at each of the three positions made slots in which the housings are installed, with the possibility of their free movement in the horizontal direction. The housings contain spindles with trident locks and are equipped with electromagnets with clock-type sensors, and springs that are mounted by means of flexible links on the rolling bearings to move them along the guides, which are mounted in a rotating table in the slots. Electromagnets of the mechanism of loading and unloading of disks are executed with trapezoidal deepening with a possibility of convenient installation and removal of details in trident clamps.

The scientific novelty of the dissertation is in the development of a methodology for calculating the optimal parameters of the weld metal structure, which is based on relations describing the decay of structural components during induction surfacing by wear-resistant powder alloy using mechanical vibration during surfacing. The grinding of the structure by the vibration field analyzed its intermediate stage as coagulation and interaction of its particles, considering the liquid metal as an electrolyte. Mathematical formulas are obtained to determine the values of the amplitude and frequency of vibration, which provide the appropriate size of the structural components, which can improve the performance of the deposited layer of metal.

Scientific novelty of the obtained results:

- *for the first time* a calculation-mathematical model was developed, which describes the change of the structure parameters of the deposited metal layer depending on the ratio of characteristics and properties of powdered alloys and obtained analytical dependences to determine the amplitude and frequency of oscillations which provide optimal dimensions;

- found that the use of mechanical vibration in the process of surfacing with a powdered hard alloy type ПГ-C1 (Sormight 1) leads to a change in the size of the structural components. For the carbide types $(Fe, Cr)_7C_3$ and $(Fe, Cr)_3C$, which are crushed from (10 ... 12) microns without vibration, up to (7 ... 10) microns with vertical and up to 3.5 ... 7 microns during horizontal vibration;

- it is shown for the first time that mechanical vibration in the welding process leads to an increase in the wear resistance of the weld metal from 2.2 without vibration to 3.1 and 3.4, respectively, with vertical and horizontal vibration. With using a powdered hard alloy ПГ-C1 (Sormight 1) and increasing the hardness of the deposited metal layer from 3500 MPa to 4800 MPa and 5400 MPa, respectively;

– empirical mathematical models of the deviation thickness of the weld metal depending on the change of the main parameters of induction surfacing and methods of mechanical vibration application are obtained.

The practical significance of the obtained results:

- developed technology, equipment and substantiated the main parameters of induction surfacing with the use of mechanical vibration in the process of surfacing thin parts of tillage agricultural machines, which increase the performance of welded parts and the stability of the deposited metal layer thickness.

- developed recommendations for the industrial application of the induction method of surfacing of machine parts using mechanical vibration.

The results of the work were tested at the enterprises: PE "Chip" (Volyn region, Volodymyr-Volynskyi) and KZESO PJSC "Kakhovka plant of electric welding equipment" (Kherson region, Kakhovka). In addition are used in the educational process in preparation Bachelor's and Master's degree specialists in "Welding" and 131 "Applied Mechanics" in the study of disciplines "Surfacing and spraying", "Improving

wear resistance and restoration of used parts of machines and mechanisms",
"Forecasting the development of welding science and technology".

Keywords: induction surfacing, mechanical vibration, wear resistance,
amplitude of oscillations, powdered hard

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у закордонних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз

1. Pulka Ch.V. Improving induction surfacing equipment and technology / Ch.V. Pulka, V.Ya. Gavrilyuk, **V.S. Senchishin** // Welding International. 2014. Vol. 28. No 4. P. 320-323. (**Scopus**). *(Здобувачем запропоновано пристрій і нову технологію індукційного наплавлення)*.

Публікації, що входять до переліку фахових видань

2. Пулька Ч.В. Методика визначення амплітуди коливань електромагнітного вібратора при індукційному наплавленні / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик // Вісник ТНТУ. 2011. № 4. С. 120 - 125. *(Здобувачем розроблено методику дослідження)*

3. Пулька Ч.В. Влияние вибраций детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла / Ч.В. Пулька, О.М. Шаблій, **В.С. Сенчишин** та ін. // Автоматическая сварка. 2012. № 1. С. 27 - 29. *(Здобувачем проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу)*

4. **Сенчишин В.С.** Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор) / В.С. Сенчишин, Ч.В. Пулька // Автоматическая сварка. 2012. № 9. С. 48 - 54. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*

5. Пулька Ч.В. Влияние технологических схем индукционной наплавки на стабильность толщины наплавленного слоя / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.С. Базар // Автоматическая сварка. 2013. №4. С. 65 - 67. *(Здобувачем проведено аналіз впливу параметрів наплавлення на товщину наплавленого шару)*

6. Пулька Ч.В. Влияние частоты тока на свойства наплавленного металла при индукционной наплавке / Ч.В. Пулька, В.Я. Гаврилюк, **В.С. Сенчишин**, Н.Г. Гордань // Технологические системы. 2014. № 2 (67). С. 75 - 80. *(Здобувачем наведено аналіз впливу струму на властивості наплавленого металу)*

7. Пулька Ч.В. Вібраційна потокова лінія для індукційного наплавлення

тонких дисків / Ч.В. Пулька, В.М. Барановський, **В.С. Сенчишин** та ін. // Електронний науковий фаховий журнал Наукові доповіді НУБіП України. 2015. № 8 (57) (http://nd.nubip.edu.ua/2015_8/32.pdf) (Здобувачем запропоновано структурну схему лінії)

8. **Сенчишин В.С.** Расчет размеров структурных составляющих наплавленного индукционным способом металла с наложением механической вибрации / В.С. Сенчишин, Ч.В. Пулька // Автоматическая сварка. 2015. № 8. С. 34 - 37. (Здобувачем розроблено метод розрахунку структурних складових)

9. Пулька Ч.В. Пути совершенствования технологии индукционной наплавки тонких стальных дисков / Ч.В. Пулька, О.Н. Шаблій, **В.С. Сенчишин** та ін. // Автоматическая сварка. 2015. № 5-6 (742). С. 64 - 67. (Здобувачем запропоновано способи застосування механічної вібрації)

10. Пулька Ч.В. Исследование технологии индукционной наплавки с использованием механической вибрации / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2016. № 2(38). С. 202 - 205. (Здобувачем запропоновано способи застосування механічної вібрації)

11. Пулька Ч.В. Підвищення довговічності деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин з використанням різних методів наплавлення / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2018. № 13. С. 75 - 89. (Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)

12. Пулька Ч.В. Вплив горизонтальної механічної вібрації на експлуатаційні властивості наплавленого металу / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, **В.С. Сенчишин** та ін. // Автоматическая сварка 2019. № 10. С 22 - 27. (Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)

Публікації апробаційного характеру

13. Шаблій О.М. Віброіндукційне наплавлення тонких плоских деталей / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин** : тези доп. 10 Міжн. симпозіуму українських інженерів механіків у Львові. НУ “Львівська політехніка”, 2011.

С. 289 - 290. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення).*

14. Шаблій О.М. Віброіндукційна технологія наплавлення тонких сталевих дисків / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин** : тези доп. Міжн. наук.-методичній конф. «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, підготовка кадрів». ПДТУ, 2011. С. 120 - 121. *(Здобувачем проведено аналіз методів наплавлення)*

15. Пулька Ч.В. Напрямки підвищення зносостійкості деталей машин при індукційному наплавленні / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.В. Шарик : тези доп. V Всеукраїнської міжгалузевої наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології», НТУУ «КПІ», 2012. С.164 - 166. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

16. Пулька Ч.В. Совершенствование технологии индукционной наплавки стальных дисков / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.В. Шарик : тези доп. наук.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов». ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2012. С. 37 - 38. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

17. Шаблій О.М. Нові технологічні процеси індукційного наплавлення тонких фасонних дисків / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин** та ін. : тези доп. Міжн. конф. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України «Сварка и родственные технологии. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013. С. 185 - 186. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

18. Пулька Ч.В. Вплив технологічних операцій індукційного наплавлення на стабільність товщини шару наплавленого металу / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк : тези доп. 11 Міжн. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові. НУ «Львівська політехніка», 2013. С. 199 - 200. *(Здобувачем проведено аналіз впливу параметрів наплавлення на товщину наплавленого шару)*

19. Пулька Ч.В. Шляхи вдосконалення процесу індукційного наплавлення деталей машин / Ч.В. Пулька, В.Я. Гаврилюк, **В.С. Сенчишин** : тези доп. II

Міжн. інтернет-конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій». м. Вінниця, 2014. С. 7. *(Здобувачем проведено аналіз способів індукційного наплавлення)*

20. Пулька Ч.В. Розрахункова модель оцінки впливу параметрів вібрації на структуру наплавленого шару металу / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк : тези доп. 12 Міжн. симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові, Н.У. «Львівська політехніка», 2015. С. 125. *(Здобувачем проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу)*

21. Пулька Ч.В. Дослідження властивостей шару наплавленого металу з використанням вібрації / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк : тези доп. VIII Міжн. конф. молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». с.м.т. Ворзель, 2015. С. 123. *(Здобувачем проведено аналіз властивостей шару наплавленого металу)*

22. Пулька Ч.В. Технологічні процеси в зварюванні та споріднених технологіях з використанням механічної вібрації / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, В.М. Барановський, **В.С. Сенчишин** : тези доп. IV міжн. наук.-техн. конф. «Сварка и родственные технологии. Перспективы развития», присвяченої 50-ти річчю кафедри «Обладнання і технологія зварювального виробництва». ДДМА, м. Краматорськ, 2016. С.118 - 120. *(Здобувачем наведено переваги застосування індукційного способу наплавлення)*

23. Пулька Ч.В. Дослідження індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій з використанням механічної вібрації / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, В.Я. Гаврилюк, М.В. Шарик : тези доп. 13у Міжн. симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові. Н.У. «Львівська політехніка», 2017. С. 169 - 171. *(Здобувачем проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу)*

24. Пулька Ч.В. Основні напрямки вдосконалення технології індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, **В.С. Сенчишин** та ін. : тези доп. Міжн. конф. «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє», присвячена сторіччю НАН України. ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2018. С. 97. *(Здобувачем запропоновано застосування механічної вібрації)*

індукційного способу наплавлення)

25. Пулька Ч.В. Підвищення зносостійкості наплавленого металу з використанням механічної вібрації / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик : тези доп. Міжн. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті). ТНТУ, 2018. С. 67. *(Здобувачем наведено аналіз шляхів підвищення зносостійкості наплавленого металу)*

26. Пулька Ч.В. Пристрій для керування енергоощадним режимом при індукційному наплавленні тонких елементів конструкції / Ч.В. Пулька, **В.С. Сенчишин**, М.В. Шарик : тези доп. 14 Міжн. симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові. Н.У. «Львівська політехніка», 2019. С. 164 - 166. *(Здобувачем запропоновано пристрій для індукційного наплавлення)*

27. Пулька Ч.В. Вплив різних частот на експлуатаційні властивості наплавленого металу / Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, В.Я. Гаврилюк, **В.С. Сенчишин** : тези доп. Всеукраїнської конф. з міжн. участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій». м. Миколаїв: НУК, 2019. С. 40 - 42. *(Здобувачем наведено аналіз впливу частоти коливання на якість наплавленого металу)*

28. **В.С. Сенчишин**. Дослідження впливу параметрів віброіндукційного наплавлення на характеристики наплавленого шару металу / В.С. Сенчишин, Ч.В. Пулька, М.В. Шарик, В.Я. Гаврилюк : тези доп. ІХ Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». ТНТУ, 2020. С. 23 - 24. *(Здобувачем проведено аналіз впливу амплітуди на якість наплавленого металу)*

Патенти

29. Патент України на корисну модель № 54204, МПК (2009) В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких плоских сталевих деталей / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., **Сенчишин В.С.**, Король О.І., Шарик М.В. – № u201006501. – Заявл. 28.05.2010. Опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20/2010. *(Частка всіх співавторів*

однакова. Здобувачем запропоновано застосування механічної вібрації)

30. Патент України на корисну модель № 59994, МПК (2011.01) В23К 13/00 Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків / Пулька Ч.В., **Сенчишин В.С.** – № u201013152. – Заявл. 05.11.2010. Опубл. 10.06.2011, Бюл. №11/2011. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано конструктивну схему пристрою)*

31. Патент України на корисну модель №64371, МПК (2011.01) В23К 13/00. Спосіб наплавлення сталевих деталей / Пулька Ч.В., **Сенчишин В.С.** – № u201103195. – Заявл. 18.03.2011. Опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21/2011. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано застосування механічної вібрації)*

32. Патент України на корисну модель № 94727, МПК (2014.01) В23К 13/00. Автоматична потокова лінія для наплавлення тонких дисків / Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., **Сенчишин В.С.**, Шарик М.В. – № u201406882. – Заявл. 19.06.2014. Опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22/2014. *(Частка всіх співавторів однакова. Здобувачем запропоновано конструктивну схему потокової лінії)*

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. ВИБІР СПОСОБУ НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ГРУНТООБРОБНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН	28
1.1. Аналіз умов експлуатації робочих органів ґрунтообробної і збиральної сільськогосподарської техніки та вибір способу їх наплавлення	28
1.2 Аналіз конструкцій індукторів та нагрівальних систем для індукційного наплавлення тонких деталей	38
1.3 Аналіз конструкції установок та автоматичних ліній для індукційного наплавлення тонких деталей	47
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРАЦІЇ	54
2.1. Вібраційна обробка металевих розплавів	55
2.2. Природа сил взаємодії між частинками в розплаві	60
2.3. Механізми коагуляції в розплавах металу	66
2.4. Розрахункова модель оцінки впливу параметрів вібрації на структуру наплавленого металу	71
2.5. Розрахунок параметрів структури при індукційному наплавленні із застосуванням вібрації	77
2.6. Висновки до розділу 2	79
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	80
3.1 Методика дослідження амплітуди коливань електромагнітного вібратора при індукційному наплавленні	80
3.2 Методики дослідження експлуатаційних та якісних характеристик наплавленого металу	85
3.2.1. Дослідження зносостійкості наплавленого металу	85
3.2.2. Методика дослідження товщини шару наплавленого металу	88
3.3. Висновки до розділу 3	99
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ	

	21
ДЕТАЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ	100
4.1. Дослідження і вибір параметрів вібрації при індукційному наплавленні	100
4.1.1. Металографічні дослідження наплавленого металу	105
4.1.2. Мікрорентгеноспектральний аналіз перехідної зони сплавлення основного і наплавленого металу	111
4.1.3. Дослідження впливу вібрації деталі в процесі наплавлення на твердість та зносостійкість наплавленого металу	113
4.2. Експериментальні дослідження товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі	116
4.3. Висновки до розділу 4	135
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ	137
5.1 Вібраційна потокова лінія для індукційного наплавлення	137
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	144
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	146
ДОДАТКИ	166

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення довговічності та надійності робочих поверхонь деталей машин і механізмів є важливими завданнями подальшого розвитку промислового комплексу України. У секторі сільськогосподарського машинобудування цей напрямок насамперед пов'язаний з виготовленням таких деталей, як дискові ножі-гичкорізи, лемехи плугів, лапи культиваторів, диски луцильників, тощо. Ці процеси визначають технологічну ефективність роботи ґрунтообробної та збиральної техніки загалом. Рішення таких завдань, зазвичай, здійснюють з метою підвищення їх стійкості проти спрацювання та одночасного забезпечення самозагострювання в процесі експлуатації і досягається за рахунок зміцнення робочих поверхонь різними методами наплавлення.

Для зміцнення деталей ґрунтообробних знарядь і інших деталей сільськогосподарських машин найбільш широко застосовується індукційне наплавлення зносостійкими порошкоподібними твердими сплавами.

Проте основним недоліком процесу індукційного наплавлення є низька стабільність товщини наплавленого шару металу і, відповідно, незадовільна зносостійкість робочих органів у процесі їх експлуатації.

Тому перспективним напрямком підвищення стабільності товщини наплавленого шару металу та зносостійкості є удосконалення індукційного способу наплавлення шару металу на робочі поверхні деталей шляхом застосуванням механічної вібрації деталі в процесі наплавлення, що є актуальним науково-технічним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя відповідно до НДР «Основи проектування енергоощадних джерел і режимів нагрівання для наплавлення тонких елементів конструкцій» (номер реєстрації 0107U000540), «Механіко-технологічне обґрунтування розробки адаптивних коренезбиральних машин» (номер реєстрації 0113U00253) та «Діагностичні параметри та механічні аспекти формування мезоскопічного деформаційного рельєфу на поверхні експлуатованих трубних сталей» (номер

реєстрації 0116U006908), а також згідно договору про співпрацю та партнерство між Тернопільським національним технічним університетом імені Івана Пулюя та Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України (2012-2017 рр.), де автор був безпосередньо їх виконавцем.

Мета роботи і завдання досліджень. Метою роботи є підвищення стабільності товщини шару наплавленого металу та експлуатаційних характеристик тонких деталей машин шляхом удосконалення та обґрунтування раціональних параметрів в процесі індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації.

Згідно з поставленою метою сформульовано основні задачі дослідження:

- на основі аналізу відомих способів наплавлення тонких деталей машин і результатів наведених теоретично-експериментальних досліджень розробити технологічний процес індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації;
- розробити розрахунково-математичну модель для визначення параметрів структури наплавленого металу індукційним способом із застосування механічної вібрації;
- розробити аналітичні залежності для визначення впливу частоти та амплітуди коливання механічної вібрації розплавленого металу на зміну середнього діаметра рухомої частинки кластера;
- провести експериментальні дослідження відхилення товщини наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації;
- розробити спеціальне обладнання для реалізації запропонованого технологічного процесу наплавлення і забезпечення впровадження його на практиці.

Об'єкт дослідження – процес індукційного наплавлення тонких деталей порошкоподібними твердими сплавами з застосуванням механічної вібрації.

Предмет дослідження – параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації та закономірності їх впливу на показники

рівномірності товщини шару наплавленого металу та експлуатаційні властивості.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань і отримання основних результатів роботи використано експериментальні та аналітичні методи дослідження.

Аналітичні дослідження процесу індукційного наплавлення проводилися шляхом математичного моделювання теплових і енергетичних процесів індукційного наплавлення шару металу з застосуванням механічної вібрації.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах в Тернопільському національному технічному університеті ім. Івана Пулюя та в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Склад наплавленого шару металу визначали хімічним та мікрорентгеноспектральним методами аналізу, а його структуру – методами електронної та оптичної мікроскопії. Проведення та обробку результатів експериментальних досліджень реалізували на основі застосування відомих методик планованих факторних експериментів з використанням прикладного програмного пакету для статистичного аналізу даних Statistica 10.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено розрахунково-математичну модель, яка описує зміну параметрів структури наплавленого шару металу залежно від співвідношення характеристик і властивостей порошкоподібних сплавів та отримано аналітичні залежності для визначення амплітуди та частоти коливань, за яких забезпечуються оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу;

- встановлено, що застосування механічної вібрації в процесі наплавлення порошкоподібним твердим сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт1) призводить до зміни розмірів структурних складових карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$, які подрібнюються з (10...12) мкм без вібрації до (7...10) мкм при вертикальній і до (3,5...7) мкм при горизонтальній вібрації та рівномірного розподілу вмісту хрому по товщині наплавленого шару металу.

- вперше показано, що механічна вібрація в процесі наплавлення призводить до підвищення зносостійкості наплавленого металу з 2.2 без вібрації до 3.1 та 3.4 відповідно при вертикальній та горизонтальній вібрації із застосуванням порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 (Сормайт 1) та зростання твердості наплавленого шару металу з 3500 МПа до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно;

- отримані емпіричні математичні моделі товщини відхилення наплавленого металу залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення та способів прикладання механічної вібрації.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено технологію та обґрунтовано основні параметри індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації в процесі наплавлення тонких деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин, яка дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики наплавлених деталей. Виробничу перевірку способу індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації проведено на підприємствах: ПП «Чіп» (Волинська обл., м. Володимир-Волинський) та КЗЕСО ПрАТ «Каховський завод електрозварювального устаткування» (Херсонська обл., м. Каховка). Отримані результати підтвердили технологічну ефективність його використання у виробництві. Розроблено рекомендації для виробничого застосування індукційного способу наплавлення деталей машин.

Результати досліджень також використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців освітнього рівня бакалавр і магістр за спеціальністю «Зварювання» та 131 «Прикладна механіка» під час вивчення дисциплін «Наплавлення та напилення», «Підвищення зносостійкості та відновлення спрацьованих деталей машин та механізмів», «Прогнозування розвитку зварювальної науки і техніки».

Особистий внесок здобувача. Постановку задач дослідження та вибір наукових підходів для їх вирішення було сформульовано спільно з науковим керівником. Підготовку, проведення та обробку результатів теоретичних і експериментальних досліджень, формулювання загальних висновків, розробку

рекомендацій для промислового використання результатів досліджень виконано автором особисто.

У наукових працях, які виконано у співавторстві, дисертантові належить наступне: [1, 26, 30] – запропоновано обладнання і нову технологію індукційного наплавлення та конструктивну схему пристрою; [2] – розроблено методику дослідження; [3, 20, 23] – проведено аналіз впливу вібрації на якість наплавлення металу; [4, 11-14] – проведено аналіз методів наплавлення; [5, 18] – проведено аналіз впливу параметрів наплавлення на товщину наплавленого шару; [6, 27, 28] – наведено аналіз впливу струму, частоти та амплітуди коливання на властивості наплавленого металу; [7, 32] – запропоновано структурну схему потокової лінії; [8] – розроблено метод розрахунку структурних складових наплавленого металу; [9, 10, 29, 31] – запропоновано способи застосування механічної вібрації; [15-17, 19] – проведено аналіз способів індукційного наплавлення; [21] – проведено аналіз властивостей шару наплавленого металу; [22] – наведено переваги застосування індукційного способу наплавлення; [24] – запропоновано застосування механічної вібрації індукційного способу наплавлення; [25] – наведено аналіз шляхів підвищення зносостійкості наплавленого металу.

Під час написання роботи автор проводив аналіз результатів дослідження в галузі наплавлення, які отримано в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, в Донбаській державній машинобудівній академії, Приазовському державному технічному університеті та в інших організаціях і вищих навчальних закладах України і за кордоном.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи отримали позитивну оцінку на: VIII Міжн. наук. конф. «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур» (м. Львів, 2010 р.); п'яти міжн. симпозіумах українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2011 р., 2013 р., 2015 р., 2017 р., 2019 р.); Міжн. наук.-техн. конф. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2010-2012 рр., 2014 р., 2015 р., 2018 р., 2020 р.); Міжн. наук.-метод. Конф.

«Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, підготовка кадрів» (м. Маріуполь, ПДТУ, 2011 р.); V Всеукраїнській міжгалузевій наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології» (м. Київ, НТУУ «КПІ», 2012 р.); наук.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов» (м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2012 р.); на пленарному засіданні Міжн. конф. в ІЕЗ ім. Є.О. Патона «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» (м. Київ, 2013р.); VII та VIII наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів, відповідно, «Сварка и родственные технологи» та «Зварювання та споріднені технології» (сmt. Ворзель, 2013 р. та 2015 р.); II Міжн. інтернет-конф. «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій», (м. Вінниця, 2014 р.); VIII міжн. конф. молодих вчених та спеціалістів (сmt Ворзель, 2015р.); IV міжн. наук.-техн. конф. «Сварка и родственные технологии. Перспективы развития», присвяченої 50-ти річчю кафедри «Обладнання і технологія зварювального виробництва» (м. Краматорськ, ДДМА, 2016 р.); Міжн. конф. «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє» присвяченої сторіччю НАН України (м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2018р.); Всеукраїнській конф. з міжн. участю «Проблеми зварювання та споріднених технологій» (м. Миколаїв, НУК, 2019 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 32 наукових публікаціях, з них: 11 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, включеного до міжнародної наукометричної бази Scopus, 4 патенти України на корисну модель; 16 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 182 сторінок, включаючи 72 рисунки, 6 таблиці, 4 додатка на 17 сторінках, список використаних джерел із 158 найменувань на 20 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ВИБІР СПОСОБУ НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ҐРУНТООБРОБНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

1.1. Аналіз умов експлуатації робочих органів ґрунтообробної і збиральної сільськогосподарської техніки та вибір способу їх наплавлення

В сільському господарстві широко використовують тонкі плоскі деталі у вигляді робочих органів ґрунтообробних і збиральних машин, а саме: лемеші плугів, лапи культиваторів, диски луцильників, ножі-гичкорізи та інші, які працюють в умовах абразивного спрацювання та значних статистичних і динамічних навантажень. Вище згадані деталі повинні володіти високою міцністю і зносостійкістю [1-6]. Їх процес зношування протікає при неперервній взаємодії металу з ґрунтом і рослинами, що в свою чергу призводить до затуплення леза в процесі експлуатації.

З метою забезпечення різальних властивостей, робочі органи повинні бути схильні до самозагострювання в процесі експлуатації. Найкращим чином ці вимоги забезпечуються виготовленням біметалевих (двохшарових) робочих деталей, міцність яких забезпечується основним матеріалом, з якого виготовлений робочий орган, а зносостійкість і самозагострювання - плакуючим шаром нанесеним на основний метал. Самозагострювання залежить від співвідношення товщини і зносостійкості основного і плакуючого прошарків [1, 7]. Найкраще процес самозагострювання забезпечується при $\omega=1,5$.

$$\omega = \frac{\varepsilon_2 \cdot h_2}{\varepsilon_1 \cdot h_1}, \quad (1.1)$$

де ε_1 , ε_2 та h_1 , h_2 – стійкість і товщина відповідно основного і плакуючого прошарків.

Для зміцнення робочих органів використовують різноманітні способи наплавлення, а саме: електроконтактне, плазмове, електродугове, плакування вибухом, індукційне та інші методи зміцнення [1, 6, 8-13].

Відомий спосіб наплавлення робочих органів сільськогосподарських машин з використанням електроконтактного зміцнення [1, 6, 8, 14, 15]. Присаджувальним матеріалом при цьому методі можуть бути порошки, дріт та стрічки. Суть технології полягає в нанесенні на поверхню деталі шару зносостійкого порошкоподібного твердого матеріалу (шихти), з наступним його нагріванням до температури, при якій проходить спікання шихти і утворення міцного дифузійного зв'язку з деталлю. Дана технологія застосовується при зміцненні дискових ножів ґрунтообробних машин, які повинні мати зносостійку різальну кромку і самозагострюватися в процесі експлуатації.

На рис. 1.1 наведені дискові ножі наплавлені порошкоподібним твердим сплавом електроконтактним способом, а на рис. 1.2 показана установка для приварювання стрічки до диска лушильника [1, 3, 14].

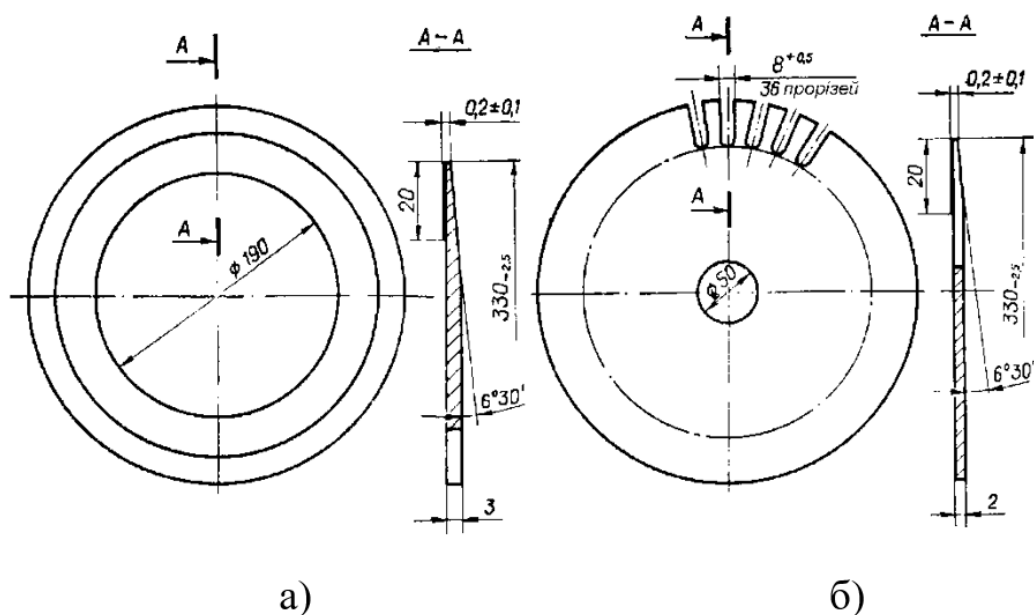


Рис. 1.1 Конструкції дискових ножів [1, 14] : а – непривідний; б – привідний

В роботі [1, 15] розроблено технологічний процес електроконтактного наплавлення лемеха порошковим дротом сегментного поперечного перерізу. В цьому випадку процес наплавлення порошковим дротом протікає у дві стадії: перша, це холодне ущільнення порошкового сердечника, і як наслідок, деформація присаджувального матеріалу в зоні контакту з деталлю, а друга – сам

процес наплавлення, що забезпечує нагрівання порошкового дроту на вершині сегменту, у зоні інтенсивного тепловиділення, поширення деформації на периферійні зони, плавлення та приварювання оболонки до основи з одночасним спіканням порошкового сердечника. На рис. 1.3 представлено загальний вигляд напавленого лемеха за вищезгаданою технологією.

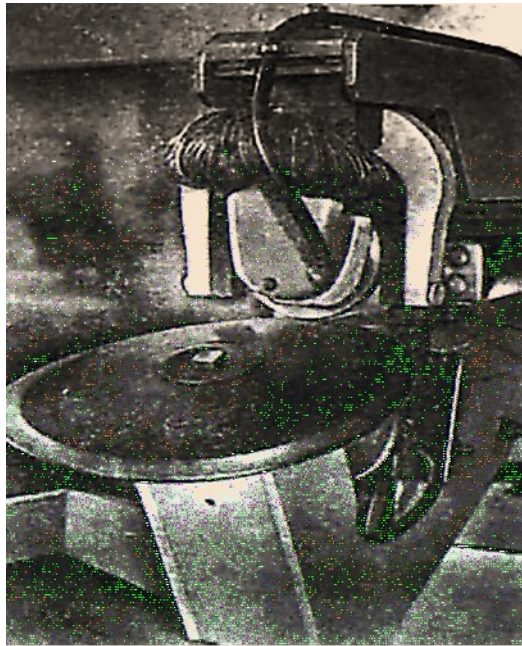


Рис. 1.2. Загальний вигляд установки для приварювання стрічки до диска лущильника на базі модернізованої машини МШПР-300/1200 [1, 3].



Рис. 1.3. Загальний вигляд напавленого лемеха [1, 15]

Перевагами даного способу являються: відсутність проплавлення основного металу, мінімальні деформації напавлених деталей, можливість напавлення прошарків малої товщини, велика швидкість нагрівання, яка може досягати декілька тисяч градусів в секунду. Недоліками даної технології є низька

продуктивність процесу, відсутність серійного виробництва обладнання і нестабільна якість наплавленого металу.

Для одержання біметалевих робочих органів, а саме дисків луцильників, пропонується застосовувати спосіб електроконтактного плакування стійкою до зношування стрічкою [1, 16]. Для забезпечення заданої міцності і пружності дискові ножі перед плакуванням піддаються об'ємному загартуванню і відпуску. Окалина, яка утворилася в процесі прокатування і термообробки, видаляється травленням в 20% розчині сірчаної кислоти з додаванням 1% інгібітора ОП-1, підігрітого до температури 70°C. Після травлення, промивання і сушіння диск вважається придатним до плакування стрічкою. Основними недоліками цього способу являються велика трудоемкість підготовчих робіт, труднощі з виготовленням стрічок з високостійких до зношування сплавів, невисока міцність зварних прошарків.

Для зміцнення робочих поверхонь різних плоских деталей, в тому числі робочих органів ґрунтообробних машин, використовують методи плакування вибухом і прокатуванням [1, 17]. До переваг плакування вибухом відносять високу швидкість процесу; можливість одержання з'єднання металів, які іншими способами одержати неможливо або складно; відносну простоту технології (відсутність необхідності застосування складного обладнання). В Чехії технологію наплавлення вибухом використовували при виробництві біметалевих ножів та інших плоских деталей [1, 17]. Оцінки ефективності технології в порівнянні з традиційним металургійним способом ливарного плакування показали, що її застосування технічно і економічно обґрунтоване.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблений і випробуваний спосіб одержання стійкого до зношування біметалу при прокатуванні пакетів з порошком ПГ-С1 [1, 18], який базується на принципі авто-вакуумного зварювання тиском. Автори роботи [1, 19] застосували цей спосіб для одержання інструментального біметалу з плакуючим шаром порошку ПР-10Р6М5. Основним недоліком способу являються технологічні складності при складанні пакету великих розмірів, які пов'язані з необхідністю ущільнення порошку для створення

мінімального об'єму повітря в порожнині пакету. Попереднє пресування порошку дозволяє усунути цей недолік. В роботі [1, 20] показано, що при одержанні біметалевого профілю для робочих органів ґрунтообробних машин порошок плакуючого прошарку ПГ-С1 попередньо компактували методом гарячого газостатичного пресування, однак промислового використанню цієї технології перешкоджає складність і висока трудомісткість.

В роботах [1, 9, 10, 21-23] описана технологія плазмового наплавлення, яку застосовують при виготовленні багатолезових металорізальних інструментів (кінцевих фрез і т.п.), а також різальних кромок дискових і плоских ножів різного призначення. В якості матеріалів для наплавлення використовують порошки швидкорізальних сталей, а також сплавів, які містять ванадій. Даний процес наплавлення дозволяє порівняно легко регулювати в широких діапазонах енергетичні, теплові і газодинамічні параметри струменя плазми, що дозволяє отримати наплавлений шар з заданими фізико-хімічними та механічними властивостями.

Розроблена технологія плазмо-порошкового наплавлення ножів паперорізальних машин. Стійкість серійних ножів без наплавлення вичислюється годинами зношується і визначається зносостійкістю, твердістю, механічними властивостями і деякими іншими характеристиками сталі [1, 9, 10, 22]. Заготовка під наплавлення має розділення, яке дозволяє практично виключити деформацію після наплавлення і краєвий ефект, який виникає при напавленні на кромку. Паперорізальні ножі наплавляли плазмово-порошковим методом для кількох типів сталей і сплавів. Після наплавлення заготовки піддають дворазовому відпуску при температурі $540-560^{\circ}\text{C}$, різанню, правленню і кінцевій механічній обробці.

Перевагами плазмового наплавлення є незначне проплавлення основного металу, висока якість напавленого шару, можливість наплавлення тонких прошарків (1...5 мм) з використанням широкої гама присаджувальних матеріалів. До недоліків слід віднести відносно низька продуктивність і необхідність складного і дорогого обладнання, а також високі вимоги до

гранулометричного складу і форми гранул порошоків, що призводить до її значного подорожання. Вище перераховані недоліки обмежують застосування даного способу.

Для підвищення експлуатаційних характеристик робочих органів ґрунтообробних машин (ножів гичкорізів, лап культиваторів, лемехів плугів та інших деталей) Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України запропоновано точкове зміцнення за допомогою дугового наплавлення порошковим дротом ПП-АН170 [1, 24]. Висота зміцнювальної точки складає 1...3 мм, а глибина проплавлення основного металу 2...4 мм. Наплавлення здійснюють на зворотній полярності. Глибина проплавлення при точковому зміцненні регулюється зміною сили струму, напруги і часу горіння дуги. На рис. 1.4 показано загальний вигляд напавленого порошковим дротом лемеха плуга до і після експлуатації.

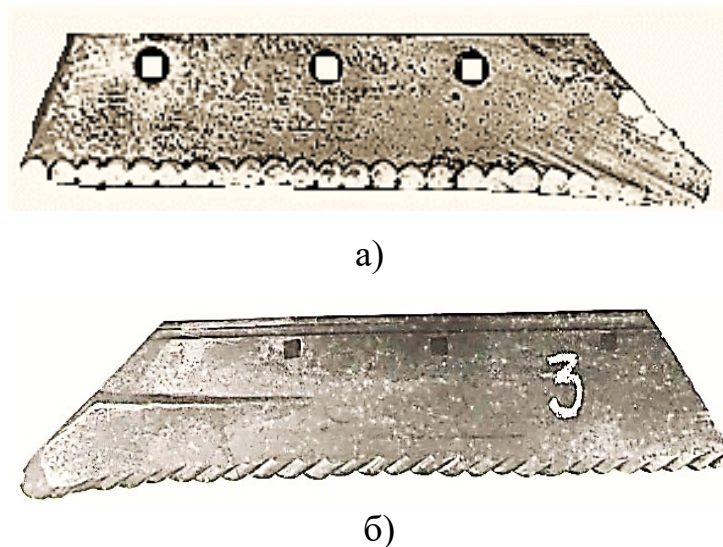


Рис. 1.4. Загальний вигляд напавленого лемеха до експлуатації (а) і після експлуатації (б)

Недоліком даного способу є великі трудові та матеріальні затрати на виготовлення деталей.

В роботах [1, 12, 25-26] авторами запропоновано технологію зміцнення робочих поверхонь культиваторних лап методом локального зміцнення. Суть даного методу полягає в тому, що на зовнішню поверхню лапи наносять валики

за допомогою дугового наплавлення з кроком 40 мм під кутом нахилу 25° до лева лапи. Загальний вигляд зміцненої лапи показано на рис. 1.5. Недоліком даного способу є великі трудові затрати і нерівномірність нанесених валиків, що залежить від кваліфікації зварника.



Рис. 1.5. Загальний вигляд зміцненої лапи локальним методом [1, 12]

Відома також технологія підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин науглецюванням поверхневого шару вугільним електродом [1, 28]. Суть способу полягає в тому, що при контакті вугільного електрода з деталлю в результаті іскрового розряду, вуглець електрода переходить в основний метал утворюючи на його поверхні шар цементиту, твердість якого, значно вище основного металу. Цей спосіб ще не знайшов широкого застосування у зв'язку з складністю технологічного процесу.

В роботах [1, 13, 29] запропонована технологія відновлення і зміцнення лемехів плугів за допомогою припаювання металокерамічних пластин. Суть даного методу полягає в тому, що з лицьової сторони лева лемеша припаюють твердосплавні пластини суцільного і переривчастого розташування. Для здійснення процесу фрезерують паз глибиною 1,5...2 мм, потім в нього вкладають припій ЛБ3, на який пізніше вкладають металокерамічні пластини Т15К6 або ВК-8. Нагрівання припою здійснюють газополуменевим способом, після припаювання леміш поміщають в термоізоляційну ємкість, нагріту до температури 620°C , разом з якою він остигає до кімнатної температури. На рис. 1.6 показано загальний вигляд зміцненого лемеша.

Основною перевагою зміцнення робочих органів металокерамічними пластинами є зниження тягового опору, що дозволяє підвищити робочу швидкість орної машини, і тим самим продуктивність оранки.



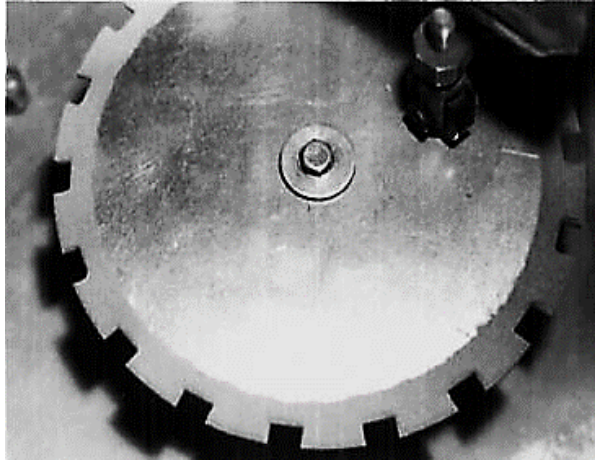
Рис. 1.6. Загальний вигляд зміцненого лемеха металокерамічними пластинами [1, 13]

Недоліком даного способу є великі матеріальні і трудові затрати, що пов'язані з технологією виготовлення деталей.

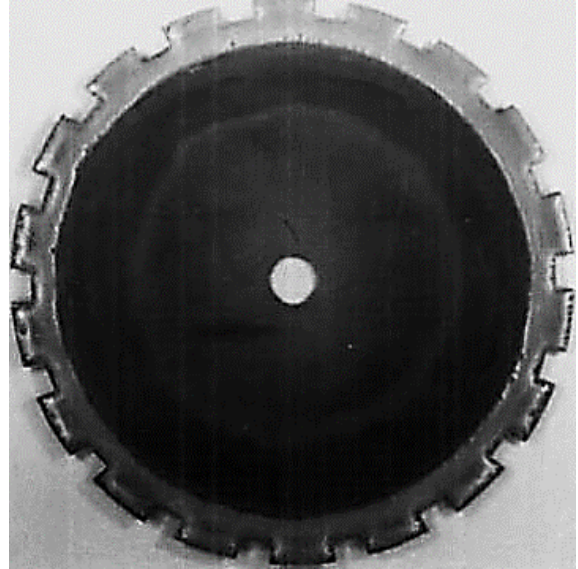
Розроблені і інші способи зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. До них відноситься наплавлення за допомогою електронного прискорювача [1, 30], лазерне наплавлення [1, 31-33] і інші. Проте через складність технології і відсутності обладнання, його недосконалості і високої вартості ці процеси поки що не знайшли промислового застосування.

Для зміцнення тонких плоских деталей, в тому числі робочих органів деталей сільськогосподарських машин, широко використовують індукційний спосіб наплавлення. Авторами робіт [1, 34-41] була розроблена технологія одночасного індукційного наплавлення тонких фасонних дисків по всій робочій поверхні. Для наплавлення використовується спеціальна шихта, що складається із суміші зносостійкого порошкоподібного твердого сплаву і флюсу. Шихту наносять на поверхню деталі в вигляді прошарку відповідної товщини (рис. 1.7). Після цього деталь розміщують в індукторі (рис. 1.8), джерелом живлення якого є високочастотний генератор. При проходженні струмів високої частоти через індуктор в поверхневих шарах деталі, яка підлягає наплавленню, наводяться вихрові струми, які розігрівають деталь, а від її поверхні плавиться шихта [1, 34].

Густина розподілу струму залежить від багатьох факторів, основними з яких є: частота і сила струму індуктора, питомий електричний опір і магнітна проникність матеріалу, геометричні розміри деталі, яка підлягає нагріванню.



а)



б)

Рис. 1.7. Загальний вигляд пристрою для засипання шихти (а) та наплавленого фасонного диска(б) [1, 36]



а)



б)

Рис. 1.8. Пристрій для наплавлення диска в двовитковому кільцевому індукторі [1, 36, 41]: а – до наплавлення; б – в момент плавлення твердого сплаву

Шар порошкоподібної шихти, розташованої між індуктором і поверхнею основного металу, має високий питомий опір і повільно реагує на дію електромагнітного поля, шихта в основному нагрівається за рахунок тепла, яке виділяється у деталі.

До переваг даного способу можна віднести: можливість наплавлення тонких шарів, висока продуктивність, можливість механізації і автоматизації процесу. Недоліками є висока енергоємність, перегрівання основного металу, присаджувальний матеріал повинен бути більш легкоплавкий, ніж основний. Не дивлячись на вище згадане на підприємствах, які випускають сільськогосподарську техніку, плуги, лушпильники, лапи культиваторів і інше, цей спосіб є найбільш розповсюдженим [1, 34].

В даний час широке застосування в техніці, а особливо при зварюванні та напавленні знайшли технологічні процеси з використанням механічної вібрації.

Так з метою підвищення зносостійкості та якості наплавленого металу деталей ґрунтообробних машин авторами в роботах [1, 42-46] запропоновано застосовувати віброоброблення деталей після напавлення. Суть даного методу полягає в тому, що на напавлений шар послідовно наносять велику кількість мікроударів, з відповідною частотою та амплітудою 0,5 мм на протязі 20 секунд, викликаних дією коливань оброблювального інструменту. Основними перевагами при використанні даної технології є утворення рівномірної і більш дрібнозернистої структури наплавленого шару, за рахунок чого підвищується твердість наплавленого металу на 25%. До недоліків даного способу слід віднести великі трудові і матеріальні затрати, а також складність виконання технологічного процесу пов'язаного з коливанням оброблювального інструменту.

В роботах [1, 47-50] описано технологію віброоброблення зварних з'єднань нафтогазового обладнання. Запропонована технологія полягає в тому, що в процесі зварювання деталі піддають вібрації амплітудою 0,4...0,6 мм з частотою коливань 50 Гц, це дозволяє підвищити довговічність та ударну в'язкість зварних з'єднань відповідно в 4 та 2 рази за рахунок зниження рівня залишкових напружень і деформацій, які виникають після зварювання, а також

утворення дрібнозернистої структури металу шва і біля шовної зони. Однак дана технологія не знайшла широкого використання із-за складності технологічного процесу і обладнання.

Враховуючи вище сказане для наплавлення робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин найбільш ефективним є спосіб індукційного наплавлення порошкоподібними твердими сплавами, але він також потребує удосконалення з метою підвищення експлуатаційних властивостей (зносостійкості та стабільності товщини) наплавленого шару металу.

1.2 Аналіз конструкцій індукторів та нагрівальних систем для індукційного наплавлення тонких деталей

В процесі індукційного наплавлення особливі вимоги ставляться до конструкцій технологічних пристосувань (індукторів та нагрівальних систем), які впливають на енергоємність, продуктивність процесу і якість наплавленого металу, і підбираються здебільшого експериментальним шляхом окремо для кожної нової конструкції деталі.

Потужність теплових джерел в зоні наплавлення можна регулювати, як було відмічено в роботах [51, 2, 52-57] шляхом вибору конструкції індукторів, їх розмірів та відстані до деталі. Але в деяких випадках залежно від конфігурації поверхні, яка підлягає наплавленню, регулювати потужність по ширині зони наплавлення самою конструкцією індуктора дуже складно. Для цього необхідно розробляти інші методи (пристосування) для нагрівання (нагрівальні системи) за допомогою яких можна здійснювати регулювання електромагнітного поля (потужності) в зоні наплавлення.

Розглянемо спочатку існуючі конструкції індукторів для індукційного наплавлення і термообробки тонких плоских деталей, в тому числі і дисків.

В даний час є значна кількість різноманітних конструкцій індукторів, які використовуються для нагрівання деталей в процесі гартування або наплавлення [51, 2, 52]. Тим не менше постійно змінюється і збільшується номенклатура

наплавлюваних деталей, неперервне вдосконалення процесу вимагає чіткого підбору або розроблення спеціальних індукторів. Розміри і форма індукторів, які використовуються при індукційному наплавленні різних деталей, а також параметри режиму для кожної конкретної деталі підбираються, як було відмічено вище, дослідно-експериментальним шляхом.

Основна робоча частота струму, при якій ведеться наплавлення тонких плоских деталей, в тому числі дисків товщиною 2...6 мм, індукційним способом складає 440 кГц, а для більшої товщини основного металу - відповідно 70 кГц.

Різні види індукторів для наплавлення тонких плоских деталей, в тому числі і дисків, показані на рис.1.9 (а-д).

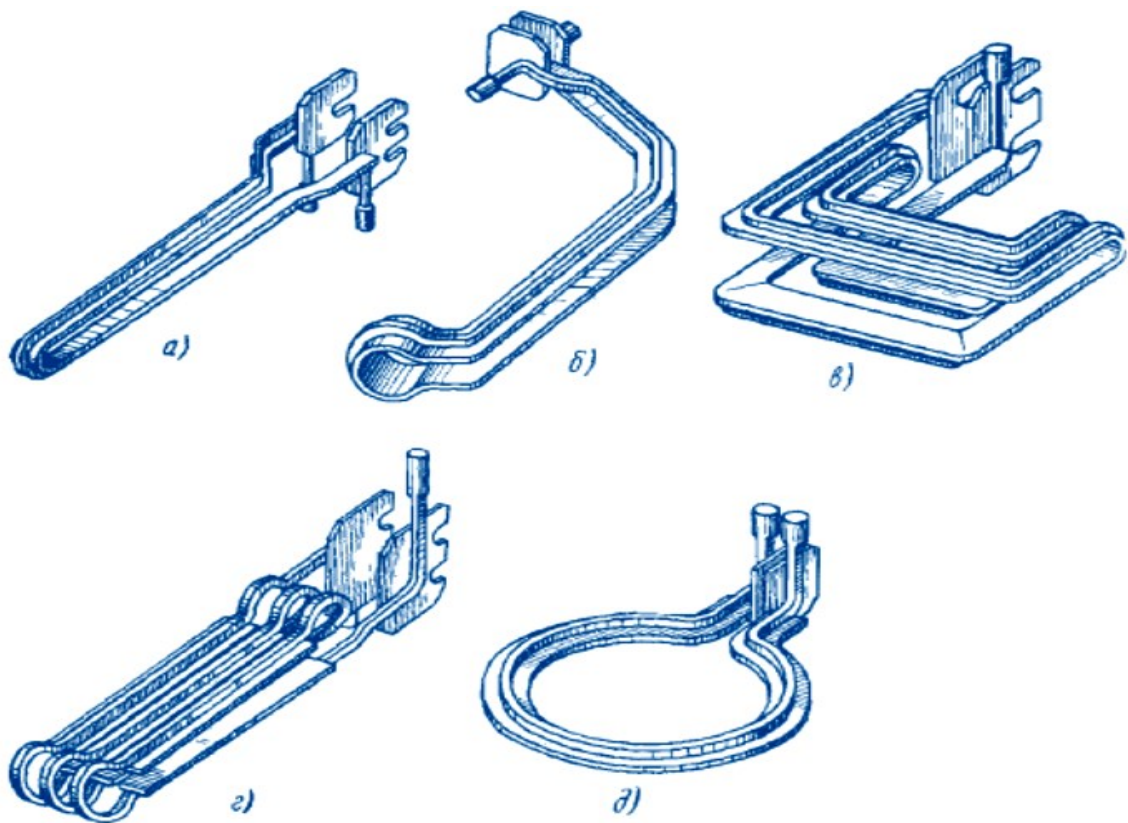


Рис.1.9 - Індуктори для наплавлення тонких плоских деталей машин [51, 2]:
 а - петлевий одновитковий індуктор для наплавлення леза лап культиваторів, б - петлевий індуктор для наплавлення плужних лемехів, в - прохідний індуктор для наплавлення плужних долотоподібних лемехів, г - Трьохвитковий овальний індуктор для наплавлення лопаток вентиляторів, д - кільцевий одновитковий індуктор для наплавлення різальних кромок дисків луцильників

На рис.1.9,а показано петлевий одновитковий індуктор для одночасного наплавлення одного леза стрільчатих лап культиваторів при частоті струму 70 кГц. З метою підвищення нагрівання на ділянці леза, яка має товщину 1,2 мм, верхня вітка індуктора зміщена відносно нижньої на 6 мм. Носову частину лапи виконують більш товстою, тому на ділянці для наплавлення носової частини збільшена відстань і відсутнє зміщення віток. Базовою поверхнею для фіксування деталей в індукторі служить азбоцементна плита.

На рис.1.9,б показаний петлевий індуктор для наплавлення плужних лемехів одночасним способом. Кільцеве розширення служить для вирівнювання електромагнітного поля у польового обрізу лемеша і спрощення регулювання індуктора. Прохідний індуктор (рис.1.9,в) призначений для наплавлення плужних долотоподібних лемехів на механізованих установках. Трьохвитковий овальний індуктор (рис.1.9,г) призначений для неперервно-послідовного наплавлення лопаток вентиляторів; кільцевий одновитковий (рис.1.9,д) - для наплавлення різальних кромek дисків луцильників.

Застосування одновиткових кільцевих індукторів з магнітопроводом і без магнітопроводу (рис.1.9 д, рис.1.14) для одночасного наплавлення по всій робочій поверхні тонких сталевих дисків зубчатої форми з метою підвищення продуктивності процесу наплавлення викликає труднощі в забезпеченні рівномірного розподілу електромагнітного поля в області наплавлення, що впливає на якість (нерівномірність) товщини шару наплавлюваного металу.

Недоліки двопетлевого індуктора такі ж самі, як і в сегментному: порівняно низька продуктивність, короблення деталі із-за місцевого нагрівання, а також неможливість його використання для одночасного наплавлення по всій робочій поверхні тонких дисків зубчатої форми з шириною наплавлення більшою ніж висота зуба.

Відомі двовиткові (рис.1.10 а) індуктори однакового діаметру кілець не дозволяють використовувати його при механізованому процесі наплавлення фасонних дисків зубчатої форми з виступом в середній його частині.

На рис.1.10 показані конструкції індукторів для паяння дискових фрез, з допомогою яких досягається необхідний розподіл електромагнітного поля в зоні паяння [51, 52]. З метою загартування і наплавлення плоских робочих поверхонь використовують одно- і багатовиткові індуктори, витки яких розташовані в одній площині (див.рис.1.11, а-г) [51, 53].

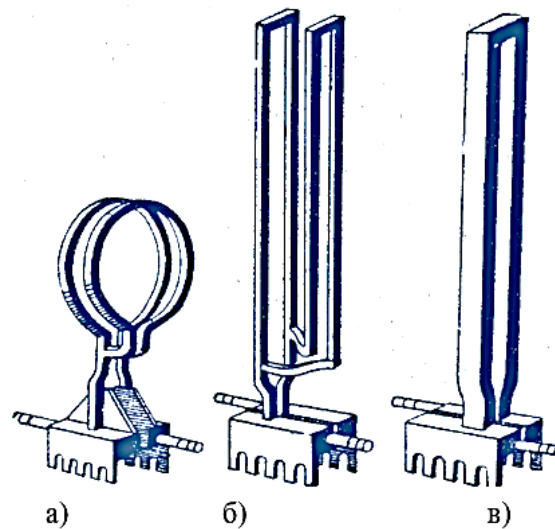


Рис. 1.10 - Індуктори для паяння твердосплавних дискових фрез [51, 52]:
а - з двома витками, з'єднаних паралельно; б - прямокутний з перевернутим паралельним витком (струми направлені зустрічно); в - петлевий

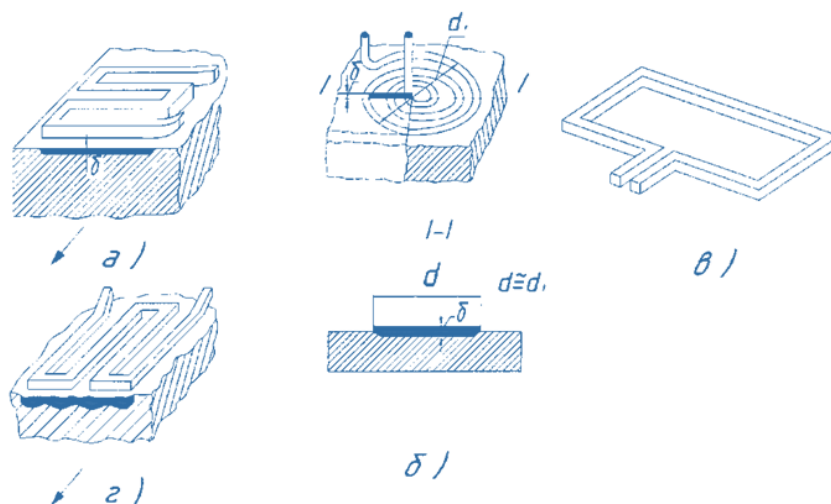


Рис. 1.11 - Індуктори для нагрівання тонких плоских деталей [51, 53]:
а, в, г - неперервно-послідовного нагрівання; б - одночасного нагрівання

Аналіз вище описаних конструкцій індукторів показав, що вони мають низький К.К.Д. через низьку ступінь зв'язку електромагнітного поля індуктора і деталі. Крім цього, у деяких випадках через складність геометричної форми поверхні, а також враховуючи можливість автоматизації технологічного процесу наплавлення, регулювати потужність в зоні наплавлення самою конструкцією індуктора (електромагнітним полем) недостатньо або досить складно.

З метою зменшення втрат потужності за рахунок обмеження розсіювання електромагнітного поля і підвищення його концентрації в зоні наплавлення використовують також магнітопроводи, застосування яких, при накладанні на активні частини індуктора з однієї або двох сторін, це дозволяє концентрувати електромагнітне поле на заданій поверхні наплавлюваної деталі.

Магнітопроводи виготовляють з листів трансформаторної сталі або з феритів. Переріз індукційного проводу з магнітопроводом, виготовленим з трансформаторної сталі, показано на рис.1.12. Магнітопровід сприяє підвищенню концентрації магнітного поля індуктора на стороні, яка повернена до деталі.

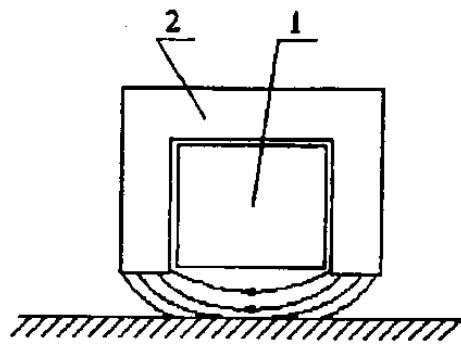


Рис. 1.12 - Переріз індукційного проводу з магнітопроводом із трансформаторної сталі [51, 54]: 1 - індуктивний провід; 2 - магнітопровід

У роботі [51,55] запропоновано нову конструкцію магнітопроводу, застосування якого при накладанні на активні частини індуктора з одного або двох боків дозволяє концентрувати магнітне поле на заданій ділянці нагрівання наплавлюваної деталі. Швидкість наплавлення з застосуванням магнітопроводів зростає більш ніж на 20% в порівнянні з наплавленням без магнітопроводів.

При наплавленні долотоподібних лемехів в індукторах без магнітопроводів розплавлення шихти на носку відстає від розплавлення на лезі на 3-5 с. При наплавленні з магнітопроводом спостерігається випередження розплавлення шихти на носку лемеша, що дає можливість застосування механізації і автоматизації процесу наплавлення.

В даному випадку магнітопроводи виготовляються у вигляді пакетів, зібраних з пластин електротехнічної тонкої листової сталі марки Э44 товщиною 0,1 мм. Принципова схема індуктора з магнітопроводом представлена на рис.1.13.

Використання такого магнітопроводу дозволяє значно збільшити випуск наплавлених деталей при зменшенні витрат електроенергії і скороченні часу на процес наплавлення.

Магнітопроводи можуть успішно застосовуватись в обладнанні заводів тракторного і сільськогосподарського машинобудування.

Технологія індукційного наплавлення тонких сталевих дисків з використанням феритного і сталевого магнітопроводу описана в роботах [51, 52, 53, 54]. На рис.1.14 показано загальний вид пристосування для наплавлення суцільних дисків з використанням феритного магнітопроводу, який розроблений авторами [51, 57], але регулювання потужності в зоні наплавлення тонких дисків зубчатої форми з шириною наплавлення більшою ніж висота зуба дуже складне.

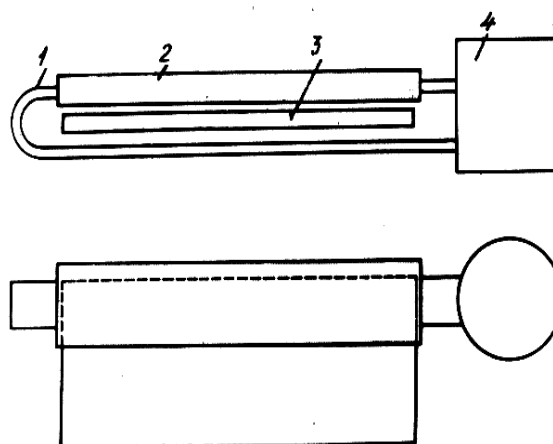


Рис. 1.13 - Схема індуктора з магнітопроводом [51, 55]: 1 - петля індуктора; 2 - магнітопровід; 3 - деталь; 4 - високочастотний трансформатор

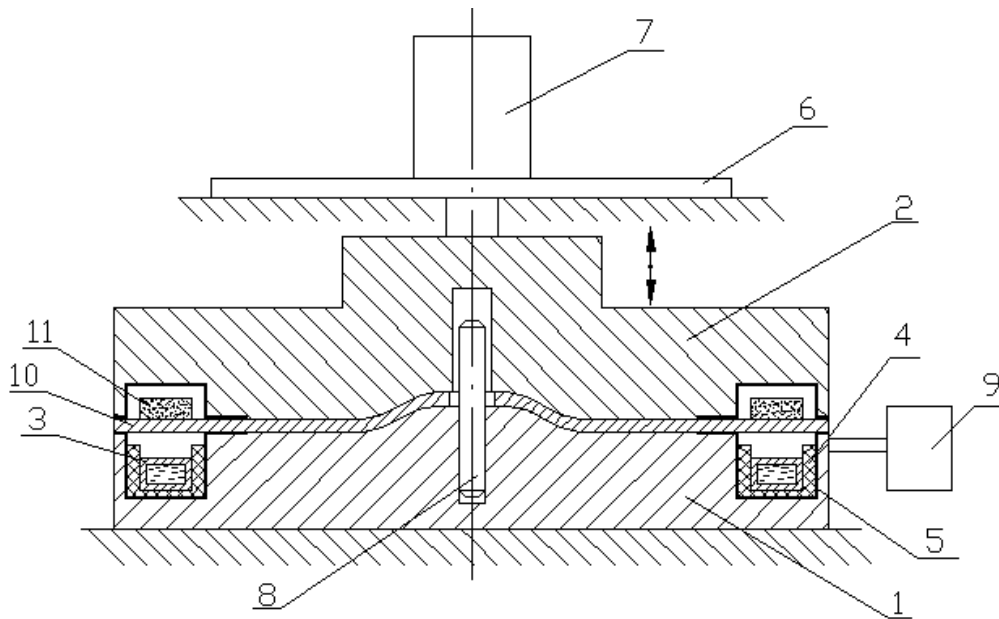


Рис. 1.14 - Пристрій для наплавлення дисків з використанням феритного магнітопроводу [51, 57]: 1, 2 - відповідно нижня і верхня притискаючі плити; 3 - кільцевий одновитковий індуктор; 4 - феритний магнітопровід; 5 - мідний електромагнітний екран; 6 - верхня опора; 7 - пневмопривід; 8 - направляюча; 9 - високочастотний генератор; 10 - суцільний тонкий диск; 11 - порошкоподібний твердий сплав

Для цього авторами було розроблено двохвиткові кільцеві індуктори як прямокутного, так і круглого поперечного перерізу (див.рис.1.15) [51, 58, 59], але з різними діаметрами кільцевих витків і площами їх поперечних перерізів. При цьому діаметр нижнього витка розташований під наплавлюваною поверхнею, а верхній - над наплавлюваною поверхнею (рис.1.15). Відповідно діаметр нижнього витка менший за діаметр диска, а верхній виток більший за діаметр диска; площа поперечного перерізу нижнього витка більша за площу поперечного перерізу верхнього витка. Це виконано з можливістю автоматизації процесу подачі заготовок зверху, для засипання шихти і наплавлення диска. Для інженерного розрахунку конструктивних розмірів двовиткових кільцевих індукторів для довільних діаметрів дисків і ширини зони наплавлення, була розроблена математична модель і алгоритм, побудовані графічні залежності і табличні дані, по яких підбираються конструктивні розміри двовиткового

кільцевого індуктора для довільних діаметрів дисків і ширини зони наплавлення виходячи з потреб технології. Результати розрахунку опубліковані в роботах [51, 60,61]. Як показали теоретичні і експериментальні дослідження при наплавленні тонких дисків зубчатої форми з шириною наплавлення більшою ніж висота зуба, за допомогою двовиткового кільцевого індуктора приводить до перегрівання торця диска і наплавлюваного металу, що відображається в цілому на якості технологічного процесу наплавлення.

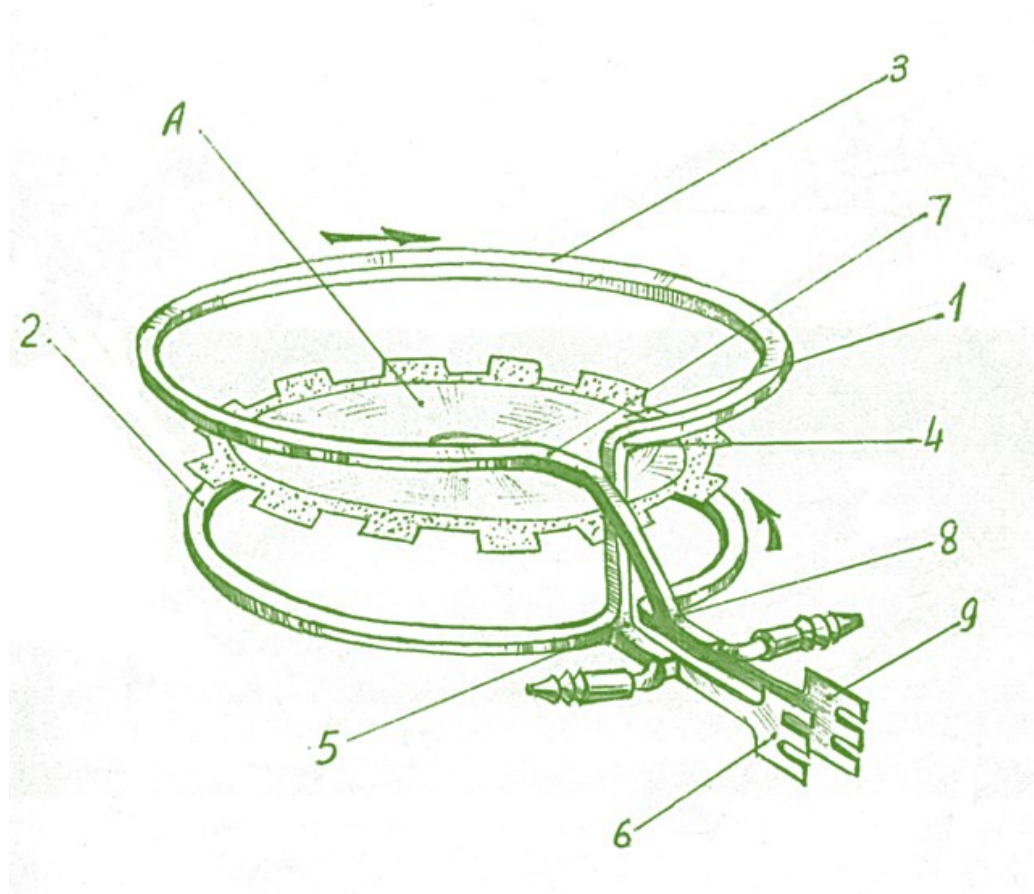


Рис. 1.15 - Двовитковий кільцевий індуктор для наплавлення тонких дисків зубчатої форми з прямокутним однаковим поперечним перерізом і різними діаметрами витків [51, 58,59]: 1 - диск; 2 - нижній виток; 3 - верхній виток; 4 - місце з'єднання верхнього витка з нижнім витком; 5 - місце з'єднання нижнього витка з штуцером для подачі води; 6 - ліва клемма; 7 - місце з'єднання другого кінця верхнього витка з нижнім витком; 8 - місце з'єднання нижнього витка з штуцером для відводу води; 9 - права клемма індуктора

З метою забезпечення рівномірного розподілу потужності в зоні наплавлення та рівномірної температури застосовують теплові та електромагнітні екрани [53, 54, 65-67].

Електромагнітні екрани застосовують для екранування електромагнітних полів і виготовляються, як правило, з листової червоної міді. Такі екрани застосовуються для відпуску буртиків шестерень коробки заміни передач [67,54] при використанні височастотного нагрівання, також при гартуванні внутрішніх поверхонь втулок [55,66].

Даний тип екранів застосовують з метою запобігання нагрівання поверхонь які не підлягають нагріванню, оскільки при нагріванні відбуваються структурні перетворення металу, а в деяких випадках це є небажаний ефект. При достатній близькості цих поверхонь до індуктора, вони можуть нагріватися до досить високих температур, що призводить до використання значної потужності і надмірних витрат електроенергії. Тому, з метою уникнення цих небажаних явищ використовують екрани у вигляді магнітопроводів [67,55].

При застосуванні електромагнітних екранів обов'язково повинна виконуватись умова, щоб відстань між екраном та індуктором була більшою ніж відстань між індуктором і деталлю, яка підлягає нагріванню. Такі екрани можуть мати будь-яку форму в залежності від форми ділянки деталі, яку захищають від непотрібного нагрівання[66].

В роботах [65,67] запропоновано застосування електромагнітного та теплового екранів при наплавленні тонких фасонних дисків порошкоподібними твердими сплавами з шириною зони наплавлення 10 - 50 мм (рис. 1.16). В даному випадку електромагнітний екран розміщений на торці диска, з метою забезпечення більш рівномірної температури по ширині зони наплавлення та усунення перегрівання торця диска і наплавленого металу. А тепловий екран, який виготовлений з азбестового матеріалу, розміщений на торці і в нижній поверхні диска, яка протилежна зоні наплавлення. Це дозволить зменшити тепловіддачу тепла з торця диска в оточуюче середовище, що підлягає наплавленню і тим самим скоротити час наплавлення.

повороту і зворотно-поступального переміщення поворотного стола у вертикальній площині. Механізм обертання стола має зачеплення привідної шестерні електроприводу і веденої шестерні, жорстко закріпленої на вертикальній осі поворотного столу, яка встановлена в корпусі рами з можливістю обертання і вертикального переміщення.

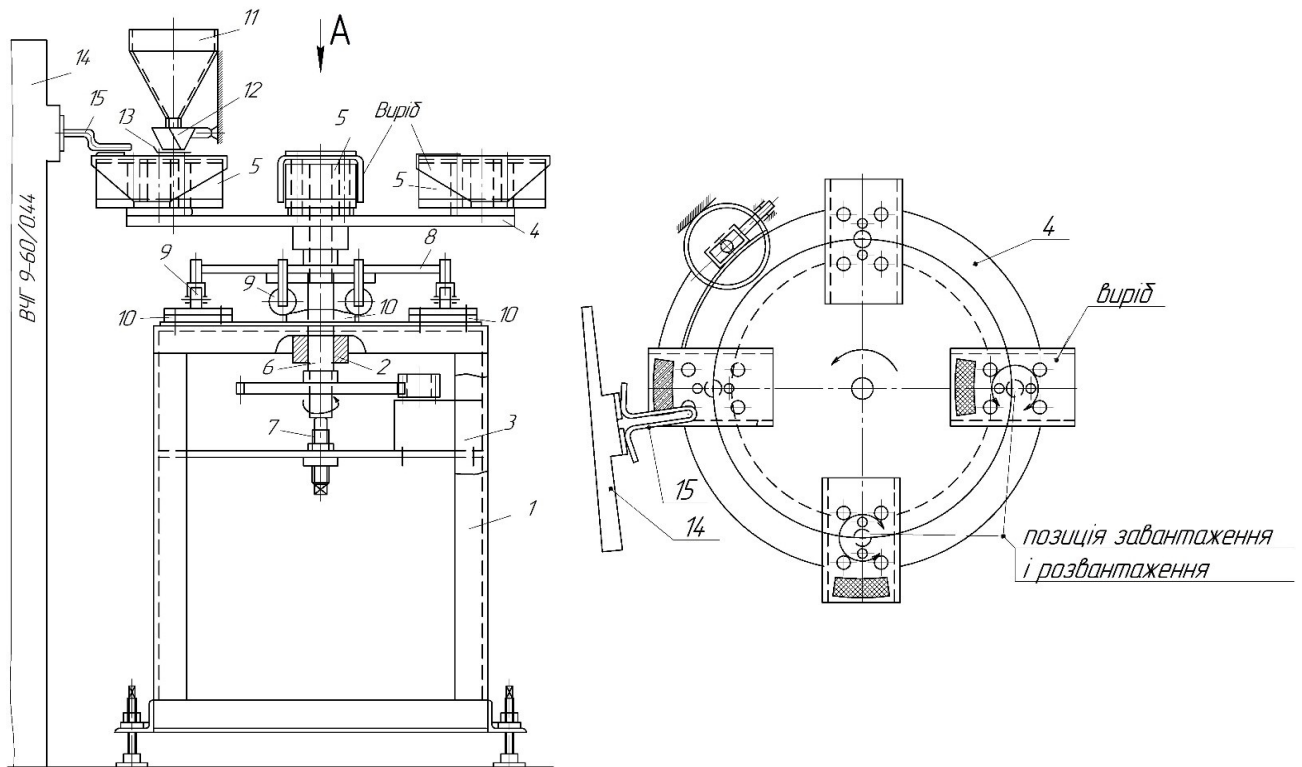


Рис. 1.17 Схема напівавтомата для індукційного наплавлення [68]:

1 - рама, 2 - корпус, 3 - електропривід, 4 - поворотний стіл, 5 - ложементи, 6 - вісь, 7 - опора, 8 - диск, 9 - ролики, 10 - копіри, 11 – бункер. 12 – дозатор, 13 – заслінка, 14 - високочастотний генератор, 15 – індуктор.

Напівавтомат оснащений бункером з твердоподібним порошкоподібним сплавом, який забезпечений дозатором з заслінкою, яка взаємодіє по черзі з відповідним ложементом. Механізм зворотно-поступального переміщення поворотного стола містить жорстко встановлений на вертикальній осі диск, забезпечений по периметру опорними роликами по числу позицій ложементів. При обертанні поворотного стола взаємодіючими з копірами, жорстко закріпленими на рамі, виконаними у вигляді пластин, кожна з яких має похилі поверхні з двох сторін для підйому і опускання вертикальної осі, по периметру

поверхні диска поворотного столу жорстко закріплені попарно прапорці по числу позицій ложементів, виконані у вигляді вигнутих пластин, взаємодіючих по черзі при обертанні столу з двома кінцевими вимикачами початку і кінця наплавлення, закріплених на рамі, а електропривід обертання виконаний двохшвидкісним з можливістю підведення виробів на позицію наплавлення з одночасним насипанням шихти і регулювання робочої швидкості при наплавленні.

Для індукційного наплавлення лап культиваторів в роботі [69] запропонована установка для автоматичного наплавлення. Для механічної орієнтації заготовок під наплавлення і підвищення якості процесу наплавлення, установка забезпечена кінематично-зв'язаним з цівочними барабанами повідковим колесом, виконаним у вигляді диска з лопатками і встановленим між похилим завантажувачем заготовок і транспортером, і орієнтиром, виконаним в вигляді симетрично розташованих відносно поздовжньої осі транспортера поворотних ступок, пов'язаних між собою шестернями і зубчастою рейкою, яка взаємодіє з пружиною, і закріплених на станині. А в зоні дозування і нагрівання на станині розміщений механізм притиску заготовок, виконаний у вигляді гнучкого нескінченного ланцюга з рядом послідовно встановлених уздовж неї пружинних роликів.

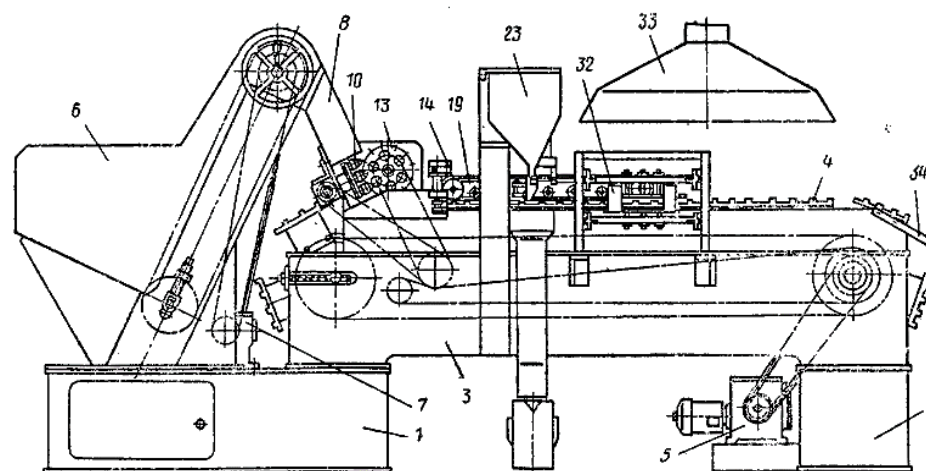


Рис. 1.18 Схематичне зображення установки для автоматичного наплавлення лап культиваторів [69]

В роботі [65] розроблені напівавтоматична установка і автоматична лінія для наплавлення долот і лап культиваторів неперервно-послідовним методом. Вони складаються з станини, транспортера, накопичувача, пристрою для вирівнювання деталей на транспортері, дозатора, бункера з деталями, пульта керування, прохідного індуктора і електроприводу транспортера.

Наплавлення культиваторних ножів, що мають криволінійну різальну поверхню, виконують на розробленій установці карусельного типу [65]. На установках з карусельним столом можна наплавляти деталі з плоскою зміцнювальною поверхнею, яка має прямолінійну, криволінійну або іншу конструкцію (як, наприклад, долотоподібний леміш).

Основним недоліком цих ліній і установок є низька продуктивність процесу наплавлення, а також низький рівень механізації на позиціях подачі заготовок, засипання шихти, наплавлення і розвантаження деталей.

Авторами в роботі [70, 65] запропонована напівавтоматична установка для індукційного наплавлення неперервно-послідовним способом тонких дисків з суцільною різальною кромкою (рис. 1.19). Дана установка складається з високочастотного генератора СВЧ 1 та індуктора 2, по обидві сторони якого розташовані дві позиції ручного завантаження і механічного розвантаження деталей. На консолях 3 розміщені встановлювальні гнізда 4 і затискні пристрої 5. Консолі 3 розташовані на осях 6, на яких встановлені також ричаги 7 з дозаторами 8, наплавлюваної шихти і копіювальними роликками 9. Між позиціями завантаження і розвантаження розміщений механізм 10, який забезпечує попадання виробу 11 по направляючій 12 на стрічку транспортера 13. Консолі 3 зв'язані шарнірною тягою 14 і приводяться в рух пневмоциліндром 15. Ричаги 7 переміщуються під дією пневмоциліндрів 16, а вироби 11 притискаються затискним пристроєм 5 за допомогою пневмоциліндрів 17. Встановлювальні гнізда 4 приводяться в обертання механізмом 18 через ланцюгову передачу 19.

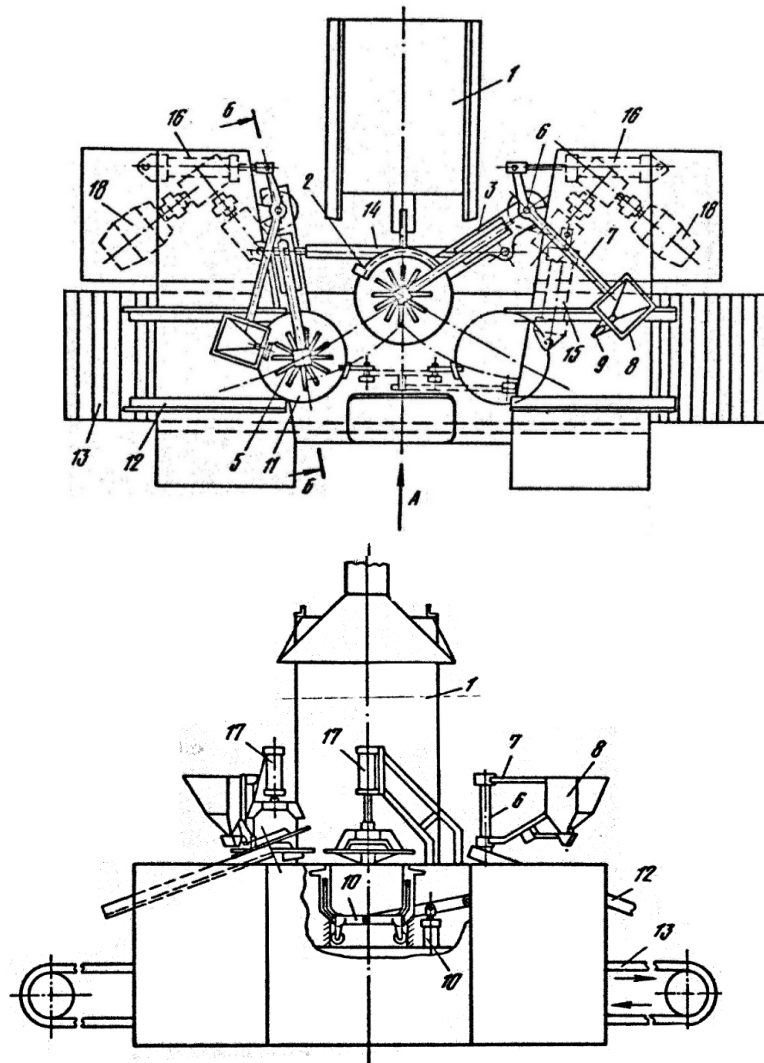


Рис. 1.19. Напівавтоматична установка для наплавлення тонких дисків [65, 70]

Недоліком даної установки є низька продуктивність процесу наплавлення, ручне завантаження деталей, велика енергоємність, яка пов'язана з режимом наплавлення, короблення деталі, для усунення якого необхідна операція рихтування.

В роботі [65] автором запропонована автоматична потокова лінія індукційного наплавлення тонких фасонних дисків. Дана лінія дозволяє підвищити продуктивність процесу наплавлення шляхом зменшення часу на нагрівання. Вона складається з поворотного стола який оснащений двовитковими кільцевими індукторами за числом поворотних планшайб і пристосуванням для під'єднання клем високочастотного генератора до індукторів, розташованого на основі між поворотним столом та генератором,

при цьому витки кожного кільцевого індуктора розташовані по обидві сторони базової площини поворотної планшайби співвісно до осі повороту, а пристосування для під'єднання клем високочастотного генератора до індукторів виконано у вигляді піднімальної плити з упором у формі зрізаної піраміди силовими пневмокамерами, які розташовані по обидві сторони упору і оснащені шарнірно встановленими на кінцях штоків діелектричними прокладками з мідними пластинами (рис. 1.20).

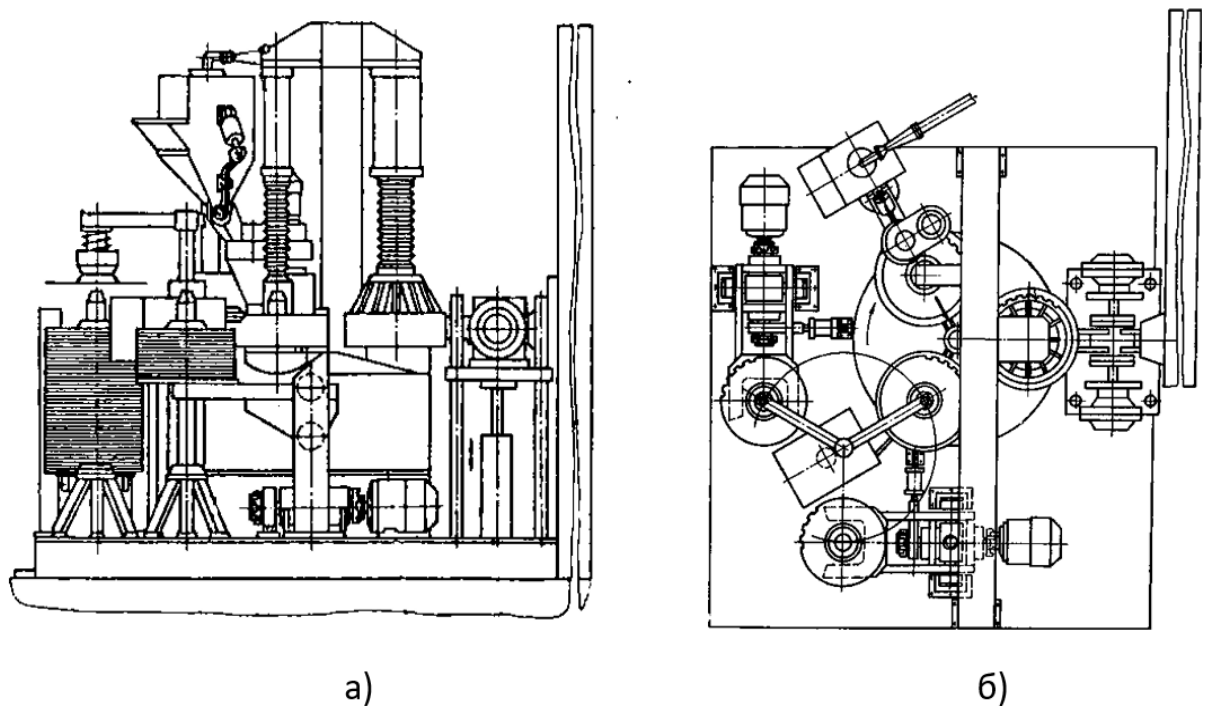


Рис. 1.20 - Загальний вигляд автоматичної потокової лінії, для наплавлення тонких фасонних дисків: а – вигляд збоку, б – вигляд зверху

Як показує проведений аналіз обладнання для індукційного наплавлення тонких плоских деталей (в тому числі дисків), що вимагає вдосконалення його з метою підвищення якості та експлуатаційних характеристик наплавленого шару металу. Для виконання цих задач необхідно розробити нове обладнання, включаючи індуктор для практичного використання процесу наплавлення тонких плоских деталей з додатковим введенням механічної вібрації в процесі наплавлення та високочастотного обладнання.

1.4. Задачі дослідження

Проведений аналіз найбільш поширених способів підвищення експлуатаційних властивостей деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин, показав, що для зміцнення деталей такого типу найбільш ефективним є індукційне наплавлення. Однак існуючі способи індукційного наплавлення не забезпечують необхідної якості наплавленого металу, а відповідно і експлуатаційних властивостей.

Метою роботи є підвищення стабільності товщини шару наплавленого металу та експлуатаційних характеристик тонких деталей машин шляхом удосконалення та обґрунтування раціональних параметрів в процесі індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації.

Для розв'язання поставленої мети необхідно:

- на основі аналізу відомих способів наплавлення тонких деталей машин і результатів наведених теоретично-експериментальних досліджень розробити технологічний процес індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації;

- розробити розрахунково-математичну модель для визначення параметрів структури наплавленого металу індукційним способом із застосування механічної вібрації;

- розробити аналітичні залежності для визначення впливу частоти та амплітуди коливання механічної вібрації розплавленого металу на зміну середнього діаметра рухомої частинки кластера;

- провести експериментальні дослідження відхилення товщини наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі залежно від зміни основних параметрів індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації;

- розробити спеціальне обладнання для реалізації запропонованого технологічного процесу наплавлення і забезпечення впровадження його на практиці.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРАЦІЇ

Для покращення властивостей поверхневих наплавлень часто застосовують вібраційну обробку. Це пов'язано з тим, що одночасно високу зносостійкість та підвищену технологічність твердих наплавлювальних гетерогенних сплавів можливо отримати тільки за умов ультра дисперсного подрібнення надлишкових вкраплень карбідів, боридів та інших твердих хімічних сполук до розмірів 0,5-0,005 мкм [71]. Як показано в працях [72, 73] дія ультразвуку (вібрації) призводить до наступних змін структури: зменшенню середньої величини зерна; усуненню стовпчастої структури і утворенню рівноважного зерна; підвищенню однорідності зливка, зменшенню міри розвитку лікваційних процесів; більш рівномірному розподілу неметалевих включень за усім обсягом зливка. Таким чином, проблема розробки технології та алгоритму ультрадисперсного подрібнення є актуальною на даний час, а використання ультразвукових технологій дозволить підвищити однорідність структури разом з подрібненням структури наплавленого металу, що забезпечить підвищені міцнісні характеристики і високу зносостійкість сплаву.

В сучасних роботах, присвячених впливу вібрації на кристалізацію сплавів, вже зроблені спроби побудови кількісної теорії впливу вібрації на кристалізацію металевих сплавів. В першу чергу це стосується побудові наближених залежностей для наближеного визначення розмірів зерен за частотою і амплітудою вібрації (див. наприклад [74-76]), в основу яких покладені ідеї авторів роботи [77] оцінки руйнування вібраційним полем коагуляційних структур в електролітах. В даному розділі при побудові математичної моделі для опису подрібнення структури наплавлених поверхонь вібраційним полем також використані дані роботи [77], а також проведені розрахунки параметрів структури індукційного наплавлення

порошками високовуглецевого хромистого сплаву ПГ-С1 (сормайт 1) на поверхні із сталі Ст3.

Основні результати, що отримані в даному розділі, опубліковані в роботах [78-81, 97].

2.1. Вібраційна обробка металевих розплавів

Ультразвукова обробка зварних з'єднань. В сучасній практиці дії ультразвуку на метал отримали розповсюдження наступні методи: ультразвукова ударна обробка, дія ультразвуку на метал, що кристалізується, і дія ультразвуку на метал в твердій фазі. Кожний з методів має свої переваги і недоліки, і вибір методу дії – складна задача, при вирішенні якої фахівець повинен чітко уявляти кінцеву мету.

Найбільш ефективна зміцнююча технологія – ультразвукова ударна обробка. Зразки для досліджень, технологія і технологічні варіанти УУО виготовлені і розроблені авторами [72]. Позитивні результати показало використання УУО при обробці поверхні низьколегованої низько вуглецевої феритно-перлітної сталі 12Х1МФ. Ударна УЗО зварних з'єднань зі сталі 12Х1МФ призводила до зміни структури поверхні: в зоні основного металу спостерігалось подрібнення зерен в 3-4 рази, в зоні зварного шва – подрібнення слабке, а в зоні термічного впливу – утворення більш світлого поверхневого шару. Ультразвукова обробка поверхні зварних з'єднань сталі 12Х1МФ після застосування УЗО $\times 100$ привела до подрібнення зерен в 3-4 рази, утворення більш світлого поверхневого шару сталі 12Х1МФ, а також підвищення міцністних характеристик на 2 – 3%, твердості поверхні – на 25-30%, циклічної довговічності зварного з'єднання – в 4-5 разів, а також підвищення границі повзучості основного металу [73]. Було встановлено, що при дії ультразвукових коливань (УЗК) на структуру металу, що деформується, спостерігається два нелінійних ефекти: «акустичне знеміцнення» і «акустичне зміцнення» [82]. Автори робіт [83, 84] вперше помітили зниження статичних напружень під дією УЗК, необхідного для здійснення пластичної деформації при розтяганні

монокристалів цинку. В роботах [83, 84] були наведені цікаві спостереження відносно вмикання імпульсу УЗК. За даними роботи [85-87], для відпалених м'яких сталей (0,37% С) при дії на них циклічних навантажень величина межі плинності підвищується на 16-21%, а відносне звуження зменшується на 7-57%.

В роботі [88] розроблено алгоритм та реалізовано аналітично-імітаційну модель, що дозволяє прогнозувати структуру наплавленого металу під дією ультразвукових коливань. Створений програмний засіб як інструмент надає можливість відтворити процес кристалізації твердої надлишкової фази в часі та дозволяє відстежувати динаміку кількості кристалів і їх середній діаметр. Аналіз розробленої моделі дозволив встановити, що зміна кількості і діаметра зерен відбувається найбільш інтенсивно в початковий момент кристалізації, а за рахунок варіювання технологічних параметрів коливання середній діаметр подрібнених структурно-фазових складових може змінюватись у діапазоні 0,25-0,005 мкм. Тож, доведено принципову можливість того, що використання ультразвукових технологій дозволяє в наплавленому металі на стадії кристалізації підвищити однорідність структури разом з ультра дисперсним подрібненням твердих надлишкових вкраплень.

Вплив вібрації на процес кристалізації розплаву. В даний час не існує однозначної думки про вплив вібрації на процес кристалізації розплаву. З аналізу літературних джерел випливає (див. наприклад [89-91]), що вібраційна обробка розплаву призводить до інтенсивного зародження нових кристалів. При цьому виділяється два основних механізми динамічного зародження кристалів під дією вібрації. У першому випадку в рідині протікає процес спонтанного зародження кристалів, обумовленого переохолодженням. В іншому випадку під дією вібрації різко зростає число кристалів у твердуючій рідині за рахунок дроблення вже існуючих кристалів. З усіх теорій, що розглядають процес спонтанного зародження кристалів під дією вібрації, для низькочастотної вібрації можна виділити теорію, представлену в роботах В.М. Говоркова і К.Н. Шабаліна [92]. Відповідно до цієї теорії при динамічному впливі вібрації на розплав, зародки внаслідок більшої щільності в порівнянні з рідким металом

отримують відмінні від нього прискорення і повинні бути вибиті з тих місць, де вони виникли. Інерційне зміщення зародків супроводжується руйнуванням бар'єрів, які з'являються при їх виникненні. Виділяють два типи бар'єрів: перший, тепловий бар'єр, утворюється за рахунок виділення теплоти кристалізації при формуванні зародка, другий, концентраційний бар'єр, утворюється за рахунок домішок і компонентів, які не увійшли до решітки зародка. При вібрації зародки вириваються з бар'єрів, що перешкоджають їхньому росту, і потрапляють в ділянки з вихідною температурою, що дозволяє їм зберегтися і рости до стійких розмірів. Зростання це може відбуватися, як в результаті молекулярного нарощування поверхневих шарів, так, можливо, і при зіткненні і зрощуванні подібних первинних утворень один з одним.

У роботі В.М. Говоркова представлена формула, що характеризує залежність зміщення частинки твердої фази від параметрів вібраційного впливу, з якої випливає, що при заданих параметрах вібрації величина зміщення частинки твердої фази визначається її розмірами і в'язкістю рідини. Розрахунки, проведені на основі цієї формули, показали, що зміщення твердих частинок, близьких за розміром до критичного зародку $GKP = 1,35$ мкм, складають $0,0003$ мкм, що вкрай незначно.

Цікаві результати в цьому плані отримані в роботі [93], де встановлено, що вплив вібраційного зсуву твердих частинок в рідкій міді не робить істотного впливу на процес формування кристалічної будови мідних злитків при встановлених оптимальних параметрах вібрації. Оскільки встановлені оптимальні параметри вібрації не призводять до активного зародження кристалів з рідкого металу, можна припустити, що зародження нових кристалів відбувається за рахунок руйнування вже існуючих під дією вібрації.

В названій вище роботі також зроблено висновок, що для низькочастотної вібрації можна виділити два механізми, які пояснюють обламування дендритів - гідродинамічний і резонансний. Згідно гідродинамічного механізму відбувається руйнування зростаючих кристалів за рахунок руху розплаву поблизу фронту кристалізації. Відомо, що при

вібраційній обробці поблизу фронту кристалізації виникають різноспрямовані коливальні потоки рідкого розплаву. Тому при розвитку достатньої інтенсивності потоків створюються умови для зрізання дендритів. Даний механізм добре пояснює причини утворення нових центрів кристалізації, однак він не дозволяє пояснити існування оптимальних параметрів вібрації. Згідно резонансного механізму, при вібраційній обробці виникають резонансні коливання зростаючих дендритів, що призводить до їх механічного руйнування. Дана теорія добре пояснює існування оптимальних параметрів вібрації, однак, відповідно до встановлених залежностей параметрів структури міді від параметрів вібрації, у міру наближення до оптимальних параметрів вібрації відбувається поступове зменшення середньої площі перетину зерна і середнього розміру дендритних осередків, що не властиво для резонансних явищ. Тому визначити переважну роль того чи іншого механізму руйнування дендритів на процес кристалізації досить складно. Можна припустити, що при вібраційній обробці в кристалізаційному розплаві міді має місце сукупність представлених механізмів впливу на кристалізований розплав, і при певному їх поєднанні створюються оптимальні умови для обламування зростаючих дендритів. Уламки кристалів підхоплюються потоками, що виникають в виливниці внаслідок вимушеної конвекції рідкого металу, і розносяться по всьому його об'єму рідкого металу. Частина уламків розплавляється, що призводить до охолодження рідкого металу, а більш великі уламки стають зародками, що призводить до формування рівноважної структури мідного зливка. Виходячи з вищесказаного, можна припустити, що при напівнепреривному литті міді, для якого характерна інтенсивна вимушена конвекція в лунці рідкого металу, представлені процеси будуть протікати більш інтенсивно, ніж при наповнювальному литті. Як впливає із аналізу досліджень в приведених вище роботах метод ультразвукового впливу (вібрації) - це один із досліджених методів впливу на структуру виливка. Досліди показали що обробка ультразвуком під час кристалізації зливка металу, який має грубозернисту структуру, приводить до дрібнозернистої структури. Механічні властивості

металу покращуються. Метод ультразвукового рафінування заснований на тому, що при проходженні пружних коливань через рідке середовище (розплав) спостерігається явище кавітації, що приводить до розриву суцільності в рідкій фазі і утворення пустот, в які спрямовується розчинений в рідині (розплаві) газ. Унаслідок цього пружні коливання звукової та особливо ультразвукової частоти сприяють формуванню зародків газових бульбашок і стимулюють їх подальше зростання в рідкій фазі і коагуляцію до розмірів, які спричиняють активне виділення газу з рідини. Застосування ультразвукової дії супроводжується зменшенням опору тертя, глибина поверхневих складок зменшується, кількість поверхневих пустот також зменшується в кілька разів, якість поверхні поліпшується. Також ультразвук за певної частоти та інтенсивності звуку застосовується в якості ультразвукової дегазації розплаву. Дегація розплавленого металу супроводжується його рафінуванням. При підвищенні інтенсивності ультразвуку загальне число бульбашок - зародків різко зростає.

Крім ефекту рафінування, при ультразвукової обробки розплавленого металу підвищується також його рідкотекучість, що особливо важливо в ливарному виробництві при заповненні форми. Відносне збільшення рідкотекучості під час наведення ультразвукових коливань характерно для всіх рідин і становить приблизно 25-30 %. Для кожної рідини необхідно проводити підбір частоти та інтенсивності коливань, щоб максимально знизити в'язкість при впливі ультразвуком. Дослідження ефективних технологій обробки розплавів ультразвуком при заливці в ливарну форму дає можливість одержувати вилівки будь-якої конфігурації і не обмежувати матеріал форми. Обробка розплавів при заливці в ливарну форму дозволяє одержувати сплави з дрібнозернистою структурою і заданими властивостями. При цьому не потрібно використання модифікуючих добавок. З аналізу літературних даних випливає, що ультразвукова і звукова вібрації сприятливо впливають на рідкотекучість, зменшують усадку і вміст газу, підвищують однорідність розплаву і подрібнюють кристали, що призводить до покращення властивостей металів і сплавів.

2.2. Природа сил взаємодії між частинками в розплаві

Для побудови розрахункової моделі подрібнення вібрацією структури розплаву необхідно проаналізувати зусилля, які діють між частинками в розплаві. Для цього скористаємося результатами праць [94, 95].

Сили притягання. Одним із видів таких сил є сили притягання, які за своєю природою є силами Ван-дер-Ваальса. Відомо, що сили Ван-дер-Ваальса мають потрійну природу. Якщо молекули є електростатичними диполями, то між різнойменно зарядженими кінцями діють електростатичні (кулонівські) сили притягання, звані орієнтаційними. Енергія орієнтаційного притягання зменшується обернено пропорційно шостого ступеня відстані між диполями. Якщо неполярну молекулу помістити в електричне поле, утворене полярної молекулою, то в неполярній молекулі утворюється (індукується) дипольний момент. Молекули починають взаємодіяти одна з одною. Ця енергія називається енергією індукційної взаємодії.

До третього типу сил міжмолекулярної взаємодії відносяться дисперсійні, або лондоновські сили [94]. Вони виникають внаслідок того, що нейтральні атоми створюють системи коливних зарядів внаслідок наявності позитивного зарядженого ядра і негативно заряджених електронів. Причиною дисперсійних сил є квантово-механічний ефект, пов'язаний з флуктуаціями електричних полів атомів і молекул. Ці флуктуації відбуваються на ультрафіолетових частотах і призводять до виникнення змінного диполя, здатного наводити диполі в інших молекулах. Дисперсійна взаємодія є синхронна з кількома молекулами без взаємної конкуренції, на відміну від орієнтаційних і індукційних сил, при дії яких спостерігається конкуренція між різними диполями. Якщо два диполі розташовані оптимально один до одного, то вони не можуть бути розташовані оптимально по відношенню до третього диполю. Дисперсійні сили є найбільш універсальними силами, що визначають енергію притягання. Для молекул вони також зменшуються пропорційно шостого ступеня відстані між атомами. Енергія орієнтаційної, індукційної та

дисперсійної взаємодії залежить від дипольного моменту молекул, поляризації атомів або молекул α_1, α_2 , характеристичних енергій $h \cdot \nu_1, h \cdot \nu_2$ і відстаней між молекулами H і визначається виразами [94]

$$U_{op} \approx -\frac{\mu^4}{K^2 T^2 H^6}, U_{ind} \approx -\alpha \mu^2 H^{-6}, U_{дисп} \approx -1,5 \frac{\alpha_1 \alpha_2 h \nu_1 \nu_2 H^{-6}}{\nu_1 + \nu_2}. \quad (2.1)$$

Дисперсійні сили між частинками діють на більшій відстані, ніж між молекулами, тобто є дальнодіючими. Причиною дальньої дії дисперсійних сил між частинками є їх адитивність. Для частинки, що представляє собою ансамбль атомів і молекул, дисперсійні сили, що діють між багатьма атомами, складаються. Енергія притягання між частинками може бути підрахована, як сума взаємодій молекул, що входять в різні частинки. Завдяки адитивності лондоновських сил енергія взаємодії між частинками набагато повільніше зменшується з відстанню, ніж енергія взаємодії між молекулами. Відповідна теорія пов'язана з ефектом електромагнітного запізнювання, який заснований на тому, що флюктуючі електромагнітні поля атомів поширюються зі швидкістю світла у розглянутому середовищі. При частоті 10^{15} c^{-1} за один період світло проходить відстань близько 100 нм. Якщо відстань між атомами перевищує 100 нм, то відбувається зміна фази коливання перш, ніж електромагнітна хвиля дійде від одного атома до наступного. Електромагнітні хвилі, які виходять від атомів, розділених відстанню більше 100 нм, не збігаються по фазі, мають різницю фаз, близьку до π , що призводить до ослаблення взаємодії. Це явище називається електромагнітним запізненням. Відповідна теорія приводить до висновку, що енергія взаємодії між частинками є ступеневою функцією відстані і змінюється обернено пропорційно деякій мірі відстані між частинками (H). Показник степеня залежить від форми поверхні і від відстані між ними. Для двох сфер радіусом r , які знаходяться одна від одної на відстані H , що становить величину від 10 до 20 нм і за умови $H \ll r$ лондоновська енергія притягання [94]

$$U_{prum} = -\frac{A \cdot r}{12H}, \quad (2.2)$$

де величина A є константою молекулярної взаємодії і називається константою Гамакера [94].

Вона враховує природу взаємодіючих тіл і виражається в одиницях виміру енергії. Значення константи Гамакера у вакуумі зазвичай становить 10^{-12} ерг (10^{-19} Дж). Константа Гамакера залежить від числа атомів в одиниці об'єму та поляризованості молекул. Значення цієї константи складається з окремих констант, що характеризують адгезійну і когезійну взаємодію. У рідині значення енергії притягання менше, ніж у вакуумі. Значення ефективної константи Гамакера визначається виразом $A = (\sqrt{A_2} - \sqrt{A_1})^2$, де індекси 1 і 2 відносяться до середовища і частинки. Коли частинка і середовище хімічно подібні, енергія притягання мала, так як значення A_1 і A_2 близькі і A мале. Сили притягання не залежать від зміни місць фази і середовища. Дві повітряні бульбашки у воді так само сильно притягуються одна до одної, як і дві краплі води того ж розміру в повітрі. Для двох паралельних півнескінченних пластин енергія притягання дорівнює [94]:

$$U_{прит} = -\frac{7 \cdot 10^{-3} A}{H^2}, \quad (2.3)$$

де H - відстань між пластинами.

Рівняння (2.3) застосовне для відстаней не більше як 100 нм. При великих відстанях на дисперсійну взаємодію впливає ефект електромагнітного запізнювання. При частотах ν_1 і ν_2 , близьких до 10^{15} c^{-1} і відстанях порядку 100 нм хвилі, що випромінюються різними атомами, мають різницю фаз, близьку до π , що призводить до ослаблення взаємодії, і вираз для енергії притягання має вигляд [94]:

$$U_{прит} = -\frac{KA}{H^3}. \quad (2.4)$$

Слід зазначити, що при $H = 0$ енергія притягання частинок $U_{прит} = -\infty$.

При розгляді сил, що діють між частинками, сили притягання зазвичай приймають негативними, а сили відштовхування - позитивними. Тому зміна енергії притягання в залежності від відстані між частинками зображується так, як це показано на рис. 2.1.

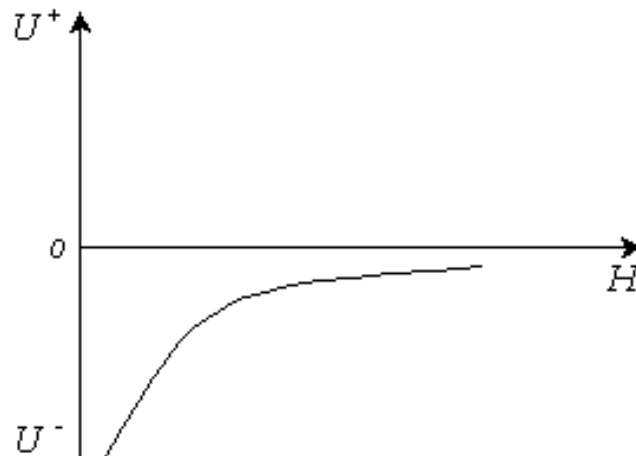


Рис. 2.1. Зміна енергії притягання в залежності від відстані між частинками [94].

Сили відштовхування. Довговічність ліофобних систем говорить про існування сил відштовхування між частинками. Сили відштовхування, що діють між частинками, призводять до підвищення стійкості колоїдних систем і є факторами стійкості. Вони мають різну природу і відповідають різним компонентам розклинювального тиску. Якщо стабілізатором є електроліт, і є подвійний електричний шар, то діє електростатичний фактор стійкості. Відштовхування між частинками не можна розглядати як відштовхування між однойменно зарядженими точковими зарядами і сили відштовхування не можна розрахувати за законом Кулона [94].

$$f = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon \cdot r^2}. \quad (2.5)$$

Сили відштовхування виникають за рахунок перекривання подвійних електричних шарів, і коли відбувається порушення симетрії розподілу іонів при $H \cong \chi^{-1}$ Б.В.Дерягін встановив експонентний закон зміни електричних сил, що визначають відштовхування частинок з відстанню [94]

$$U_{\text{эл}} = K \cdot \varphi \cdot e^{-H\chi}, \quad (2.6)$$

де χ - величина зворотна товщині подвійного електричного шару (ПЕШ).

На відміну від енергії притягання при $H = 0$, енергія відштовхування $U_{\text{відш}} = K$. Залежність енергії відштовхування від відстані між частинками зображена на рис. 2.2.

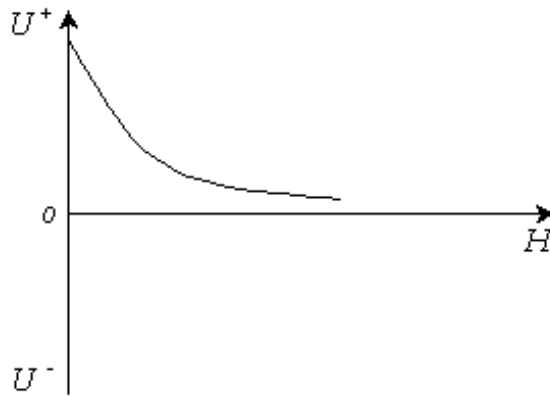


Рис. 2.2. Залежність енергії відштовхування від відстані між частинками [94].

Повна енергія взаємодії між частинками отримується шляхом складання енергії притягання в результаті дії молекулярних сил і відштовхування в результаті дії електричних сил.

$$U = U_{\text{эл}} + U_{\text{прит}} = R \cdot \varphi \cdot e^{-H\chi} - \frac{KA}{H^3}. \quad (2.7)$$

Результуюча потенційна крива взаємодії частинок показана на рис. 2.3.

При $H \rightarrow 0$, $U_{\text{відш}} \rightarrow K$, $U_{\text{прит}} \rightarrow -\infty$. На результуючій потенційній кривій є три області. В області малих H порядку 1 нм переважають сили притягання, так як при $H \rightarrow 0$, $U_{\text{відш}} \rightarrow K$, $U_{\text{прит}} \rightarrow -\infty$. Це проявляється в існуванні на

результуючій кривій первинного мінімуму U_{\min}^1 , або ближньої потенціальної ями. Існування U_{\min}^1 визначає необоротну агрегацію частинок.

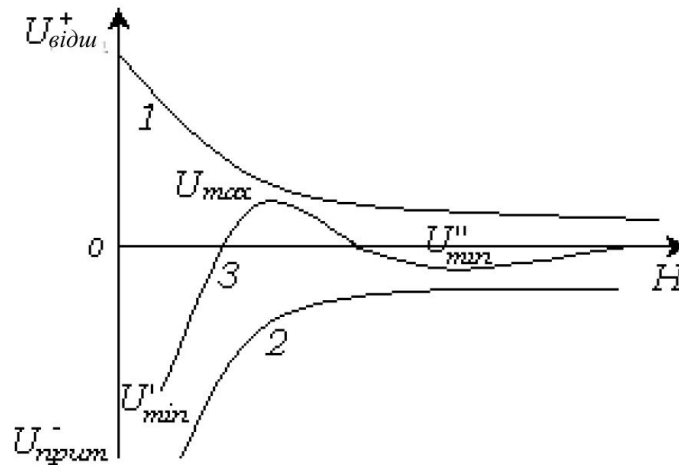


Рис. 2.3. Результуюча крива зміни енергії взаємодії частинок в залежності від відстані між ними. 1-енергія відштовхування, 2-енергія притягання, 3-повна енергія [94].

В області середніх відстаней $H \approx 100$ нм, рівних товщині іонної оболонки, переважають сили електростатичного відштовхування. У цій області відбувається перекривання ПЕШ сусідніх частинок і сили відштовхування великі. Це визначає існування на результуючій кривій енергетичного бар'єру U_{\max} , величина якого визначає ймовірність злипання частинок. Чим вище U_{\max} , тим менша ймовірність його подолання, тим стійкіше система. Енергія відштовхування є експотенційною функцією відстані між частинками, а енергія притягання - степеневою функцією. Експоненціальна залежність $y = a \cdot e^{-x}$ при великих значеннях x зменшується швидше $y = a \cdot e^{-x}$ степеневої. Тому притягання переважатиме при великих відстанях між частинками. В області великих відстаней $H > 100$ нм переважають сили притягання, тому вони зменшуються по степеневій функції повільніше, ніж сили відштовхування. В результаті цього на результуючій кривій з'являється вторинний мінімум U_{\min}^{11} , чи далека потенційна яма. Енергетична складова U_{\min}^{11} визначає оборотну агрегацію частинок, у тому числі явище тиксотропії. Існування U_{\min}^{11} пояснює ряд інших явищ. Так, малі частинки, які прилипли до стінки, здійснюють близько неї

інтенсивний броунівський рух. У латексах можна спостерігати рух дрібних частинок навколо більших. Результируюча потенційна крива взаємодії частинок може бути представлена примітивною механічною моделлю у вигляді кулі, що знаходиться на рельєфній поверхні [94] (рис. 2.4)

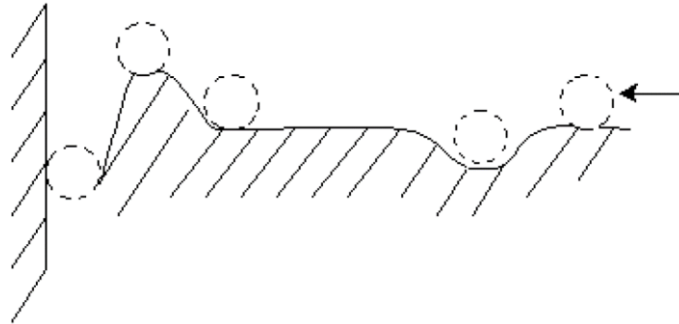


Рис. 2.4. Механічна модель взаємодії частинок [94].

Хоча ця модель примітивна, однак вона наочно демонструє можливість різних частинок вийти з потенційної ями в залежності від їх положення.

2.3. Механізми коагуляції в розплавах металу

Розплав металу на початку кристалізації являє собою ультрамікрогетерогенну систему [96], розміри частинок якої лежать в межах від 1 до 100 нм і яка характеризується коагуляційною структурою, а в кінці кристалізації - зв'язно-дисперсну систему з конденсаційно-кристалізуючою структурою. Тому для розуміння всього процесу кристалізації металу з ціллю побудови розрахункової моделі подрібнення його структури вібраційним полем необхідно дослідити і проаналізувати таку його проміжну стадію, як коагуляцію його частинок, розглядаючи рідкий метал як електроліт. При цьому будемо користуватися фундаментальними положеннями колоїдної хімії, викладених в роботах [77, 94].

Коагуляцією називають зменшення дисперсності системи в результаті злипання частинок дисперсної фази. Коагуляція може відбуватися внаслідок старіння системи, зміни температури, механічної дії, дії електромагнітного

поля та ін. Однак найбільш важливе теоретичне і практичне значення має коагуляція під дією електролітів. Розрізняють коагуляцію явну, спостережувану неозброєним оком, і приховану, спостережувану за допомогою приладів. Коагуляція може бути викликана дією різних факторів: температури, механічних впливів, введення електролітів та інших речовин. Агрегативна стійкість різко змінюється при малих добавках електролітів. При критичній концентрації настає швидка коагуляція. Значення критичної концентрації, або порога коагуляції, різко зменшується із зростанням заряду противоіонів відповідно до правила Дерягіна-Ландау:

$$C_U = \frac{B}{z^6}. \quad (2.8)$$

Можливість коагуляції, тобто незворотного злипання частинок, залежить від співвідношення двох енергетичних характеристик притягання і відштовхування: U і KT [77, 94]. Якщо $U_{\max} \gg KT$, то система стійка, коагуляція не відбувається. Якщо $U_{\max} \ll KT$, то відбувається коагуляція. При цьому ймовірність злипання ε , тобто відношення числа злипання до числа зіткнень, дорівнює одиниці, кожне зіткнення призводить до злипання, що відповідає швидкої коагуляції, яка протікає при відсутності на поверхні частинки захисного шару. При $U_{\max} \approx KT$ деякі частинки злипаються, інші, для яких $U_{\max} > KT$, не злипаються. При ймовірності злипання $\varepsilon < 1$ відбувається повільна коагуляція. У цьому випадку кінетична енергія частинок різна, а на поверхні в окремих місцях зберігається захисний шар. Слід зазначити, що швидка коагуляція може відбуватися повільно при малій концентрації, а повільна швидко при перемішуванні (як при вібрації). Величина U_{\min}^{11} визначає оборотне злипання або агрегацію частинок. Частинки притягуються одна до одної, але при цьому зберігається прошарок рідини між ними, $N \neq 0$ і агрегати знову руйнуються внаслідок теплового руху. Якщо $U_{\min}^{11} < KT$, то частинки не фіксуються в далекій ямі, і якщо при цьому $U_{\max} \gg KT$, то розійдуться, а якщо $U_{\max} \geq KT$, то

потраплять у ближню потенційну яму. Якщо $U_{\min}^{11} > KT$, то частинки фіксуються в далекій ямі, відбувається оборотна агрегація частинок, дальнодія притягання.

Вище йшлося про те, що електростатичне відштовхування частинок обумовлено наявністю подвійного електричного шару. Енергія відштовхування залежить від параметрів подвійного електричного шару - його товщини, потенціалу поверхні φ_0 і ξ - потенціалу. Чим вище значення φ і ξ - потенціалів, тим сильніше відбувається відштовхування при перекриванні ПЕШ. При введенні електроліту змінюються параметри ПЕШ, отже, змінюється стійкість дисперсної системи, і може статися коагуляція. Розглянемо коагуляцію під дією індиферентних електролітів, нездатних хімічно взаємодіяти з поверхнею. При їх введенні значення потенціалу поверхні не змінюється, а ξ - потенціал зменшується, ПЕШ стискається, тому внаслідок підвищення концентрації противоіонів компенсація заряду потенціалу утворюючих іонів відбувається в шарі меншої товщини. Енергія відштовхування змінюється симбатно зміни потенціалу, тобто крива йде крутіше з введенням електроліту. При введенні електроліту величина U_{\max} зменшується, і коли $U_{\max} \geq KT$, відбувається концентраційна коагуляція, тобто коагуляція, яка відбувається при введенні індиферентного електроліту і обумовлена підвищенням концентрації противоіонів (рис. 2.5).

Концентраційна коагуляція відбувається при досягненні порогу коагуляції $C = K \cdot z^{-6}$, де z – валентність іона, який додається.

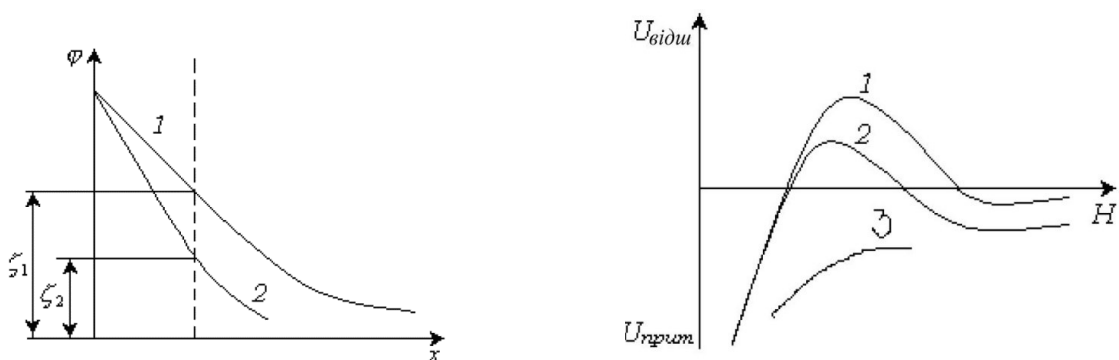


Рис. 2.5. Концентраційна коагуляція [94]: 1-початковий стан; 2-після введення електроліту; 3 – швидка коагуляція.

Коагуляція під дією неіндиферентних електролітів називається нейтралізаційною, так як вона викликана нейтралізацією заряду поверхні при введенні неіндиферентного електроліту. Іони неіндиферентного електроліту добудовують кристалічну решітку поверхні частинки. Якщо потенціалоутворюючий іон вводимого електроліту має знак протилежний заряду частинки, то значення φ_0 і ξ зменшуються (рис. 2.6).

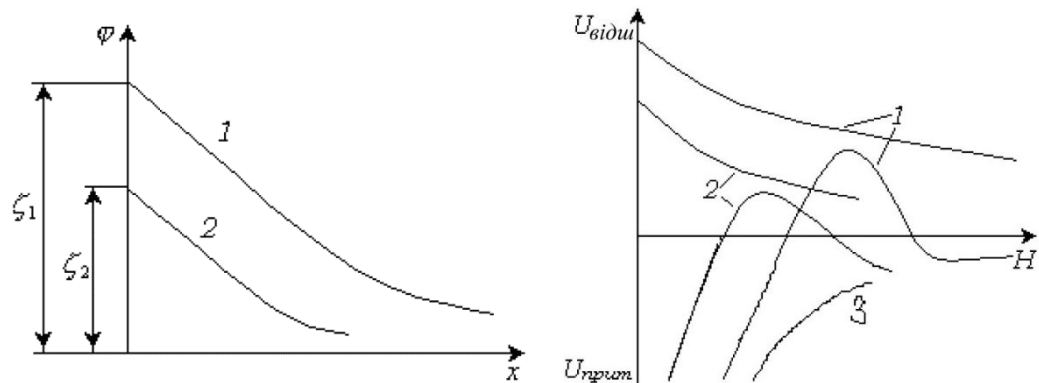


Рис. 2.6. Нейтралізаційна коагуляція [94]: 1-початковий стан; 2-після введення електроліту; 3-швидка коагуляція.

На цьому рисунку енергія відштовхування змінюється, а значення U_{\max} на результуючій кривій зменшується. Коли U_{\max} досягає КТ, відбувається нейтралізаційна коагуляція. Найменша концентрація електроліту, при якій починається коагуляція, називається порогом коагуляції. Поріг коагуляції залежить від методу його визначення і від концентрації золю. На рис.2.7 показана залежність швидкості коагуляції від концентрації електроліту.

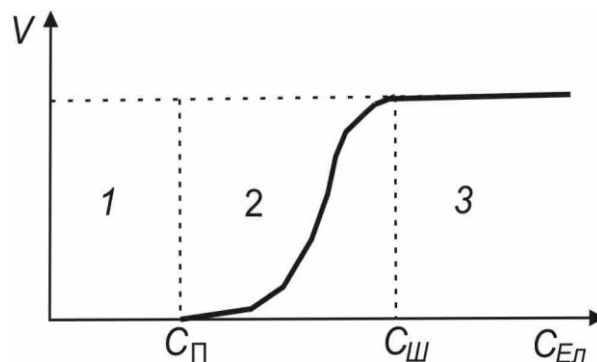


Рис. 2.7. Залежність швидкості V коагуляції від концентрації електроліту [94].

В області 1 система є стійкою, в області 2 відбувається повільна коагуляція, в області 3 - швидка коагуляція. Точки перегину відповідають порогам повільної (C_{II}) і швидкої (C_{III}) коагуляції. Введення електроліту в дисперсну систему знижує потенційний бар'єр, який при певній концентрації, що відповідає порогу швидкої коагуляції, стає рівним нулю, а швидкість коагуляції - максимальною.

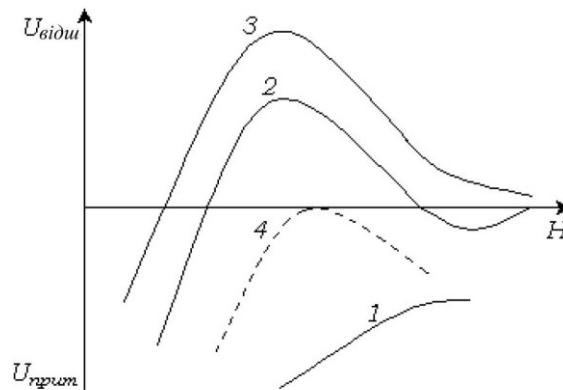


Рис. 2.8. Потенційні криві для дисперсних систем з різною стійкістю [94].

Трьом станам стійкості дисперсних систем відповідають три характерних види потенційних кривих (рис. 2.8). Тут крива 1 відповідає такому стану дисперсної системи, коли при будь-якій відстані між частинками енергія притягання переважає над енергією відштовхування. При такому стані системи спостерігається швидка коагуляція. Енергетичний бар'єр і вторинний мінімум на кривій 2 вказують на такий стан системи, коли можлива оборотна коагуляція. Високий потенційний бар'єр і відсутність мінімуму на кривій 3 відповідає агрегативно стійкій системі, коли ймовірність утворення агрегатів часток вкрай мала. При концентрації електроліту, рівної порогу швидкої коагуляції, потенційна крива знаходиться в області негативних значень енергії і має максимум, який відповідає нульовому потенційному бар'єра і розташованому на осі абсцис (пунктирна крива 4 на рис. 2.8). Точці дотику потенційної кривої осі абсцис відповідають дві умови: рівність нулю сумарної енергії взаємодії частинок і її $U = 0$ і $dU/dH = 0$. Ці умови відповідають не ізоелектричній точці, а деякому критичному значенню ξ - потенціалу, який лежить в межах $25 \div 40$ мВ.

2.4. Розрахункова модель оцінки впливу параметрів вібрації на структуру наплавленого металу

На основі відомих [97] результатів експериментальних досліджень показано, що вібрація під час наплавлювання може значно покращувати характеристики наплавлювального шару. Про те, параметри вібрації (частота і амплітуда) вздовж поверхні наплавлювання можуть значно змінювати ці характеристики, як в кращу, так і в гіршу сторону. Тому в даному розділі зроблена спроба побудувати розрахункову модель для вибору таких параметрів вібрації a - амплітуда і ω - частота, за яких будуть найкращі структурні характеристики наплавлювального шару. За критерій оптимальності таких характеристик вибрана величина зерна D , за якого ці характеристики найкращі, тобто треба встановити залежності між величинами a, ω, D , а також характеристиками розплаву досліджуваного металу наплавки.

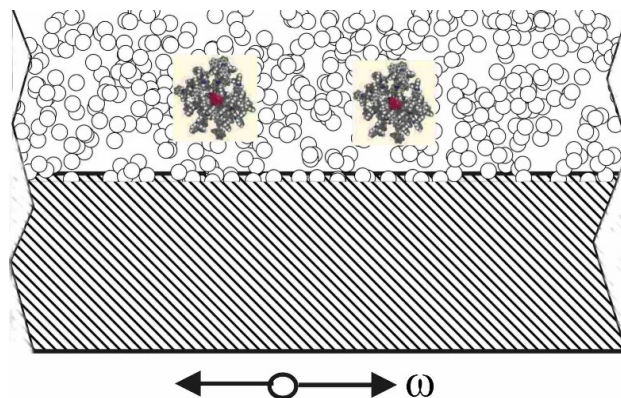


Рис. 2.9. Схема утворення кластерів в розплавах під час наплавлення за вібрації [94].

Розглянемо систему (див. рис. 2.9) підкладка, розплав металу на підкладці, яка вібрує вздовж поверхні наплавлення з частотою ω і амплітудою a . Товщина розплаву металу вважається відносно малою (в праці [97]).

В розплавленому металі при напавленні утворюються об'єднання в кластери частинок металу в результаті коагуляції – злипання цих частинок (рис. 2.9). Частинки, що представляють собою невеликі кластери, але більші ніж

0,1мкм, об'єднуються у більші за розміром, але менші ніж 100 мкм [77]. Цей процес проходить наступним чином [94].

Розплавлений метал розглядаємо як електроліт. Між частинками розплавленого металу діють сили різної природи (див. рис. 2.10). При зближенні частинок дисперсної фази виникає розклинюючий тиск рідини металу, яка міститься між ними. Цей тиск визначається молекулярними силами притягання і електростатичними силами відштовхування (див. параграф 2.2). Сили притягання — це сили Ван-дер-Ваальса, які складаються із сил орієнтаційної, індукційної та дисперсійної взаємодії. Сили відштовхування виникають при перекриванні дифузних шарів частинок (рис. 2.11).

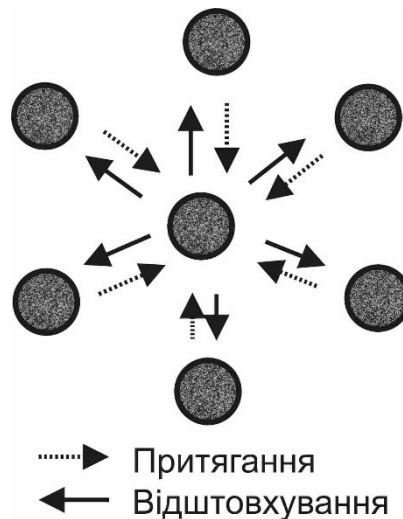


Рис. 2.10 Силова взаємодія між частинками в металевому розплаві [94].

Стан системи визначається балансом енергії притягання і енергії відштовхування, який визначається рівнянням [94]:

$$U = Be^{-kh} - Ah^{-2}, \quad (2.9)$$

де U — сумарна енергія взаємодії частинок; B — множник, який залежить від значення електричних потенціалів, властивостей середовища, температури; k - величина, зворотна товщині дифузного шару; h - відстань між частинками; A - стала молекулярних сил притягання (стала Гамакера). На великих відстанях між частинками сумарна енергія U буде від'ємна (далекий потенціальний

мінімум). На середніх відстанях (~ 100 нм) енергія U буде додатна, що означає утворення енергетичного бар'єру, тобто, на цій відстані переважають сили електростатичного відштовхування. На близьких відстанях, де превалюють сили притягання, сумарна енергія взаємодії частинок U буде додатна (близький потенціальний мінімум). Якщо енергія, яка відповідає потенціальному бар'єру, менша за середню кінетичну енергію частинок, то вони можуть подолати електростатичні сили відштовхування, наблизитися на дуже малу відстань (проходить перекривання подвійних електричних шарів), де переважають молекулярні сили притягання і злипнуться (тобто проваляться в близьку потенціальну яму).

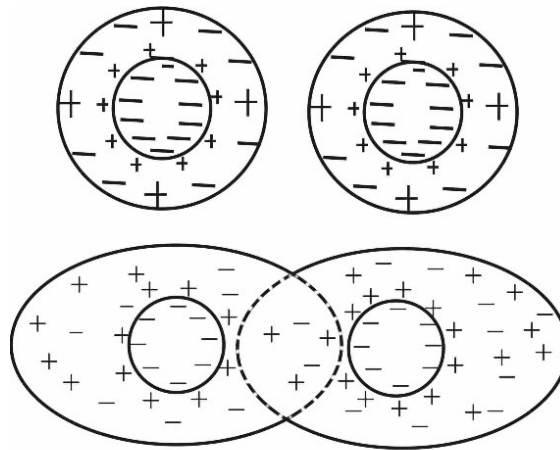


Рис.2.11. Перекривання подвійних електричних шарів і злипання частинок в розплаві [94].

Ця глибока потенціальна яма пояснює механічну міцність коагуляту. Частинки на близьких відстанях міцно зв'язуються за рахунок ван-дер-ваальсових сил, і агрегати, що утворилися, набувають деяких властивостей твердого тіла. Якщо енергетичний бар'єр високий, частинки не зможуть його подолати і утворити агрегати. Зниження енергетичного бар'єру знижує і агрегативну стійкість системи. Наприклад, додаючи електроліт, можна зменшити товщину дифузного шару і тим самим зменшити сили відштовхування настільки, що енергетичний бар'єр зникає і частинки при наближенні злипаються.

Таким чином, для частинок існує близька і дальня потенціальні ями, глибину яких позначимо потенціальними складовими відповідно E_1, E_2 , а ширину h_1, h_2 . Представимо рух частинок діаметра D поблизу кожного потенціального мінімуму, як коливання гармонічного осцилятора відповідно з власними частотами f_1, f_2 , які знаходимо з розв'язку рівняння Шредінгера [77, 98] наближено наступним чином

$$f_1 \approx \sqrt{E_1 h_1^{-2} m^{-1}}, f_2 \approx \sqrt{E_2 h_2^{-2} m^{-1}}, \quad (2.10)$$

де величини E_1, E_2 визначаються на основі [90] так

$$\begin{aligned} E_1 &= nBD[0,04h_1^{-1} - 0,5A_0(1 - \ln(12A_0h_1A^{-1}))], \\ E_2 &= nBDh_2^{-2}(0,5 - \lambda^{-1}h_2^{-1}), \lambda = \sqrt{8\pi q^2 N \varepsilon^{-1} T^{-1}}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Тут A_0, A, B - константи, які залежать від властивостей системи [77]; n - число найближчих до розглядуваної частинок в структурі; N - концентрація електроліту (розплавленого металу); T - температура в енергетичних одиницях; q - заряд іонів електроліту; ε - діелектрична стала; m - маса частинки.

В статичних умовах критерій стійкості структури буде визначатися [77] такими нерівностями

$$E_1 > 0,5(\rho_0 - \rho)D^3 gh_1, E_2 > 0,5(\rho_0 - \rho)D^3 gh_2; \quad (2.12)$$

$$E_1 > \beta T, E_2 > \beta T, \quad (2.13)$$

Тут ρ_0, ρ - густини дендрита і розплавленого металу; g - прискорення вільного падіння; $\beta \approx 1$.

Розглянемо тепер вплив вібрації на структуру розплавленого металу наплавки в момент, коли в ньому з кластерів в середньому діаметра D утворилися дендрити великого розміру H , що в даному випадку відповідає нерівності

$$H^2 \gg \eta \omega^{-1} \rho^{-1}, \quad (2.14)$$

де η - середня в'язкість твердіючого розплаву. Такі великі агрегати не будуть коливатися в розплавленому металі. Далі запишемо коливання розплаву за амплітуди a з частотою ω . При цьому швидкість $\dot{x}(t)$ з часом t коливання розплаву вздовж поверхні наплавлення за координати x можна записати рівнянням

$$\dot{x}(t) = a \omega \sin \omega t. \quad (2.15)$$

Тоді сила P , яка діє на таку рухоми частинку діаметра D буде визначатися згідно [77] так

$$P \approx \eta D^2 h_i^{-1} a \omega. \quad (2.16)$$

Враховуючи вище сказане, запишемо рівняння вимушених коливань розглядуваної частинки дендриту відповідно в ближній потенціальній ямі (ближня коагуляція) під дією вібрації і зовнішніх сил в такому вигляді [77, 98]

$$\ddot{x} + 2\xi \dot{x} + f_1^2 x = P m^{-1} \sin \omega t. \quad (2.17)$$

Тут $\xi \approx n \eta D^2 m^{-1} h_1^{-1}$.

Лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами (2.17) розв'язуємо шляхом представлення шуканої функції $x(t)$ в тригонометричній формі. В результаті цього отримуємо такий закон коливання частинок в об'ємі дендриту

$$x(t) = V_0 \sin(\omega t + \alpha_0), \quad (2.18)$$

де формально приймаємо, що початкова фаза α_0 рівна нулю, а амплітуда V_0 вимушених коливань частинки рівна

$$V_0^2 = P^2 m^{-2} [(\omega^2 - f_1^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2]^{-1}. \quad (2.19)$$

Якщо частинка діаметром D вистрибне при вібрації з потенціальної ями, то це фізично означає, що дендрит, який складається із таких частинок, почне

розвалюватися. Це може бути можливим тільки тоді, коли амплітуда V_0 її коливань буде більша від ширини ближньої потенціальної ями h_1 , тобто вийде за межі дії поверхневих сил, або отримає таку енергію, що перевершує глибину потенціальної ями E_1 і буде рухатися як би при відсутності поверхневих сил. На основі співвідношень (2.11), (2.16) і (2.19) ці умови математично можна записати так

$$V_0 \geq h_1; \quad (2.20)$$

$$mV_0^2 \omega^2 \geq E_1. \quad (2.21)$$

Підставимо P і V_0 відповідно із (2.16), (11) в (2.20), (2.21), в результаті чого отримаємо

$$\omega^4 - \omega^2(2f_1^2 - 4\xi^2 + \eta^2 D^4 m^{-2} a^2 h_1^{-4}) + f_1^4 \leq 0, \quad (2.22)$$

$$(E_1^{-1} \eta^2 m^{-1} D^4 h_1^{-2} a^2 - 1)\omega^4 + (2f_1^2 - 4\xi^2)\omega^2 - f_1^4 \geq 0. \quad (2.23)$$

Розв'язуючи нерівності (2.22), (2.23) з врахуванням (2.10) і вважаючи, що $m \approx 0,5\rho D^3$ і ω завжди додатне, отримаємо такі співвідношення для оцінки параметрів вібрації для наперед вибраного значення діаметра D частинок, на які розпадеться дендрит

$$\begin{aligned} \omega^2 &\leq 0,5(2f_1^2 - 4\xi^2 + 4\rho^{-2} D^{-2} \eta^2 a^2 h_1^{-4}) + \sqrt{0,25(2f_1^2 - 4\xi^2 + 4\rho^{-2} D^{-2} \eta^2 a^2 h_1^{-4})^2 - f_1^4}; \\ a^2 &\geq \frac{f_1 \rho^2 D^2 h_1^4 [\omega^4 - (2f_1^2 - 4\xi^2)\omega^2 + f_1^4]}{4\eta^2 \omega^4}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Таким чином, якщо будуть задані характеристики розплавленого порошкоподібного твердого сплаву $f_1, \xi, \rho, \eta, h_1$, то для заданого розміру D структури наплавлення можна знайти відповідні параметри вібрації ω і a на основі співвідношень (2.24).

2.5. Розрахунок параметрів структури при індукційному наплавленні із застосуванням вібрації

Для перевірки коректності сформульованої вище моделі були проведені дослідження структури металу, наплавленого індукційним способом без і з накладеною механічною вібрацією (рис. 2.12) [97].

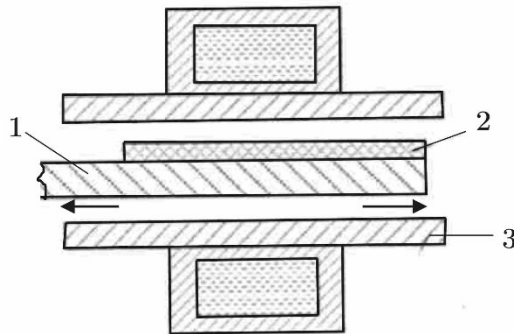


Рис. 2.12. Схема індукційного наплавлювання (1 – наплавлювана деталь; 2 – порошокподібна шихта; 3 – індуктор, де показаний напрямок горизонтальної вібрації).

З цією метою на основі літературних даних [77, 99] для високовуглецевого хромистого сплаву приведені наступні наближено середні значення характеристик в співвідношеннях (2.24) :

$$\rho = 7,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3}; \eta \approx 7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{мм} \cdot \text{с}}; \omega = 50 \text{ Гц}; f_1 \approx 2 \cdot 10^3 D^{-1} \text{ Гц}; \quad (2.25)$$

$$\xi \approx 2 \cdot 10^6 D^{-1} \text{ Гц}; h_1 \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}.$$

Для більш наочного представлення залежності величини зерна D від параметрів вібрації a - амплітуди і ω - частоти побудуємо окремо залежності $D \sim a$ і $D \sim \omega$. Для цього використаємо тільки друге співвідношення (2.24). Враховуючи, що $f_1^4 \gg \omega^4 - (2f_1^2 - 4\xi^2)\omega^2$, друге співвідношення можна представити наближено так

$$D^3 \geq \frac{8 \cdot 10^{15} \rho^2 h_1^4}{a^2 \eta^2 \omega^4}. \quad (2.26)$$

На основі співвідношення (2.24) запишемо рівняння залежностей $D \sim a$ ($\omega = 50 \text{ Гц}$) і $D \sim \omega$ ($a = 0,2 \text{ мм}$) в такому вигляді

$$D \approx 1,45 \cdot a^{-2/3} \text{ (мкм)}, \quad D \approx 785 \cdot \omega^{-4/3} \text{ (мкм)}. \quad (2.27)$$

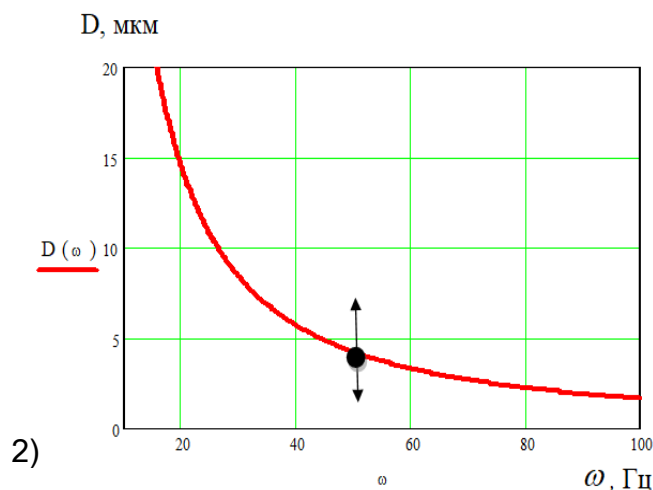
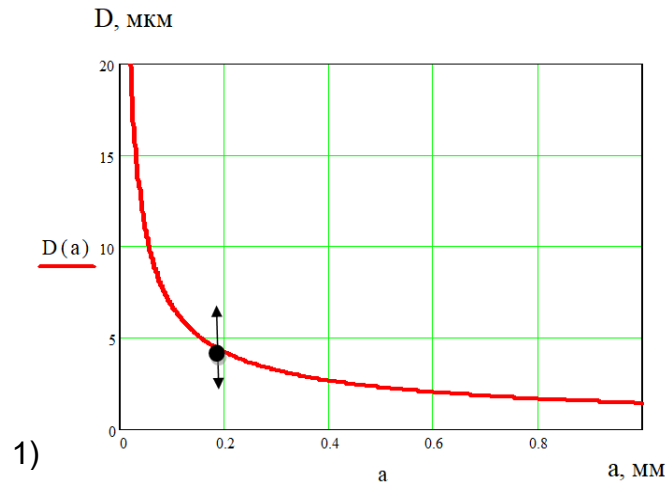


Рис. 2.13. Залежності $D \sim a$, $D \sim \omega$ розміру зерна D від параметрів вібрації : 1) амплітуди - a ; 2) частоти вібрації - ω .

На основі співвідношень (2.26) на рис. 2.13 побудовані графічні залежності $D \sim a$ і $D \sim \omega$. Тут кружечком на графіках відзначено координати точок, в яких співпадають розрахункові і приведені в роботі [97] значення розмірів зерна за заданими параметрами вібрації. Це свідчить про коректність і достатню точність запропонованої розрахункової моделі. Як видно з рис. 2.13 при зростанні параметрів вібрації a, ω розмір зерна D значно зменшується.

Таким чином, на основі співвідношень (2.24) можна підібрати наперед задані значення параметрів вібрації a , ω для яких можна отримати бажану структуру наплавлення.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз і синтез досліджень вібраційної обробки металевих розплавів. Розглянуто вплив вібраційної обробки на якість зварних з'єднань, а також на процес кристалізації металевих розплавів і їх структуру після остигання металу. При цьому зазначено, що дія ультразвуку призводить до наступних змін структури: зменшенню середньої величини зерна; усуненню стовпчастої структури і утворенню рівноважного зерна; підвищенню однорідності зливка, зменшенню міри розвитку ліквідаційних процесів, більш рівномірному розподілу неметалевих включень за усім обсягом зливка.

2. Для розуміння всього процесу кристалізації металу з метою побудови розрахункової моделі подрібнення його структури вібраційним полем проаналізовано таку його проміжну стадію, як коагуляцію і взаємодію його частинок, розглядаючи рідкий метал як електроліт.

3. На основі вище зазначеного, а також використовуючи деякі основні положення колоїдної хімії і атомної фізики, розроблена розрахунково-математична модель для оцінки параметрів структури наплавлень за вібрації. В основу моделі покладені математичні співвідношення, що описують розпад дендритів при наплавленні за вібрації. Отриманні математичні формули для визначення значень амплітуди і частоти вібрації, які забезпечують відповідні розміри зерен металу наплавки. На основі цих формул визначені параметри структури металу наплавленого індукційним методом в процесі вібрації на сталі Ст 3 з використанням шихти сплаву ПГ-С1. Отримані розрахунки добре узгоджуються з отриманими в наступних розділах роботи експериментальними даними, що підтверджує коректність і достатню точність сформульованої моделі.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика дослідження амплітуди коливань електромагнітного вібратора при індукційному наплавленні

В різних галузях народного господарства широке застосування знайшли технологічні процеси з використанням сил інерції (вібрації). Це стосується механічної обробки різних поверхонь деталей машин, електродуговому зварюванні та наплавленні та інші. Вібрація впливає на структуру наплавленого металу, зносостійкість, твердість, а також на деформацію деталей після наплавлення [100, 101].

Особливо актуальним є використання механічної вібрації при індукційному наплавленні тонких плоских деталей порошкоподібними твердими сплавами, що призводить до подрібнення структурних складових наплавленого металу, а також підвищенню зносостійкості [102-104].

Однак важливе значення має амплітуда коливань, яку необхідно підбирати при розробленні нових технологічних процесів в залежності від типу порошкоподібних твердих сплавів та геометричних розмірів деталей та наплавленого валика, яка впливає на властивості наплавленого металу і конструкції виробу в цілому.

На практиці існують різні методи вимірювання параметрів вібрації, яка використовується в різних галузях техніки в тому числі і наплавленні, а саме: контактні, що мають механічний зв'язок датчика з досліджуваним об'єктом, і безконтактні, тобто не пов'язані з об'єктом механічним зв'язком [105-109].

До недоліків контактних методів слід віднести:

- реєстрація сигналу за допомогою п'єзоелектричних датчиків унеможливорює вимірювання вібрацій високої частоти і малої амплітуди [105];
- метод відкритого резонатора – вимагає постійної потужності, яка підводиться до резонатора та високої стабільності частоти збудження [105];

- метод з використанням сферичних дзеркал має малу інерційність в порівнянні з описаними вище методами [105].

До недоліків безконтактних методів, які засновані на зондуванні об'єкта звуковими та електромагнітними хвилями, відносяться:

- метод ультразвукової фазометрії [106] та метод зондування об'єкта видимим світлом [107] (оптичні методи), є складні та громіздкі, мають високу вартість обладнання, значні затрати електроенергії, високі вимоги до якості поверхні досліджуваного об'єкту та до стану середовища (вологість, наявність запиленості і т.п.).

- методи, які засновані на використанні струмів високої частоти (СВЧ) випромінювання [108, 109], мають відносно велику напругу живлення, яка призводить до збільшення габаритів апаратури і значних енергозатрат. Для їх використання необхідно проводити модернізацію і вдосконалення, як конструктивно так і методично при визначенні амплітуди коливань для розроблення нових технологічних процесів.

Метою роботи було розроблення методики та підвищення точності вимірювання амплітуди коливань електромагнітного вібратора при розробленні нових технологічних процесів індукційного наплавлення тонких плоских деталей, що дасть змогу регулювати амплітуду коливань, виходячи з потреб технології, яка описана в роботі [110, 111].

Розроблена методика заснована на зміні опору тензорезисторів, які закріплюються на рівноопірній балці з двох сторін. На датчики подається постійна напруга з тензопідсилювача ТОПАЗ-4-01, а від них подається аналоговий сигнал на звукову карту ПК або на самописець. При вібрації (зміні амплітуди коливань електромагнітного вібратора) змінюється сигнал, який поступає на реєструючі прилади (самописець або персональний компютер (ПК)). Вид записаного сигналу представлено на рис. 3.1.

При проведенні експериментальних досліджень для визначення амплітуди коливань електромагнітного вібратора розроблено і виготовлено стенд (рис. 3.2), який складається з рівноопірної балки з тензорезисторами 1,

лабораторного регулюючого автотрансформатора ЛАТР-ІМ 2, вольтметра 3, електромагнітного вібратора 4, самопишучого одноканального приладу НЗ38-1П 5, тензопідсилювача ТОПАЗ-4-01 6, який укомплектований блоком живлення АГАТ-7 7 та персонального комп'ютера (ПК) 8.

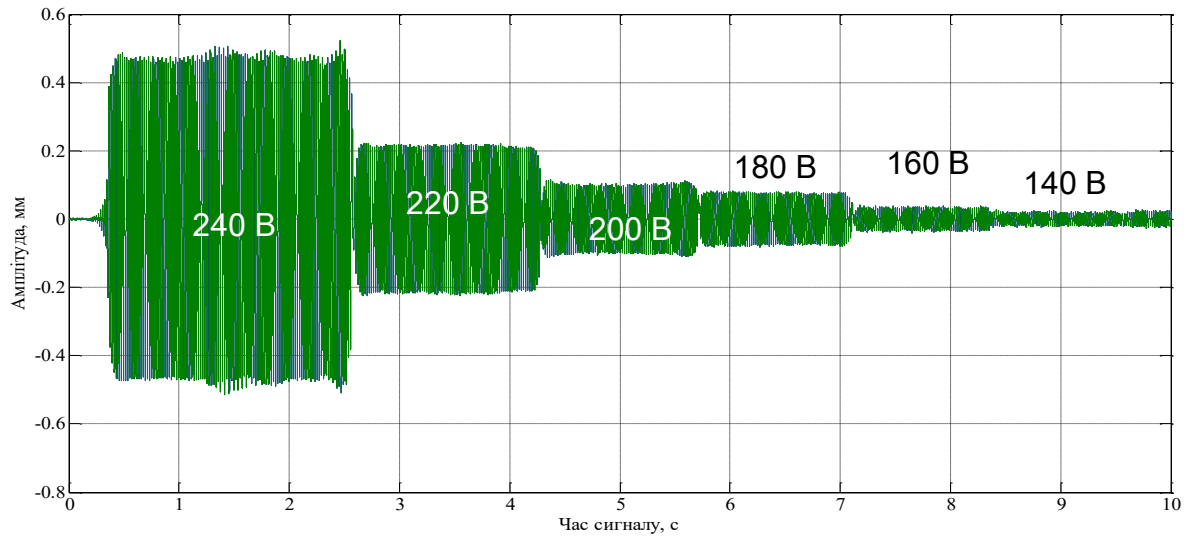


Рис. 3.1 — Загальний вигляд записаного сигналу при різних значеннях напруги живлення вібратора

Сигнал записуємо, як звук, за допомогою програми запису звукових сигналів. Після опрацювання сигналу в програмі MATLAB отримуємо графік на якому амплітуда коливань вібратора визначається в мілівольтах. Для того, щоб визначити необхідне значення амплітуди коливань в мм необхідно провести тарировку датчиків і за допомогою осцилографа заміряти вихідну напругу з тензопідсилювача (яка подається на самописець і звукову карту ПК) при прикладанні до рівноопірної балки з тензорезисторами певного зусилля за допомогою мікрометра. Отримані результати опрацьовували за допомогою програми MATLAB.

На рис. 3.3, 3.4 та 3.5 для прикладу показано виноску з рис. 1 для певного значення напруги живлення електромагнітного вібратора, відповідно 240, 200 і 140 В. З вище викладеного видно, що із збільшенням напруги живлення

електромагнітного вібратора амплітуда коливань зростає. Графік залежності амплітуди коливань від напруги живлення показано на рис. 3.6.

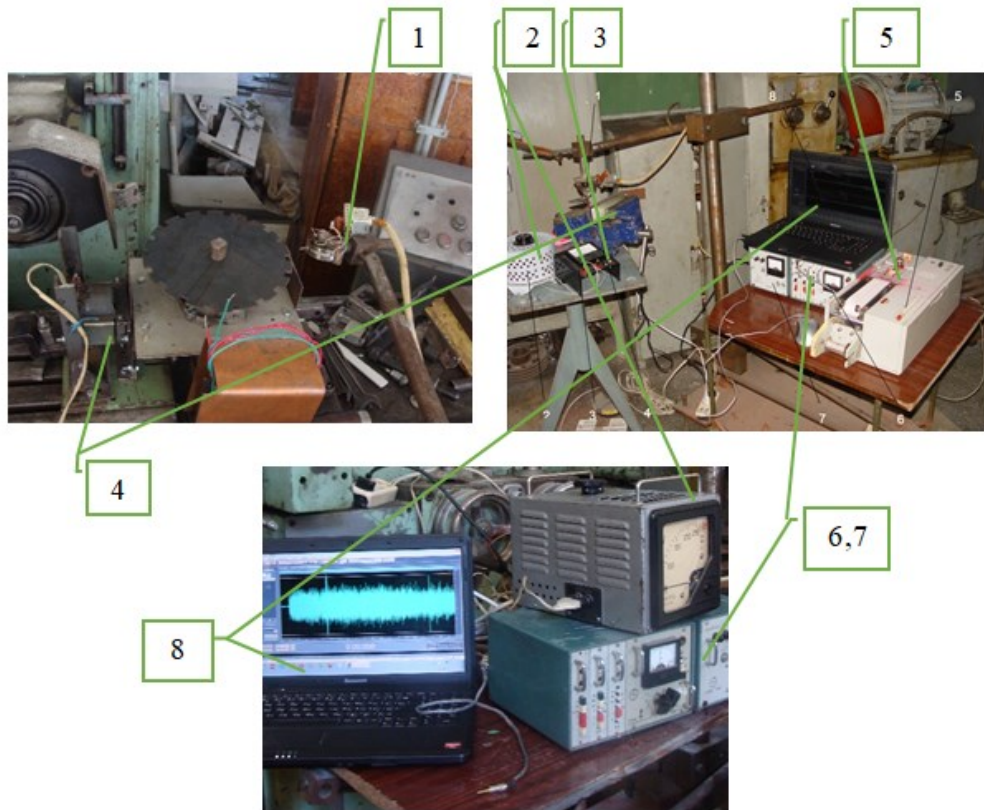


Рис. 3.2 — Загальний вигляд стенду для визначення амплітуди коливань:

1 - рівноопірна балка з тензорезисторами; 2 – ЛАТР-1М; 3 – вольтметр; 4 – електромагнітний вібратор; 5 – самописець; 6 – тензопідсилювач ТОПАЗ-4-01; 7 – блок живлення АГАТ-7; 8 – комп'ютер (ПК)

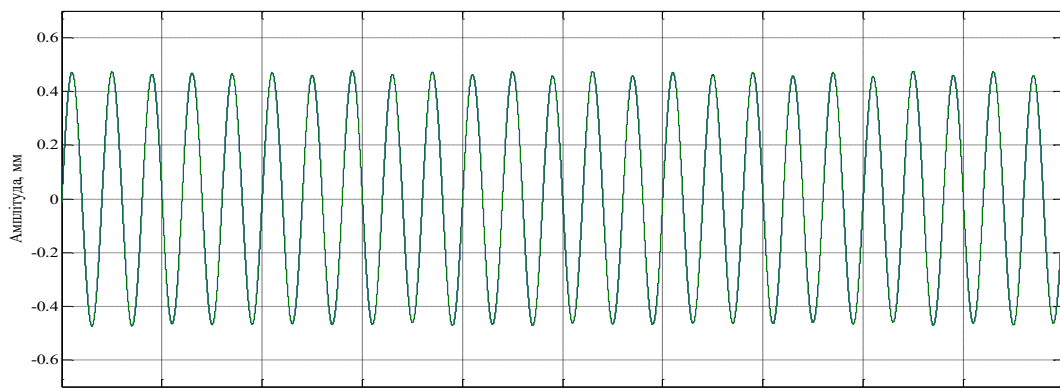


Рис. 3.3 — Виноска з рис.3.1 величини амплітуди коливань при напрузі живлення вібратора 240 В.

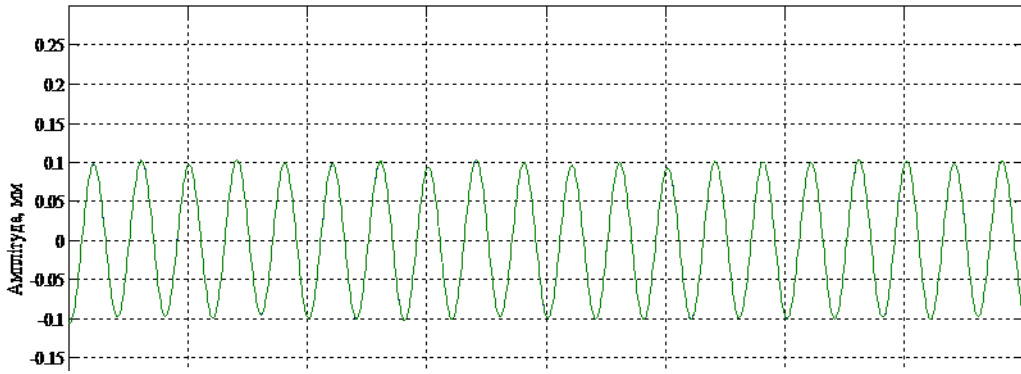


Рис. 3.4 — Виноска з рис.3.1 величини амплітуди коливань при напрузі живлення вібратора 200 В.

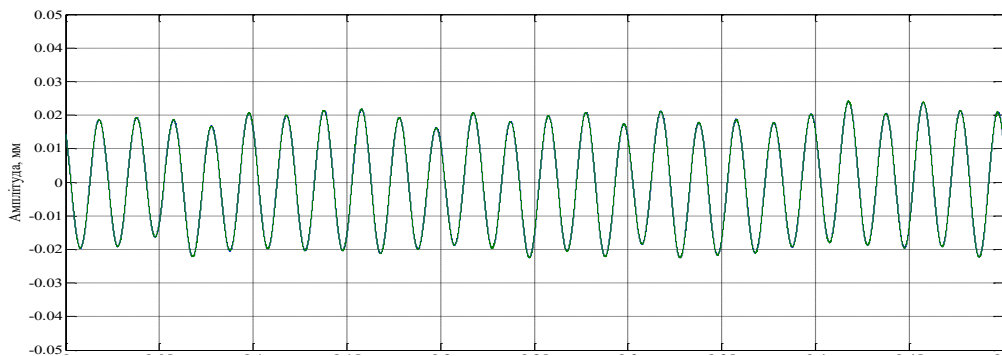


Рис. 3.5 — Виноска з рис.3.1 величини амплітуди коливань при напрузі живлення вібратора 140 В.

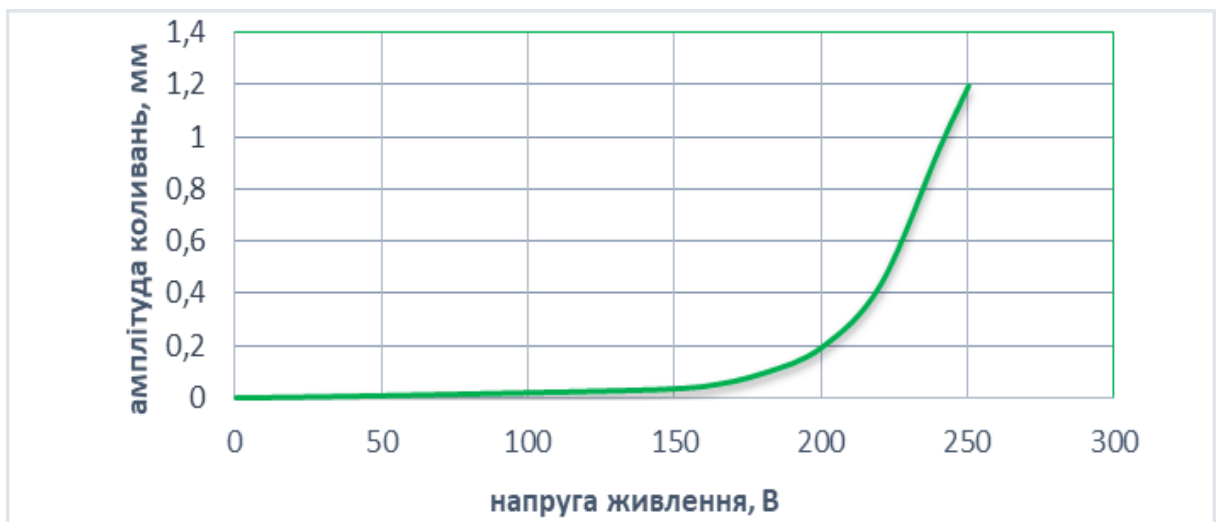


Рис. 3.6 — Графік зміни амплітуди коливань електромагнітного вібратора від його напруги живлення

Отриманий графік залежності амплітуди коливань від напруги будували виходячи з рис. 3.1, тобто визначали амплітуду коливань при певних значеннях напруги живлення. Задаючись амплітудою коливань можна графічно з рис. 3.6 підбирати значення напруги живлення електромагнітного вібратора.

Таким чином, з отриманих даних можна встановлювати амплітуду коливань виходячи з потреб технології, при цьому не затрачаючи часу на переналагодження технологічного процесу наплавлення.

3.2 Методики дослідження експлуатаційних та якісних характеристик наплавленого металу

3.2.1. Дослідження зносостійкості наплавленого металу

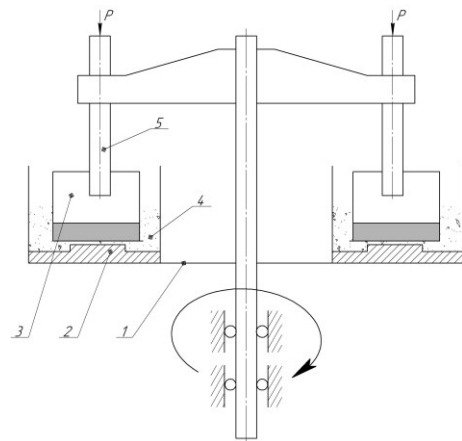
До основних експлуатаційних характеристик наплавленого металу відносять його стійкість проти спрацювання. Так, як в роботі розглядається питання підвищення ефективності індукційного наплавлення деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин, то наплавлений метал повинен забезпечувати необхідну зносостійкість при абразивному зношуванні.

Для дослідження зносостійкості розроблено великий ряд установок і методик, які описані в роботах [112-114]. При дослідженні наплавленого металу на зносостійкість використано установку НК-М, яка описана в роботі [115-116] і показана на рис. 3.7.

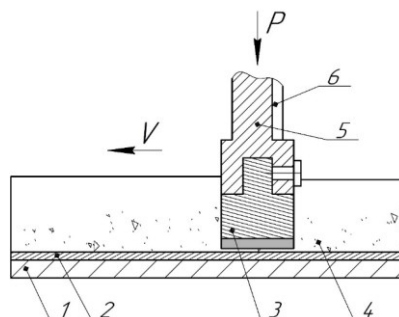
Дана установка призначена для дослідження зносостійкості наплавленого металу по абразивному прошарку. Створена установка в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на базі машини НК – конструкції Інституту машинознавства. Замість однієї є три доріжки тертя (у вигляді кілець з міді). В ній одночасно досліджується в рівних умовах з незалежним навантаженням шість зразків, один з яких являється еталоном. Зразки розміру 16х16х6 мм, тертя по площині 16х6 мм. Умови досліджень:

абразив – кварцевий пісок; розміри частинок – 0,2...0,4 мм; шлях тертя – 415 м; тиск - 0,466 МПа; еталон – відпалена сталь 45.

Оскільки заготовка (основний метал) являє собою тонку плоску деталь товщиною $\delta=3$ мм і з наплавленим шаром товщиною порядку 0,8...1,5 мм, виникла необхідність у виготовленні спеціальних зразків [117] для проведення досліджень стійкості проти спрацювання з використанням машини НК-М. Спочатку вирізали на фрезерному верстаті заготовку із сталі Ст3 (прямокутник з розмірами 16x11,8x6 мм) з допуском на наступне шліфування, як показано на рис. 3.8, а. В нижній його торцевій частині фрезерували прямокутний паз. Потім в цей паз запресовували з сторони основного металу Т-подібну заготовку (рис. 3.8, б) разом з наплавленим шаром на основний метал, як показано на рис. 3.8, в. Потім шліфували зразок до розмірів 16x16x6 мм.



а



б

Рисунок 3.7 – Загальний вид машини типу НК-М (а) та схема випробувань на абразивний знос (б) [116]: 1 - дно чаші; 2 - мідне кільце; 3 - зразок з наплавленим покриттям; 4 - абразивне середовище; 5 - шток; 6 - паз штока

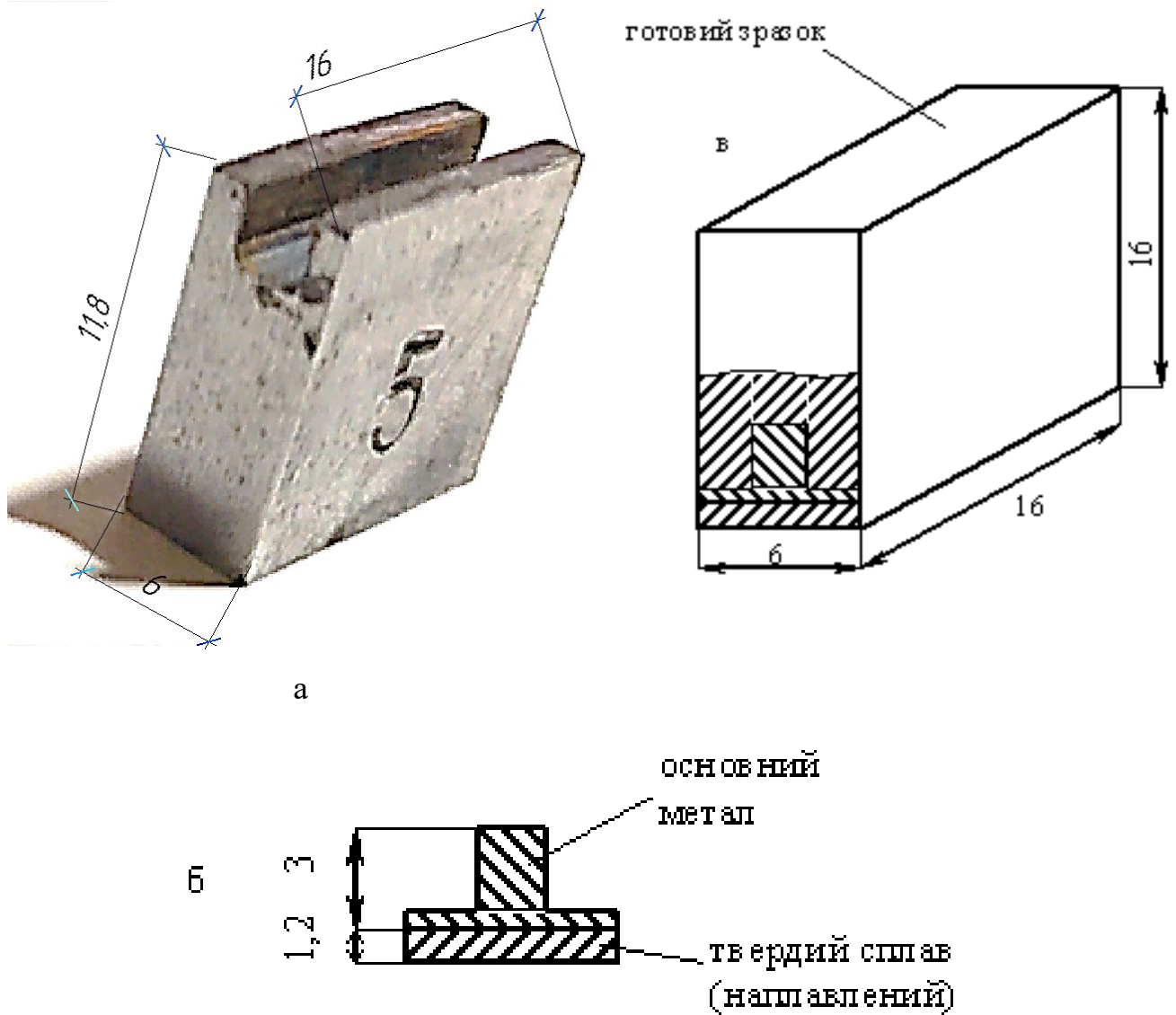


Рис. 3.8. Зразок для дослідження стійкості проти спрацювання: а – прямокутна заготовка; б – Т-подібна вставка з основним і наплавленим металом; в – готовий зразок для дослідження на машині НК-М

Відносну зносостійкість досліджуваних зразків визначали як відношення втрат маси (зменшення ваги) еталона і досліджуваного зразка.

$$\varepsilon = \frac{\Delta G_e}{\Delta G_z} \quad (3.1)$$

де ΔG_e – вагове зношення еталону (відпаленої сталі 45),

ΔG_z – вагове зношення досліджуваних наплавлених зразків.

3.2.2. Методика дослідження товщини шару наплавленого металу

На якість технологічного процесу наплавлення впливає ряд факторів. Деякі з них створюють систематичні похибки, які носять змінний або постійний характер. Прикладом систематичної постійної похибки є засипання зносостійкого порошкоподібного твердого сплаву на поверхню, яка підлягає наплавленню з метою підвищення зносостійкості і довговічності робочих поверхонь деталей та інші фактори.

Випадкові похибки виникають в результаті дії великої кількості не пов'язаних між собою факторів, які можуть мати різні значення. Визначити наперед момент їх появи і точну величину яких для кожної конкретної деталі в партії є неможливим. Особливо це стосується зварювального виробництва, при розробці нових технологічних процесів наплавлення і напилення робочих поверхонь деталей машин.

У зв'язку з цим розміри товщин наплавленого металу одержуються різні і коливаються у відповідних межах допуску. Частина наплавлених деталей буде мати розміри близькі до верхньої межі допуску, а частина - до нижньої, які вказуються в технологічних процесах наплавлення.

Необхідно відмітити, що при індукційному наплавленні спочатку нагрівається основний метал, а від його поверхні розплавляється порошкоподібний твердий сплав за рахунок теплопередачі. Тобто, поверхня, яка підлягає наплавленню нагрівається за допомогою індуктора, який збуджує на поверхні деталі невидимі вихрові струми Фуко. При цьому методі температура плавлення основного металу повинна бути вища за температуру плавлення порошкоподібного твердого сплаву.

Для виявлення закономірностей похибок, які виникають при наплавленні, використовують методи математичної статистики і теорії ймовірності. Вимірявши товщини партії наплавлених деталей, розбивають їх на групи з однаковими відхиленнями, або відхиленнями в межах певного інтервалу.

Випадкові похибки в розмірах наплавлених деталей партії підлягають закону нормального розподілу [118].

Необхідною умовою при наплавленні є те, що розсіювання розмірів не повинно перевищувати допуску на наплавлення. Важливим критерієм, який характеризує якість наплавлення, являється товщина наплавлюваного металу по всій робочій поверхні, яка згідно вимоги забезпечення самогострювання в процесі експлуатації повинна знаходитися в межах $1_{-0,2}^{+0,5}$ мм.

Для оцінки технологічного процесу індукційного наплавлення тонких плоских деталей для двох способів – одночасного без використання вібрації і з використанням вібрації, – була розроблена методика дослідження товщини наплавлюваного металу, яка описана в роботах [119-123] і наведена нижче.

На деталі за допомогою спеціального інструменту з кулькою виконували напівсферичні виямки як показано на рисунку 3.9 а, з сторони, протилежної поверхні наплавлення (рис. 3.9 б). Потім за допомогою мікрометра, а також другої кульки аналогічного діаметру, що служить опорою для губок мікрометра (одна губка якого напівсферична, а інша з плоскою поверхнею) заміряли товщину δ_1 основного металу до наплавлення (рис. 3.9 б)).

Кульки необхідні для підвищення точності вимірювання товщини наплавлюваного металу в кожній з точок: оскільки при індукційному наплавленні на поверхні, протилежній наплавлюваній, утворюється окалина, яка при вимірюванні може вплинути на точність результатів. Товщина δ наплавлюваного шару визначалась як різниця товщин наплавленого зразка δ_2 і основного металу δ_1 .

Обробку результатів вимірювання товщини наплавлюваного шару проводили за допомогою методів математичної статистики [124].

Важливим критерієм при обробці результатів які наведені в розділі 4, є те що відхилення розмірів наплавленого металу розглядали, як різницю між оптимальною величиною наплавленого металу ($\Delta=1$) та величиною наплавленого металу δ_1 .

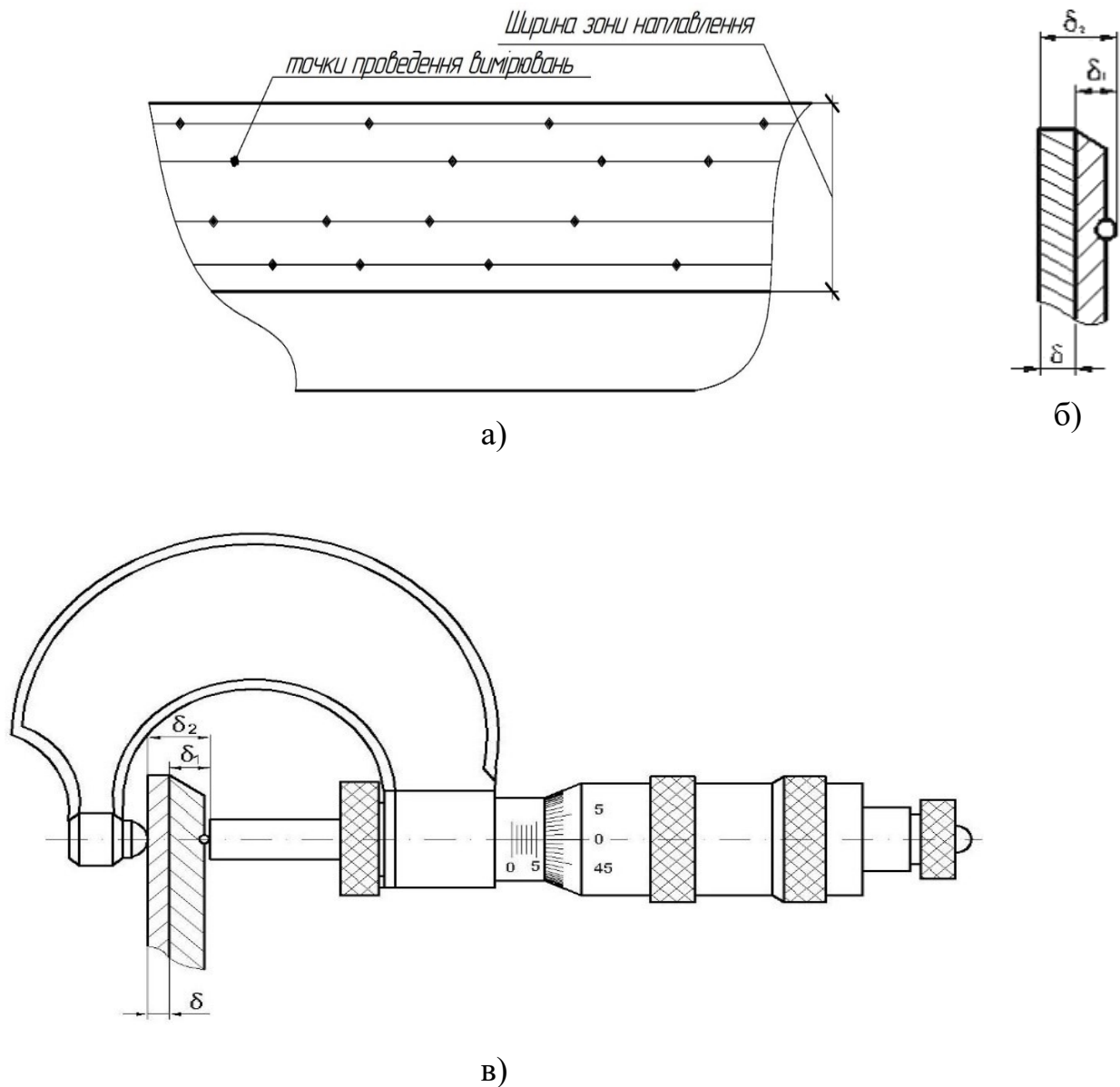
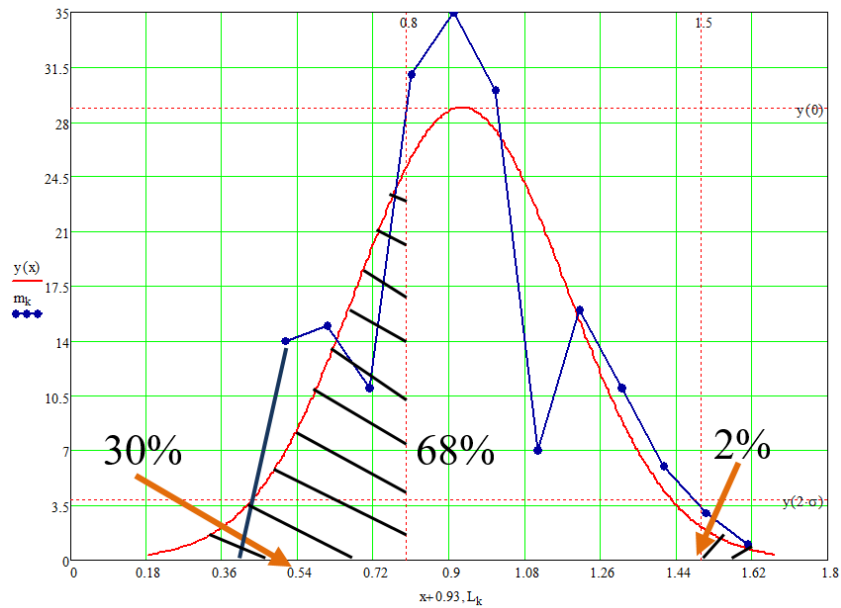


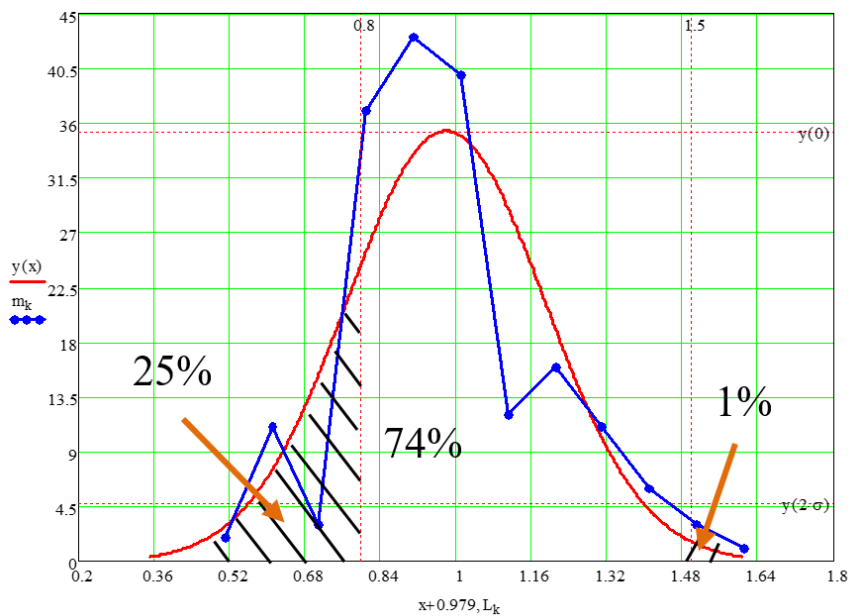
Рис. 3.9. а – наплавлений зразок, підготовлений для вимірювання товщини наплавленого металу; б – переріз в зоні наплавлення; в – схема вимірювання товщини наплавленого шару металу

Криві розсіювання фактичних розмірів і криві нормального розподілу товщин наплавлюваного шару при одночасному напавленні без і з прикладанням вібрації приведені на рис 3.10.

Незаштриховані області, які знаходяться під кривою нормального розподілу, теоретично представляють собою відсоткову долю деталей, в яких товщина наплавлюваного металу знаходиться в полі допуску.



а



б

Рис. 3.10. Криві нормального розподілу товщини наплавленого металу: а – одночасне наплавлення без вібрації; б – одночасне наплавлення з використанням вібрації [119]

3.2.3. Методика проведення експериментальних досліджень відхилення товщини шару наплавленого металу

Для встановлення функціональної залежності, яка характеризує та описує відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню тонких

деталей реалізували планований двофакторний та трифакторний експеримент типу, відповідно, ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 на трьох рівнях варіювання факторами.

При цьому незалежними змінними факторами приймали: напругу живлення на контурі U_k , яку кодували індексом x_1 , тобто $U_k \rightarrow x_1$; час наплавлення t_n , який кодували індексом x_2 , тобто $t_n \rightarrow x_2$; амплітуду коливання зразка a_k , яку кодували індексом x_3 , тобто $a_k \rightarrow x_3$.

Структурну модель планованого дво- та трифакторного експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 наведено на рис. 3.11.

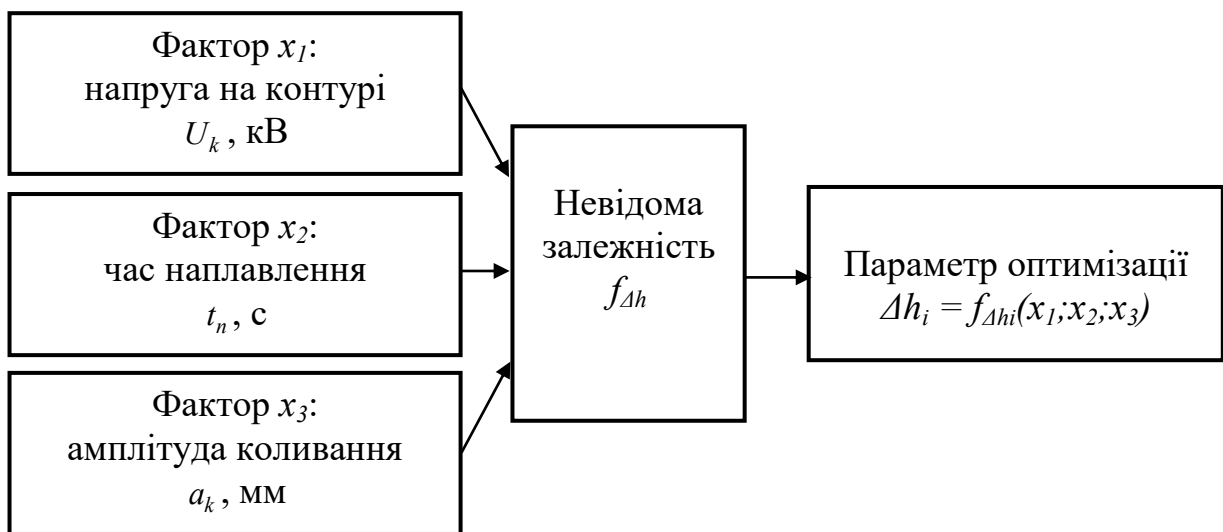


Рисунок 3.11 – Схема моделі планованого факторного експерименту

Дослідження відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню тонкої деталі провели для трьох випадків способу (процесу) наплавлення:

- без застосування вібрації зразка (А);
- з використанням вертикальної вібрації зразка (Б);
- з застосуванням горизонтальної вібрації зразка (В).

Таким чином, для дослідження відхилення товщини шару наплавленого металу без застосування вібрації (або Δh_1) було вибрано апроксимуючу математичну модель у вигляді функціональної залежності $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(x_1; x_2)$, а для дослідження відхилення товщини шару наплавленого металу з застосуванням

вертикальної вібрації (або Δh_2) та з застосуванням горизонтальної вібрації (або Δh_3) було вибрано апроксимуючу математичну модель у вигляді функціональної залежності, відповідно, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(x_1; x_2; x_3)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(x_1; x_2; x_3)$.

Порядок побудови та реалізації експериментальних досліджень з визначення відхилення товщини шару наплавленого металу або функціональних залежностей $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(x_1; x_2)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(x_1; x_2; x_3)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(x_1; x_2; x_3)$ був таким:

- кодування змінних вхідних факторів, або $U_k \rightarrow x_1$, $t_n \rightarrow x_2$, $a_k \rightarrow x_3$;
- розроблення таблиці вхідних факторів, визначення верхнього і нижнього рівнів варіювання кожного фактора та інтервалу його варіювання;
- визначення загального числа експериментів однієї повторності;
- складання план-матриці порядку проведення експериментів;
- проведення рандомізації план-матриці;
- реалізацію експериментів згідно з рандомізованою план-матрицею;
- оброблення експериментального масиву даних з метою отримання емпіричного рівняння регресії з визначенням виду функціональної залежності та її коефіцієнтів;
- перевірку відтворюваності одержаних експериментальних даних;
- оцінювання значущості коефіцієнтів регресії;
- перевірку адекватності отриманої математичної моделі реальному експериментальному процесу;
- проведення графо-аналітичного аналізу результатів експериментальних досліджень і висновків.

При складанні план-матриці експериментів вводили кодовані позначення верхнього (+1), нижнього (-1) та нульового (0) рівнів варіювання факторами [125].

Результати кодування змінних вхідних факторів, верхній і нижній рівень варіювання кожного фактора та інтервал його варіювання наведено у табл. 3.1.

Після кодування змінних вхідних факторів, тобто $U_k \rightarrow x_1$, $t_n \rightarrow x_2$, $a_k \rightarrow x_3$ складали план-матрицю порядку проведення планового дво- та

трифакторного експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 .

Таблиця 3.1 – Результати кодування факторів та рівні їх варіювання

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натуральні/кодовані		
	Натуральні	Кодовані				
Напруга на контурі U_k , кВ	X_1	x_1	1	4,4/-1	5,4/0	6,4/+1
Час наплавлення t_n , с	X_2	x_2	20	20/-1	40/0	60/+1
Амплітуда коливання a_k , мм	X_3	x_3	0,2	0,1/-1	0,3/0	0,5/+1

Загальну кількість експериментів N_e однієї повторності визначали за формулою [125]

$$N_e = P^k, \quad (3.2)$$

де P – кількість рівнів варіювання змінного вхідного фактора;

k – кількість діючих змінних вхідних факторів у експерименті.

При цьому експерименти провели в трикратній повторності, а план-матрицю проведення планованого трифакторного експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 наведено у табл. 1.Г3.2 додатка Г3.2.

У зв'язку з тим, що під час проведення експериментів незалежні змінні вхідні фактори, тобто $U_k \rightarrow x_1$, $t_n \rightarrow x_2$, $a_k \rightarrow x_3$ неоднорідні, тобто всі вони мають різні фізичні одиниці вимірювання та різні порядки арифметичних числових значень одиниць вимірювання, то їх приводили до єдиної системи обрахунків шляхом переходу від введених позначень кодованих величин до дійсних (натуральних) значень.

Зв'язок між кодованими x_i та натуральними X_i значеннями змінних вхідних факторів планованого дво- та трифакторного експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 встановлювали згідно з залежністю [126]

$$X_i = (x_i - x_0) / \Delta x_i, \quad (3.3)$$

де x_{i0} – значення i -го змінного вхідного фактора на нульовому рівні;

x_i – натуральне позначення i -го змінного вхідного фактора.

Нульовий рівень x_0 , або середнє значення та інтервали варіювання Δx_i кожного діючого змінного фактора визначали за формулами [126]:

$$x_0 = 0,5(x_{max} + x_{min}); \quad (3.4)$$

$$\Delta x_i = 0,5(x_{max} - x_{min}), \quad (3.5)$$

де x_0 , x_{max} , x_{min} – значення нульового, верхнього та нижнього рівня змінного вхідного фактора;

Δx_i – числове значення інтервалу варіювання i -го змінного вхідного фактора.

Для усунення впливу неконтрольованих (НКФ) і нерегульованих (НРФ) факторів (рис. 3.13) на значення параметра оптимізації під час реалізації експериментів згідно зі складеною план-матрицею планованого дво- та трифакторного експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 провели її рандомізацію шляхом застосування методу випадкового балансу, який реалізовано способом використання таблиці випадкових чисел [127].

Отримані експериментальні значення відхилення товщини шару наплавленого металу, або функціональних залежностей $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(x_1; x_2)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(x_1; x_2; x_3)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(x_1; x_2; x_3)$ для граничних значень відповідних точок композиційного плану дво- та трифакторного експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 заносили у відповідні графи симетричної план-матриці планованого експерименту.

Оброблення отриманого експериментального масиву даних проводили за загальновідомими методиками та методами статистичної обробки для отримання емпіричної математичної моделі $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k; t_n)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k; t_n)$ з використанням методик кореляційного і регресійного аналізу апроксимуючої функції, яка характеризує вплив факторів і їх взаємодію на параметр оптимізації, тобто зміну відхилення товщини шару наплавленого металу на поверхню тонкої деталі Δh_1 , Δh_2 та Δh_3 .

Порядок обробки отриманого експериментального масиву даних відхилення товщини шару наплавленого металу на поверхню тонкої деталі Δh_1 , Δh_2 та Δh_3 був таким.

1. Проводимо перевірку відтворюваності експериментального масиву даних відхилення товщини шару наплавленого металу на поверхню тонкої деталі Δh_1 , Δh_2 та Δh_3 за критерієм Кохрена згідно зі [125]

$$G = \frac{S_{u,max}^2}{\sum_{i=1}^n S_u^2} \leq G_m(0,05; n; f_u), \quad (3.6)$$

де $G_m = (0,05; N; f_u)$ – табличне значення критерію Кохрена при 5%-му рівні значущості за кількості експериментів N , числа степенів свободи $f_u = m - 1$ і числа повторності m ;

S_u^2 – дисперсія на u -му рівні фактора;

$S_{u,max}^2$ – максимальне значення дисперсії.

2. Якщо в результаті перевірки доведено, що процес відтворюваний, тоді визначаємо числові значення коефіцієнтів регресії апроксимуючої моделі $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k; t_n)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k; t_n)$.

Коефіцієнти регресії апроксимуючої функції за умови ортогональності та симетрії проведеного планованого експерименту типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 визначали за формулами згідно з [127]

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{N}; \quad (3.7)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N}; \quad b_{ijk} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} x_{ku} \bar{y}_u}{N}, \quad (3.8)$$

де b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ijk} – вільний член рівняння регресії, коефіцієнти i -го вхідного

змінного фактора та сумісної взаємодії змінних факторів;

x_{iu} – значення кодової змінної у відповідному стовпці плану-матриці проведення експериментів;

\bar{y}_u – середнє значення результату u -го дослідю;

u, i, j, k – порядковий номер дослідю; номер фактора; номер фактора, відмінного від i -го;

N – кількість проведених експериментів однієї повторності.

3. Проводимо перевірку адекватності рівняння регресії, записаного у вигляді функціонала $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k; t_n)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k; t_n)$ за відповідним критерієм відповідності Фішера [127]

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_m(0,05; f_{ad}; f_y), \quad (3.9)$$

де $S_{ad}^2 = \frac{1}{f_{ad}} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y}_u)^2$ – дисперсія адекватності;

$f_{ad} = n - k - 1$ – число степенів свободи дисперсії адекватності при кількості факторів, що дорівнює k ;

$f_y = n(m - 1)$ – число степенів свободи дисперсії відтворюваності.

Визначали дисперсію адекватності S_{ad}^2 та розрахунковий критерій відповідності Фішера F_p за формулою

$$S_{ag}^2 = \frac{n}{N - g'} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2; \quad (3.10)$$

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2}, \quad (3.11)$$

де $N - g'$ – число степенів вільності дисперсії адекватності та значущих коефіцієнтів рівняння регресії;

\tilde{y}_u – значення відгуку (параметра оптимізації) в u -й точці плану, обчислене за рівнянням регресії;

S_y^2 – дисперсія відтворення досліду.

Визначали табличне значення критерію Фішера F_T за заданим рівнем значущості α і двома степенями відповідності $f_{ag} = N - g$ та $f_y = N(n - 1)$ [127].

Умову адекватності вибраної емпіричної математичної моделі $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k; t_n)$ та $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k; t_n)$ перевіряли за критерієм Фішера згідно з нерівністю (3.10) за умови, коли $F_p < F_m$.

Отримане розрахункове значення F_p порівнювали з табличним значення критерію Фішера F_m . Якщо умова $F_p < F_m(0,05, f_{ag}, f_y)$ виконувалася, тобто розрахункове значення F_p - критерію Фішера менше табличного F_m при 5%-му рівні значущості, числа степені вільності дисперсії адекватності $f_{ag} = N - g$ та числа степені вільності дисперсії відтворюваності $f_y = N(n - 1)$. Тоді одержане емпіричне рівняння регресії вибраної математичної моделі $Q_{ke} = f_Q(n_k; D_k; T_1)$ адекватно описує реальний процес зміни параметра оптимізації Q_{ke} або зміни експериментальних даних.

4. Проводимо оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії b_i , b_{ij} , b_{ijk} за критерієм Стьюдента.

Згідно з [127] коефіцієнт регресії b_i , b_{ij} , b_{ijk} є значущим, якщо виконується наступна умова

$$|b_i| \geq t_m(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (3.12)$$

де $t_m(0,05; f_y)$ – табличне значення критерію Стьюдента за 5%-го рівня значущості.

Визначали умову значимості коефіцієнтів b_i , b_{ij} , b_{ijk} рівняння регресії за формулою

$$b_{i(jk)} > \frac{t_T S_y}{\sqrt{Nn}}, \quad (3.13)$$

де t_T – табличне значення коефіцієнта Стьюдента залежно від ступеня відповідності f та рівня значущості α [127], при цьому $f = (n - 1)N$.

Якщо умова значимості (3.13) не виконується, то такий коефіцієнт b_i , b_{ij} , b_{ijk} рівняння регресії приймали рівним нулю, а відповідний коефіцієнту рівняння регресії член x_i виключали.

Розрахунки отриманих числових даних експериментального масиву проводили за допомогою пакета прикладних статистичних програм обробки та аналізу результатів експериментальних досліджень для комп'ютера.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Розроблена методика для дослідження амплітуди коливань електромагнітного вібратора. Отримані значення амплітуди коливань від напруги живлення, які дозволяють підбирати необхідні її значення виходячи з потреб технології.
2. Розроблена методика досліджень товщини шару наплавленого металу, яка дозволяє оцінити якісний показник технологічного процесу індукційного наплавлення тонких плоских деталей в залежності від режимів і способів наплавлення.
3. Описана методика дослідження відносної зносостійкості наплавлених тонких плоских деталей з використанням її на стандартних установках, що дозволяє зменшити трудові і матеріальні затрати на проведення експериментів.
4. Представлено методику проведення планованих двофакторного та трифакторного експеримент типу ПФЕ 3^2 та ПФЕ 3^3 , відповідно, на трьох рівнях варіювання з метою досліджень відхилення товщини шару наплавленого металу .

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

Дослідження процесу наплавлення тонких деталей індукційним способом, описані в роботах [2, 3, 33, 36, 37, 39, 41, 65, 67, 122, 128], присвячені вибору і вивченню стійких проти спрацювання різного типу порошкоподібних твердих сплавів, розробці технологій і обладнання. Однак існуючі технології мають ряд недоліків, що вимагає їх вдосконалення з метою підвищення рівномірності товщини шару наплавленого металу та відносної зносостійкості при використанні існуючих порошкоподібних твердих сплавів.

Відсутність технології та обладнання для одночасного наплавлення робочих поверхонь деталей із застосуванням вібрації, вимагає їх розроблення. Результати виконаних нами теоретичних досліджень дозволили знайти оптимальні параметри механічної вібрації деталей в процесі наплавлення, а саме амплітуду і частоту коливань, які дозволяють підвищити експлуатаційні властивості деталей [36, 37, 41, 67, 81, 97, 103, 111, 119, 121-123, 128-139, 141-144, 147, 154, 155] та покращити рівномірність товщини шару наплавленого металу [67, 119, 120, 128, 142, 143]. Для оптимізації процесу наплавлення в цілому необхідно було дослідити вплив різних факторів на якість наплавлюваних деталей з використанням запропонованої технології, а саме індукційного наплавлення з використанням механічної вібрації [78-81, 97, 102, 103, 111, 119, 123, 134, 136, 141-144, 154].

4.1. Дослідження і вибір параметрів вібрації при індукційному наплавленні

Для проведення досліджень індукційного наплавлення тонких деталей, був виготовлений пристрій (рис. 4.1), який складається електромагнітного вібратора на якому розмішений механізм встановлення та фіксації деталей. Даний механізм дозволяє здійснювати коливання з частотою 50 Гц та амплітудою від 0 до 1,2 мм. Деталь разом з попередньо засипаною на неї шихтою

твердого сплаву типу ПГ-С1 встановлювалась в індуктор. Після чого проводили наплавлення. Вібрацію деталі здійснювали в горизонтальному та вертикальному напрямку відносно індуктора в момент плавлення порошкоподібної шихти до моменту повного її розплавлення.

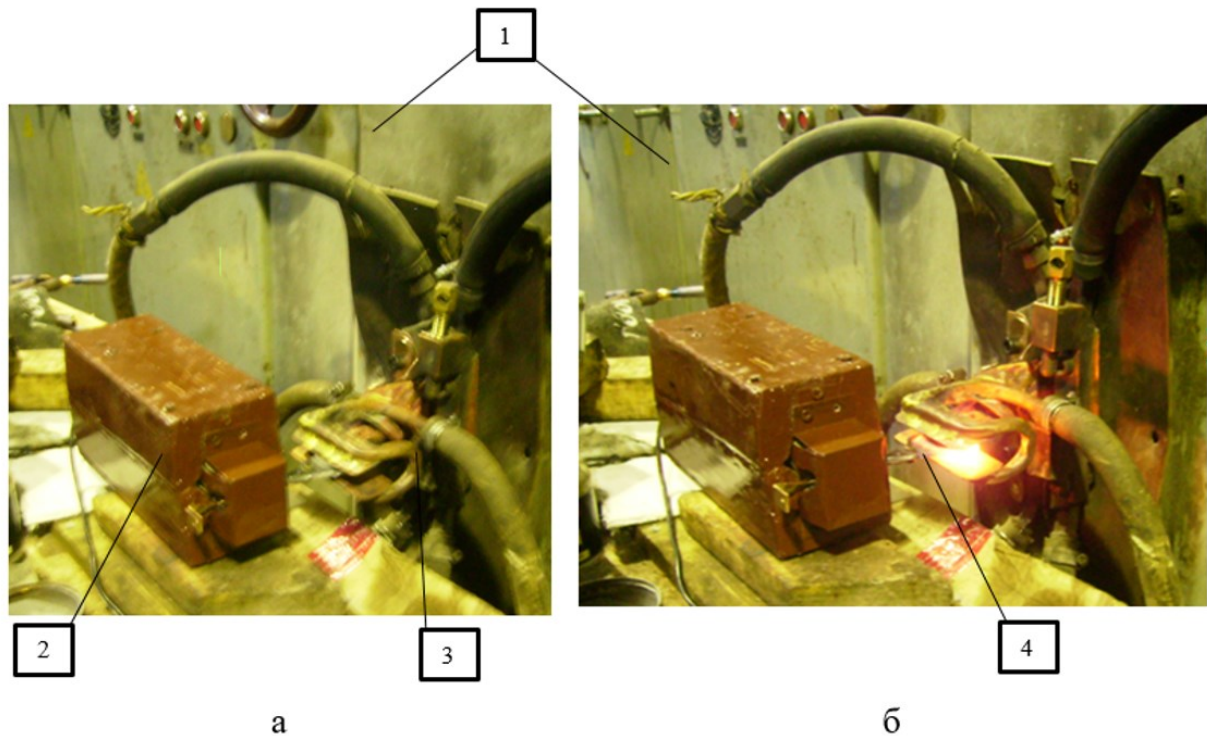
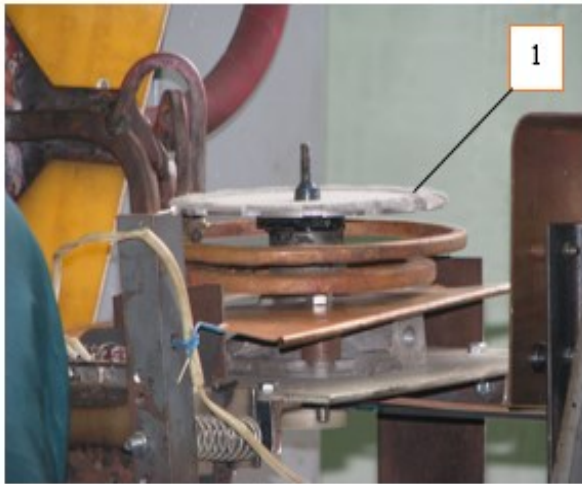


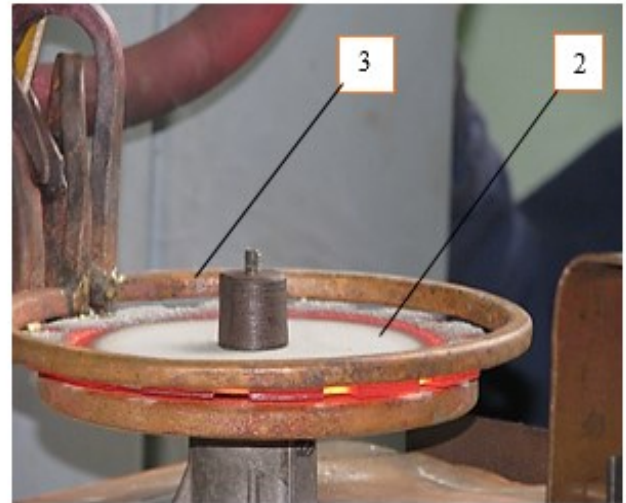
Рис. 4.1 Процес індукційного наплавлення із застосуванням механічної вібрації:
а – до наплавлення; б – в процесі наплавлення; 1 - генератор, 2 - пристрій для віброіндукційного наплавлення, 3 – індуктор, 4 – тонка плоска деталь

З метою підтвердження ефективності застосування механічної вібрації в процесі індукційного наплавлення була розроблена установка (рис. 4.2) для наплавлення деталей. Вона складається із плити на якій встановлено напрямляючі з електромагнітом та двох гнучких шин з електромагнітом, на яких встановлена верхня плита з механізмом фіксації деталей. Між електромагнітами встановлені пружини, які не дозволяють магнітам замикатися.

Наплавлення виконували за допомогою двовиткового кільцевого індуктора з прикладанням механічної вібрації в горизонтальному напрямку.



а



б



в



г

Рис. 4.2 Процес наплавлення деталей на віброіндукційній установці:
 1 – порошкоподібний твердий сплав ПГ-С1, 2 – деталь, 3 – індуктор, 4 –
 установка для наплавлення із застосування механічної вібрації.
 а – засипання шихти, б – момент спікання шихти, в – процес плавлення із
 застосування горизонтальної вібрації, г – завершення процесу наплавлення

Наплавлення проводили сегментним індуктором у першому випадку (рис. 4.1) та двовитковим кільцевим індуктором в другому випадку (рис. 4.2) при сталій питомій потужності на протязі всього проміжку часу наплавлення.

Експериментальні дослідження одночасного наплавлення по всій робочій

поверхні із використанням вібрації проводилися з візуальним спостереженням розплавлення стійкого проти спрацювання порошкового сплаву ПГ-С1, які наведені в роботі [81, 97]. Дослідження показали, що для рівномірного розплавлення порошкового сплаву по всій робочій поверхні та отримання наплавленого валика шириною 10...50 мм і товщиною наплавленого металу 0,8...1,5 мм, важливе значення має амплітуда коливань.

При проведенні попередніх експериментальних досліджень наплавленого металу із використанням вібрації, необхідно було врахувати такі фактори, як рівномірність розплавлення порошкового сплаву по всій робочій поверхні, відсутність пор, рівномірність товщини шару наплавленого металу, твердість, зносостійкість.

В результаті численних експериментів було встановлено, що найкращими режимами наплавлення, які забезпечують найбільшу якість наплавленого металу є режими, які приведені в таблиці 4.1, що здійснюються одночасно по всій робочій поверхні і відповідають зразкам А, Б, В. Всі ці режими досліджувалися в порівнянні з існуючим процесом індукційного наплавлення без використання вібрації (зразок А, табл. 4.1) [81, 97].

Для проведення порівняльних досліджень властивостей металу, наплавленого за існуючою і запропонованою технологіями наплавлення, були наплавлені плоскі деталі, виготовлені з сталі Ст.3.

Дослідження проводилися для трьох варіантів режимів наплавлення. В першому варіанті наплавлення здійснювалося одночасно по всій робочій поверхні в сегментному (рис. 4.1) та двовитковому кільцевому індукторі (рис. 4.2) без прикладання вібрації, як показано в табл. 4.1 зразок А.

В другому варіанті наплавлення проводили одночасно по всій поверхні за допомогою сегментного індуктора (зразок Б табл. 4.1) з прикладанням вертикальної вібрації, а в третьому варіанті наплавлення здійснювалося одночасно по всій робочій поверхні за допомогою сегментного та двохвиткового кільцевого індуктора (зразок В табл. 4.1) з прикладанням горизонтальної вібрації частотою 50 Гц і амплітудою коливань 0,2 мм. Технічні

характеристики генератора були однакові для трьох варіантів (зразки А, Б, В) і складала: напруга на контурі – 5,4 кВ, анодна напруга 10 кВ, струму сітки 1,2 А і струму анода 4 А. Час наплавлення всієї робочої поверхні деталі складав 35 с при сталій питомій потужності на індукторі $W=const$, яка визначалася за формулою [39]:

$$W = \frac{T_{зд} \lambda_g m^2}{1 - e^{-am^2t}} = const, \quad (4.1)$$

де $T_{зд}$ - температура (задана), при якій здійснюється якісне наплавлення і яка досягається за час t ;

λ_g - теплопровідність матеріалу деталі, Вт/(м⁰С).

При цьому розплавлення шихти починалося через 19-21 с після подачі напруги на індуктор.

Значення питомої потужності складала для зразків А, Б і В $W = 0,37 \cdot 10^9 \frac{Вт}{м^3}$.

Таблиця 4.1 - Схеми і режими наплавлення досліджуваних зразків

№ зразка	Схема наплавлення	Напруга, кВ		Струм, А		Час наплавлення, с	Зміна питомої потужності на індукторі, $W \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^3$
		на контурі	на аноді	сітки лампи	анода лампи		
А		5,4	10	1,2	4	35	
Б		5,4	10	1,2	4	35	
В		5,4	10	1,2	4	35	

1-індуктор; 2-твёрдий сплав; 3-деталь

В наступному розглянемо металографічні дослідження напавленого металу, одержаного з використанням наплавлення за вище описаними технологіями.

4.1.1. Металографічні дослідження наплавленого металу

Для проведення металографічних досліджень були наплавлені зразки із використанням традиційної та запропонованої технології. З метою підвищення зносостійкості і забезпечення самозагострювання в процесі роботи, робочу поверхню їх наплавляють стійким проти спрацювання порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 (У30Х28Н4С4) (табл. 4.2). Товщина наплавленого металу складає $1_{-0,2}^{+0,5}$ мм.

Для проведення порівняльних досліджень властивостей наплавленого металу за існуючою (одночасним) і розробленою (одночасним наплавленням по всій робочій поверхні з прикладанням вертикальної і горизонтальної вібрацій) технологіями, були наплавлені деталі, виготовлені з сталі Ст.3.

В процесі проведення експериментів за вищеописаними варіантами (табл. 4.1) було випробувано декілька технологічних схем наплавлення. Зразок А був наплавлений без прикладання вібрації (існуюча технологія), а для порівняння – два зразки (Б, В), наплавлених за розробленою технологією з прикладанням вертикальної і горизонтальної вібрації відповідно [97, 81, 123].

Схеми розташування витків індуктора і режими наплавлення досліджуваних зразків подані в табл. 4.1.

Таблиця 4.2. - Хімічний склад порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 у %

Матеріал	C	Cr	Si	Ni	Mn	B	Cu	W	Fe	Твердість HRC
Порошок										
ПГ-С1 сормайт № 1 (У30Х28Н4С4)	2,5...3,3	27...31	2,8...4,2	3,0...5,0	0,4...1,5	-	-	-	Основа	49-56

Встановлено, що за зовнішнім виглядом наплавлені зразки (товщина і ширина) практично мало відрізнялися один від одного.

Загальною для всіх варіантів наплавленого металу є структура крайових ділянок наплавлень. Вона складається з карбідів хрому різної дисперсності при практично повній відсутності пластинчатих карбідів хрому. Останнє свідчить про те, що умови остигання крайових ділянок наплавлення були схожими між собою (товщини наплавленого шару металу практично однакові).

Мікроструктуру досліджуваних зразків вивчали на приладі НЕОФОТ-32 (Німеччина). Травлення зразків для проведення металографічних досліджень проводили поетапно. Спочатку електролітичним способом в 20% розчині хромової кислоти (напругою 20 В і час витримки 10 с), виявляли структуру наплавленого металу. Для виявлення структури основного металу здійснювали хімічне травлення в 4% розчині азотної кислоти.

Мікроструктура основного металу являє собою ферит і перліт (рис. 4.3), а мікроструктура наплавленого металу всіх досліджуваних зразків (рис. 4.4) складається з первинних карбідів (комплексні карбіди типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$) у вигляді великих пластин «олівцевого» типу, які мають гексагональну ґратку з чіткою границею з'єднання з матрицею, карбідної евтектики і матричної аустенітної структури. Надлишкові карбіди, як правило, розташовуються у вигляді окремих пластинчастих виділень в центральній частині по ширині і товщині наплавленого валика. Прямокутні і шестигранні виділення - це карбіди різної дисперсності, частина з них - надлишкові пластинчасті карбіди, які досить рівномірно розподілені в матриці. Мікротвердість карбідів змінювалася в межах $HV_{0,5} = 11710 \dots 12830$ МПа (рис. 4.5).

Загальним для всіх варіантів наплавленого металу є:

- наявність в наплавленому шарі доевтектичної зони, що примикає до лінії з'єднання, що характеризується формуванням дендритів твердого розчину (легованого аустеніту) з осями першого і другого порядку, а також карбідної евтектики, яка кристалізується в міждендритному просторі. Мікротвердість аустеніту становила $HV_{0,5} = 4120 \dots 4410$ МПа для зразка А та Б і $HV_{0,5} = 4800 \dots 5090$ МПа - для зразка В (рис. 4.6). Крім того, виявлено структурну

неоднорідність вздовж лінії з'єднання з боку сормаїту, яка полягає в тому, що доевтектична дендритна зона розподілена нерівномірно;

- утворення граничної білої смужки твердого розчину (легованого аустеніту) між наплавленим і основним металом змінної ширини 10-20 мкм з мікротвердістю $HV_{0,5} = 3030 \dots 3410$ МПа для зразка А, і $HV_{0,5} = 3410 \dots 3810$ МПа і $HV_{0,5} = 3860$ МПа відповідно для зразків Б та В (рис. 4.7);

- з боку основного металу у лінії з'єднання є дифузійна зона, що являє собою тонко-пластинчастий перліт і ферит по межах зерен, іноді з орієнтацією по відманштету з мікротвердістю $HV_{0,5} = 2440$ МПа – зразок А та Б і $HV_{0,5} = 2320 \dots 2440$ МПа – зразок В, що виникла внаслідок дифузії вуглецю з сормаїту в основний метал.

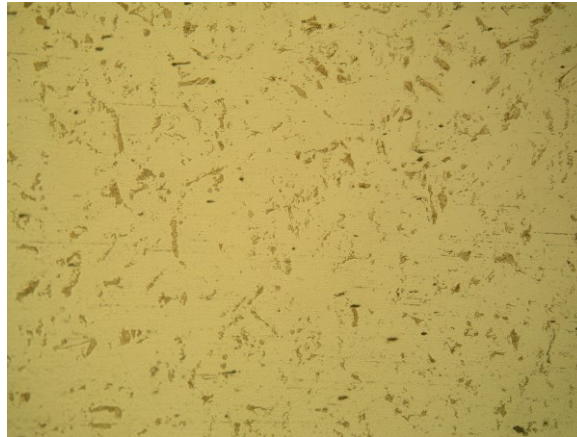


Рис. 4.3 Мікроструктура основного металу ($\times 500$)

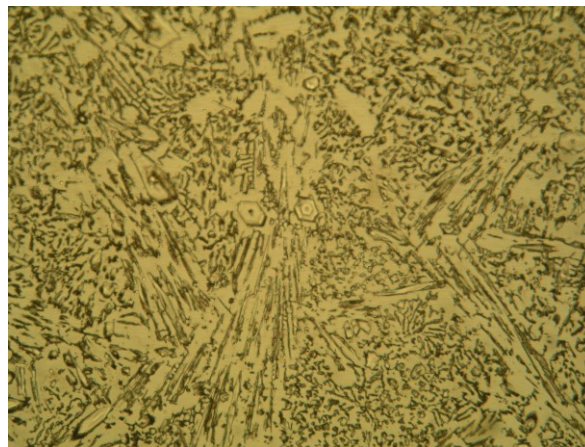


Рис. 4.4 Мікроструктура наплавленого металу яка складається з первинних карбідів (комплексні карбіди типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$) ($\times 500$)

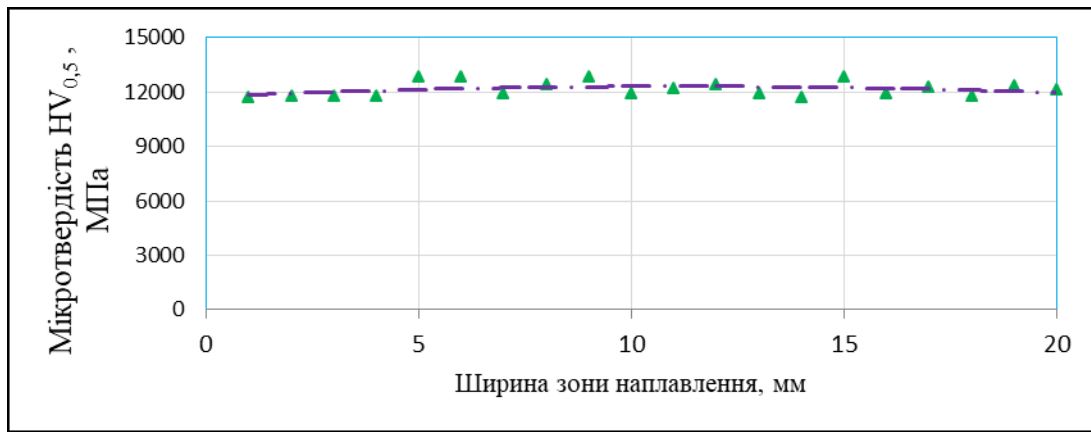


Рис. 4.5 Мікротвердість карбідів хрому типу $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ і $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$

Мікротвердість структурних складових для трьох зразків представлена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Мікротвердість структурних складових HV_{0,5}, МПа

Зразок	Карбіди хрому	Матриця	Перехідна зона
А	11710...12830	4120...4410	3030...3410
Б	11710...12830	4120...4800	3410...3810
В	11710...12830	4800...5090	3860

Необхідно відзначити відмінності в структурі трьох варіантів наплавленого металу. Карбіди, що мають вид шестигранників з середньою довжиною сторони 10 ... 12 мкм, без вібрації (рис. 4.8), подрібнюються до 7 ... 10 мкм при вертикальній (рис. 4.8) і 3,5 ... 7 мкм при горизонтальній вібрації (рис. 4.8). Горизонтальна вібрація призводить до помітного подрібненню карбідної складової.

Максимальна глибина евтектичної зони в зразках А та Б, а мінімальна - у зразку В (рис. 4.9). У зразку В зона аустенітних дендритів займає найменший відсоток по довжині наплавлення порівняно із зразками А і Б. При горизонтальній вібрації лінія з'єднання з боку сормаїту являє собою, в основному, білу смужку з утворенням майже рівновісних зерен аустеніту (рис. 4.10).

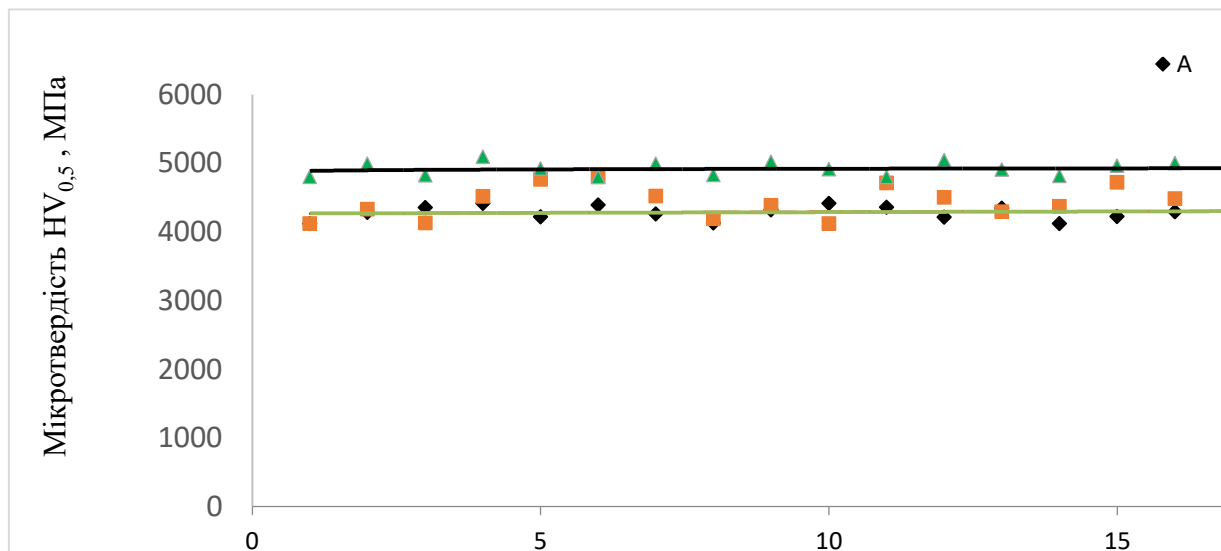


Рис. 4.6 Мікротвердість матриці сплаву зразків А, Б та В

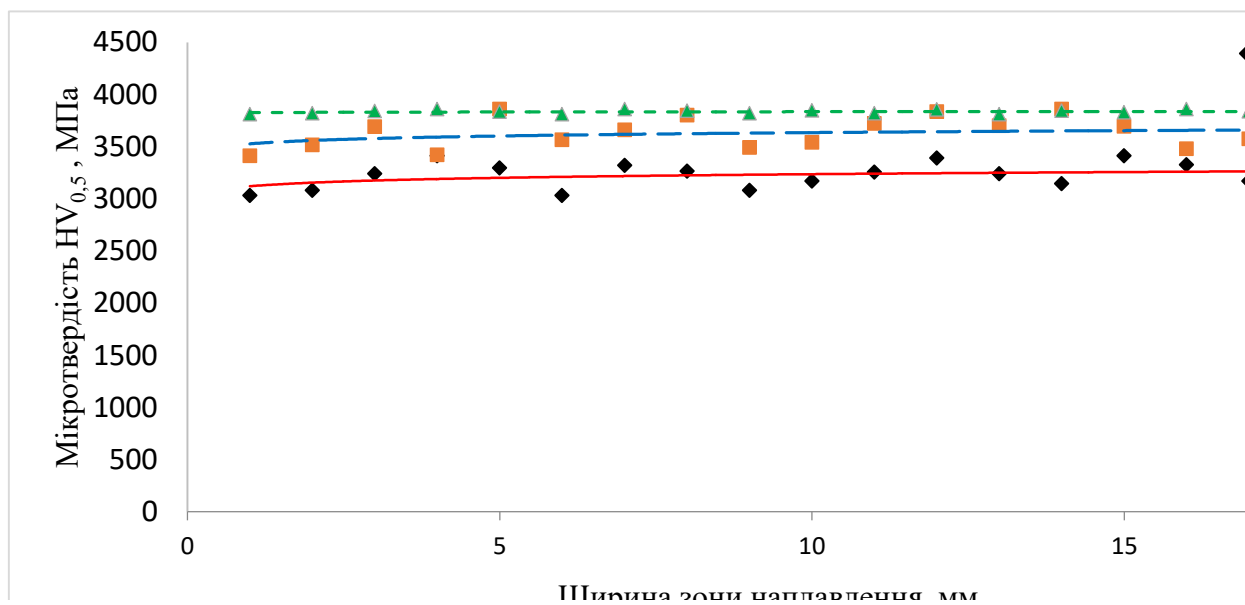


Рис. 4.7 Мікротвердість перехідної зони зразків А, Б та В

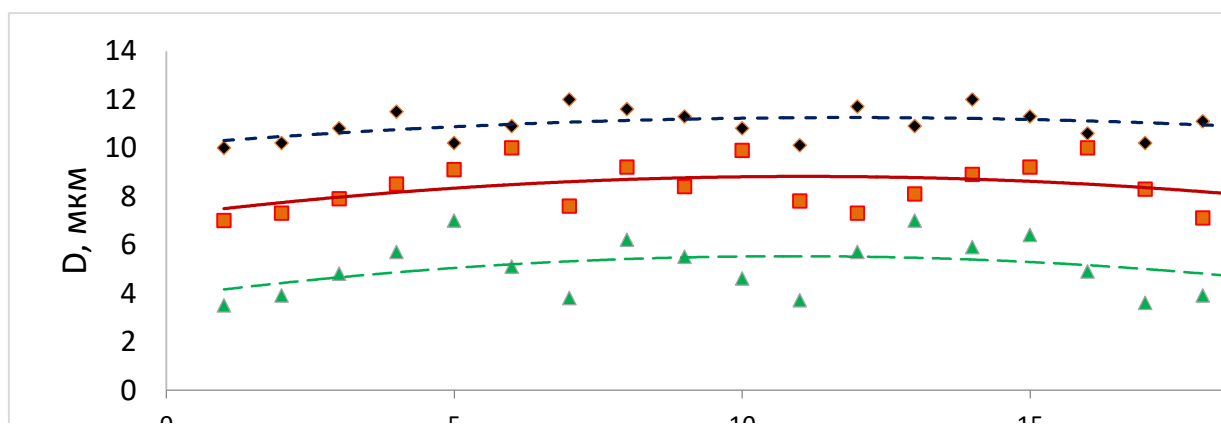


Рис. 4.8 Розміри карбідних складових в зразках А, Б та В

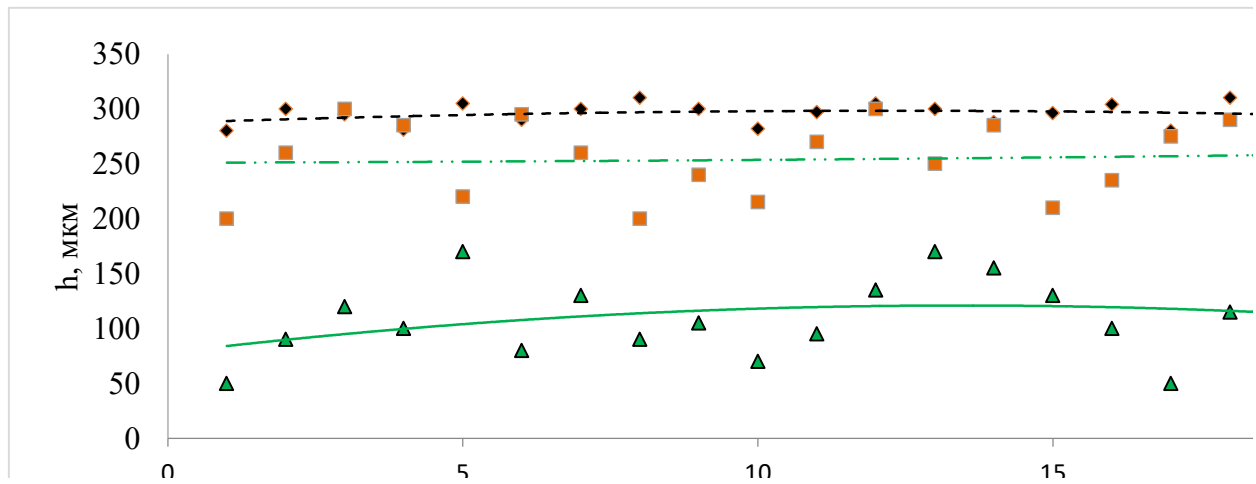
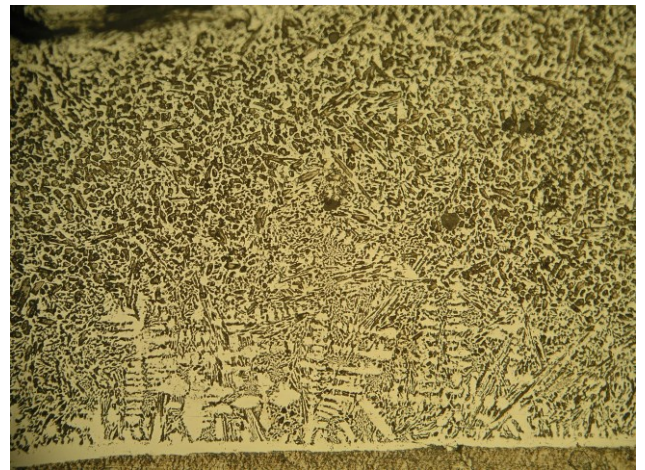


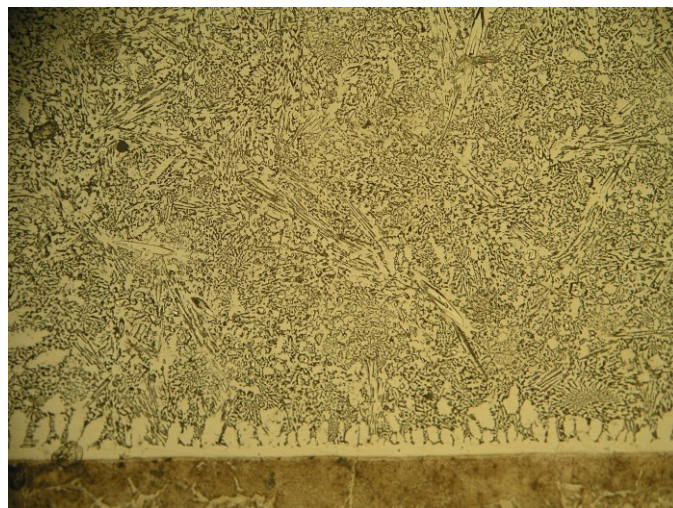
Рис. 4.9 Результати вимірювань глибина евтектичної зони в зразках А, Б та В



а



б



в

Рис. 4.10. Мікроструктура наплавленого металу ($\times 200$): а – без вібрації, б – вертикальна вібрація, в – горизонтальна вібрація

4.1.2. Мікрорентгеноспектральний аналіз перехідної зони сплавлення основного і наплавленого металу

Відомо, що при підвищених температурах в зоні сплавлення зварного з'єднання різнорідних сталей може відбуватися дифузія вуглецю з менш легованого металу в більш легований, наприклад, з низьколегованого основного металу в аустенітний зварний шов [97].

Враховуючи цей факт були проведені дослідження мікрорентгеноспектрального аналізу перехідної зони сплавлення основного і наплавленого металу.

Досліджено вплив горизонтальної та вертикальної вібрацій деталі в процесі наплавлення на формування структури перехідної зони при індукційному наплавленні сплаву ПГ-СІ на сталь Ст.3 (зразків А, Б, В). Дослідження проводили на мікроаналізаторі MS-46 французької фірми САМЕСА. Вивчення розподілу вуглецю виконували на мікроаналізаторі КАМЕВАХ SX-50 тієї ж фірми [97,81, 123].

На рис. 4.11, а, б, в показаний розподіл вуглецю і хрому в зразках (А, Б, В). У всіх випадках записи виконувалися в рівнозначних ділянках посередині ширини наплавлення, перпендикулярно лінії сплавлення, як правило, на глибині 350 мкм від основного металу.

Встановлено, що у зразка А (рис. 4.11, а) на відстані до 40 мкм від основного металу спостерігається зона, яка характеризується дрібнодисперсним виділенням карбідів з вмістом хрому до 10% і середнім вмістом вуглецю в матриці біля 1,5%. На відстані 40 мкм виявлено наявність більш крупних карбідів, де концентрація хрому зростає майже до 15%, а вміст вуглецю складає приблизно 4%. Такий вміст хрому і вуглецю спостерігається на відстані 150 мкм, а потім різко зростає і становить 20% хрому та біля 6% вуглецю. В зразку Б (рис. 4.11, б) розподіл хрому і вуглецю практично ідентичний зразку А.

У зразку В (рис. 4.11, в) на відстані 20 мкм від лінії сплавлення спостерігається різке збільшення вмісту хрому приблизно до 25% і середнім

вмістом вуглецю біля 4%, і такий відсотковий вміст даних елементів спостерігається практично по всій товщині наплавленого металу.

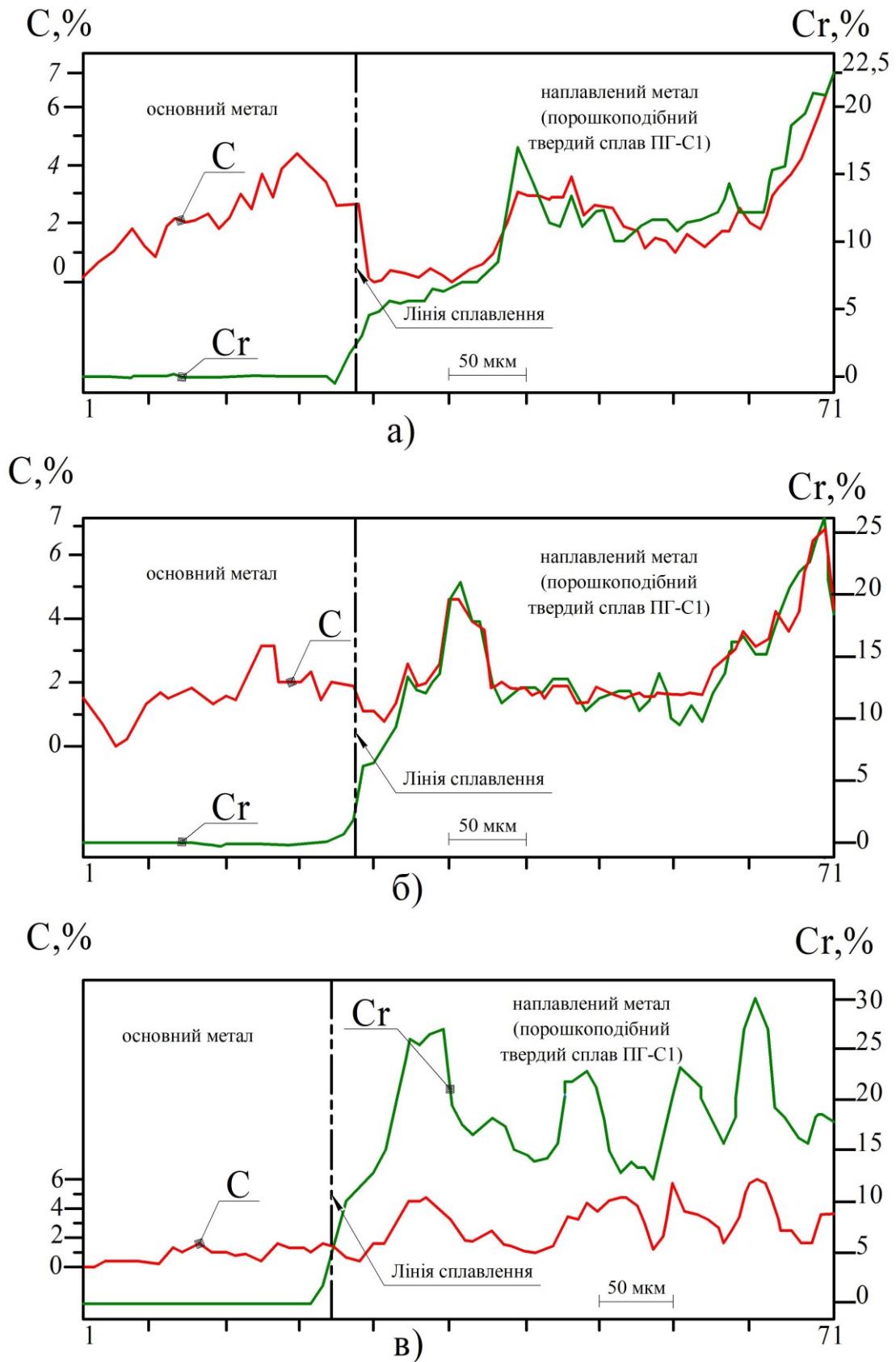


Рис. 4.11. Розподіл вуглецю і хрому в зоні сплавлення зразків А,Б та В

Також, вивчали якісний розподіл вуглецю і хрому в трьох зразках (рис. 4.11 а, б та в). Як видно з рис. 4.11, помітного збагачення вуглецем ділянки наплавленого металу біля лінії сплавлення не спостерігається для трьох зразків. У зразках А та Б вуглець знаходиться в карбідах поверхневих шарів, а у зразка В карбіди рівномірно розподілені по товщині наплавленого шару металу, що, позитивно впливає на стійкість проти спрацювання. За даними рентгеноструктурного аналізу, одержані з'єднання відповідають комплексним карбідам типу $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ і $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ у всіх трьох варіантах.

Таким чином, як по мікроструктурі, так і по розподілу елементів технологічний варіант наплавлення зразка В, вигідно відрізняється від варіантів А і Б, що дає підставу вважати його найбільш оптимальним і ефективним.

4.1.3. Дослідження впливу вібрації деталі в процесі наплавлення на твердість та зносостійкість наплавленого металу

Для підтвердження відмічених раніше припущень з підвищення ресурсу роботи деталей наплавлених із застосуванням горизонтальної та вертикальної вібрацій були проведені лабораторні випробування на зносостійкість зразків А, Б, В (табл. 4.1) з вимірюванням їх твердості.

Твердість наплавленого металу вимірювалася на твердомірі «Лесо» при навантаженні 0,5 і 3 Н для зразків наплавлених за існуючою технологією та із застосуванням горизонтальної та вертикальної вібрацій. Вимірювання проводили при навантаженні 3 Н від поверхні наплавлення через лінію з'єднання в основному металі. Результати вимірювань представлені графічно на рис. 4.12. Як видно на поверхні наплавленого металу твердість знижується. Можливо, концентрація хрому і вуглецю трохи нижче на поверхні сормаїту, що пояснюється їх окисленням і переходом елементів в шлак.

Як видно з рис. 4.12 найменшу твердість має зразок А, наплавлений за існуючою технологією і вона знаходиться в межах 3500 МПа, зразки Б і В, які

наплавлені із застосуванням вертикальної і горизонтальної вібрації в процесі наплавлення і мають твердість яка знаходиться відповідно в межах 4800 МПа та 5400 МПа. Тобто, найбільшу твердість має зразок В, наплавлений із прикладанням горизонтальної вібрації в процесі наплавлення.

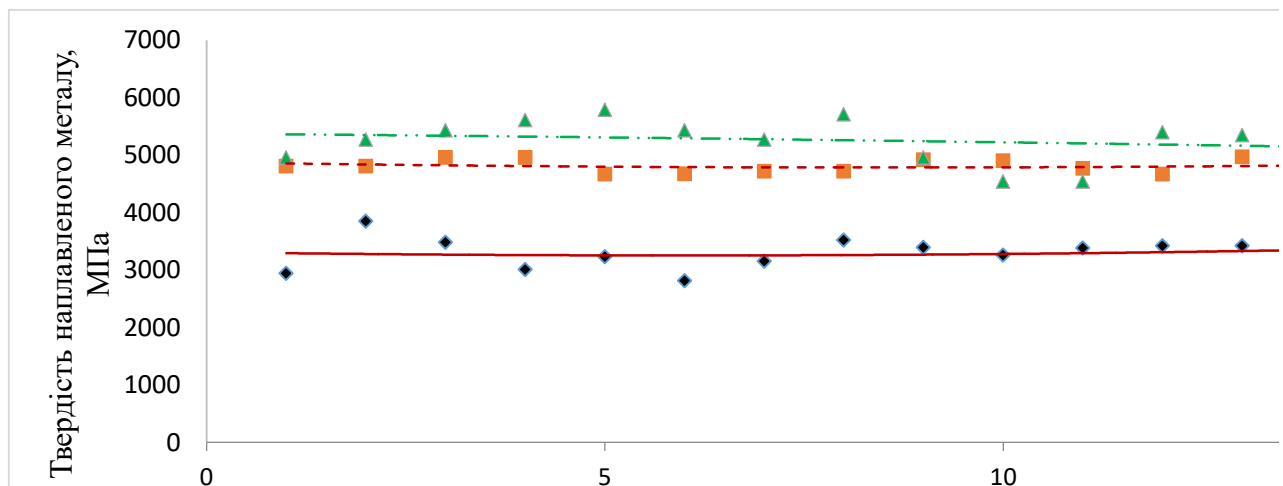


Рис. 4.12 Результати вимірювань твердості наплавленого металу (зразки А,Б і В)

Діаграми розходжень твердості металу наплавленого за існуючою і розробленою технологіями для зразків А, Б, В представлені на рис. 4.13.

Дослідження на зносостійкість проводили в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на машині НК-М [116, 65] по методиці, яка описана в розділі 3 (параграф 3.2.1). На рис. 4.13 подані діаграми відносної зносостійкості наплавлених зразків (середні значення по трьох випробуваннях).

Умови випробувань для всіх зразків були однакові: абразив - кварцовий пісок з розміром частинок 0,2 - 0,4 мм; шлях тертя - 415 м; тиск - 0,466 МПа; еталон - відпалена сталь 45. Як видно з рис. 4, найменшу зносостійкість має зразок А (2,2), а найбільшу - зразки Б і В (відповідно 3,1 і 3,4). Таким чином, при наплавленні по схемі прийнятій для зразка В, досягається найвища зносостійкість, що пояснюється сприятливою структурою наплавленого металу і утворенням в більшій мірі карбідів $(Fe,Cr)_7C_3$, що підтверджується дослідженнями мікрорентгеноспектрального аналізу.

Таким чином, найвищу зносостійкість має зразок В, наплавлений з використанням горизонтальної вібрації при заданих параметрах частоти 50 Гц і

амплітуди коливань 0,2 мм, за рахунок ущільнення наплавленого металу і утворення сприятливої структури по всій його товщині з утворенням карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$.

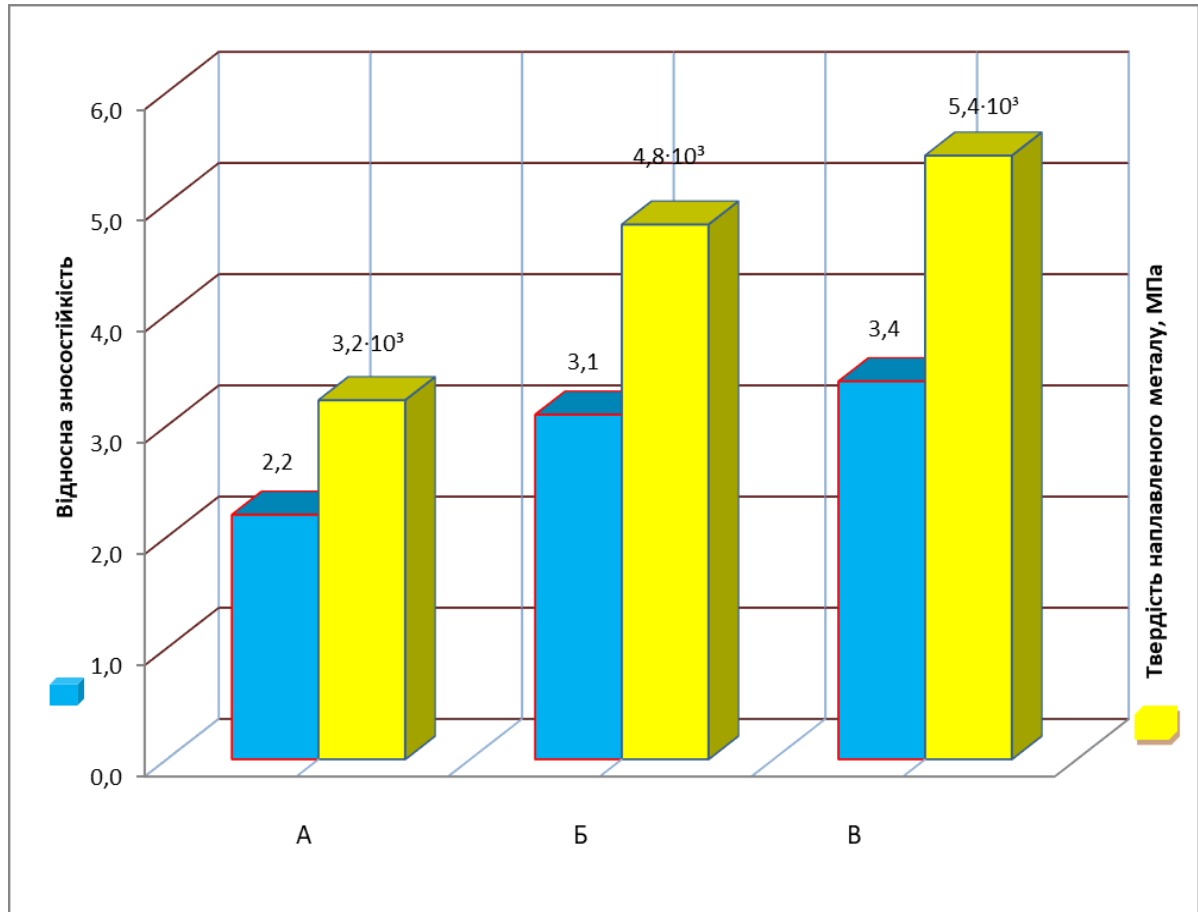


Рис. 4.13. Діаграми відносної зносостійкості і твердості наплавлених зразків А, Б, В (табл. 4.1)

Таким чином, результати досліджень структури і властивостей наплавленого металу, отриманого по розробленій технології індукційного наплавлення із застосуванням вібрації, показують, що мікроструктура, твердість і зносостійкість для матеріалу ПГ-С1 значно змінюються порівняно з існуючою традиційною технологією індукційного наплавлення без вібрації. При цьому підвищується зносостійкість наплавленого металу в 1,5 рази.

4.2. Експериментальні дослідження товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі

Для оцінки технологічного процесу індукційного наплавлення металу на робочу поверхню тонких деталей для трьох способів наплавлення (без використання вібрації (А), з використанням вертикальної (Б) та горизонтальної вібрації (В)) та встановлення емпіричної закономірності, яка характеризує функціональну залежність зміни відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 , було проведено експериментальні дослідження, реалізацію яких здійснювали згідно з методикою, яку наведено у підпункті 3.3 розділу 3.

Експериментальні дослідження проводили в лабораторних умовах з використанням розробленого лабораторного обладнання, додаток В.1.1.

На першому етапі досліджень з метою підтвердження вірогідності випадкового розподілу та встановлення функціонального закону розподілу значень випадкових величин відхилення товщини наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі, проведено обробку експериментального масиву генеральної вибірки (додаток Г.1.1, додаток Г.2.1) згідно зі стандартною методикою [125-127].

На другому етапі, за результатами реалізації план-матриці, провели обробку отриманого масиву експериментальних даних (додаток Г.3.1) згідно з методикою, яку наведено в п. 3.3 розділу 3 дисертаційної роботи.

При цьому експерименти провели у трикратній повторності.

У результаті обробки генеральної вибірки (об'єм генеральної вибірки: $N = 27$, Δh_1 – без застосування вібрації; $N = 100$, вертикальна Δh_2 і горизонтальна Δh_3 вібрація) побудовано гістограму та полігон розподілу частот відхилення товщини шару наплавленого металу для трьох способів наплавлення тонких деталей: без застосування вібрації під час наплавлення шару металу на робочу поверхню деталі Δh_1 ; з застосуванням вертикальної вібрації Δh_2 ; з

застосуванням горизонтальної вібрації Δh_3 .

При цьому кожна побудована гістограма та полігон розподілу частот відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 , які наведено, відповідно, на рис. 4.14 – рис. 4.16 відтворює диференційний закон, або щільність розподілу випадкової величини Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 для кожного із трьох способів наплавлення шару металу на робочу поверхню деталей.

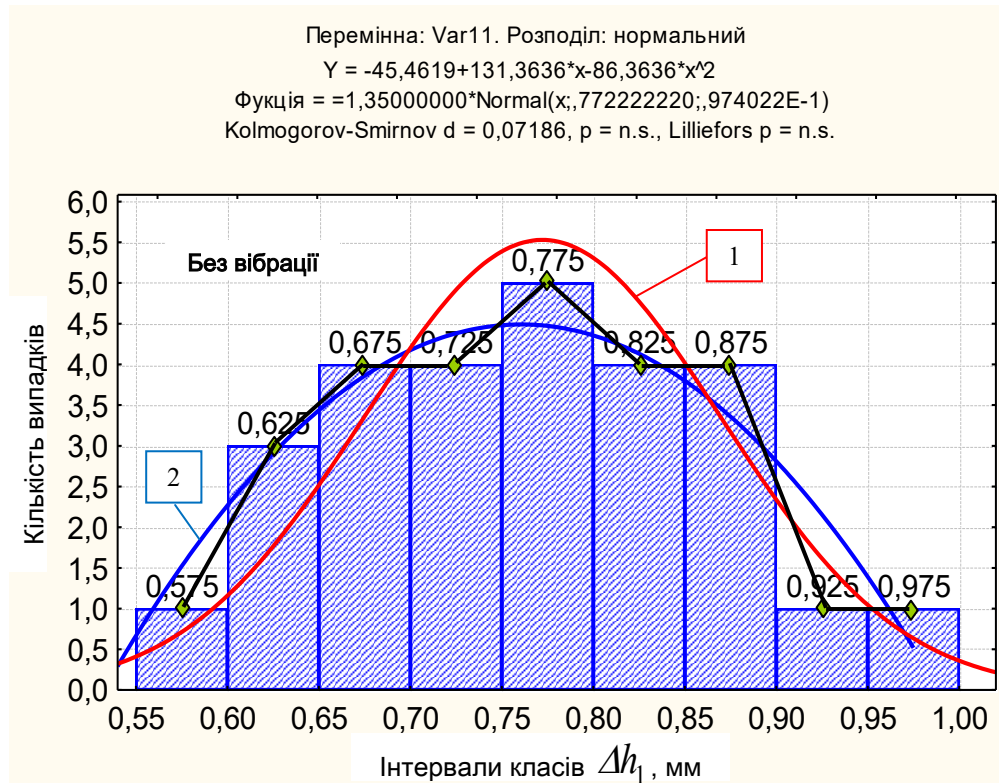


Рисунок 4.14 – Гістограма та полігон щільності розподілу відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 :

1 – крива нормального закону розподілу; 2 – функція полінома другої степені

Поділ на класи отриманого експериментального масиву даних генеральної вибірки (додаток Г.2.1, додаток Г.3.1) безперервного випадкового процесу зміни відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 на робочу поверхню деталі виконано за правилом Штюргеса [125]. При цьому відхилення Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 визначали згідно формули (3.4).



Рисунок 4.15 – Гістограма та полігон щільності розподілу відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_2 :
 1 – крива нормального закону розподілу; 2 – функція полінома другої степені



Рисунок 4.16 – Гістограма та полігон щільності розподілу відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_3 :
 1 – крива нормального закону розподілу; 2 – функція полінома другої степені

Аналіз побудованих гістограми та полігону щільності розподілу випадковості процесу (рис. 4.14-4.16) показує, що диференційний закон щільності розподілу відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 на робочу поверхню деталі близький до нормального (крива 1), а функцією, яка описує функціональну залежність розподілу є поліном другої степені, крива 2.

Безпосередньо диференційний закон ймовірності щільності розподілу відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 на робочу поверхню деталі у загальному випадку має вигляд:

$$f(\Delta h_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h_1 - \mu}{\sigma}\right)^2} = f(\Delta h_1) = \frac{1}{0,77\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h_1 - \frac{1}{0,97}}{0,77}\right)^2}; \quad (4.2)$$

$$f(\Delta h_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h_2 - \mu}{\sigma}\right)^2} = f(\Delta h_2) = \frac{1}{0,44\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h_2 - \frac{1}{0,65}}{0,44}\right)^2}; \quad (4.3)$$

$$f(\Delta h_3) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h_3 - \mu}{\sigma}\right)^2} = f(\Delta h_3) = \frac{1}{0,14\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h_3 - \frac{1}{0,63}}{0,14}\right)^2}; \quad (4.4)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення;

μ – математичне сподівання.

Числові значення σ і μ для відповідного закону щільності розподілення випадковості процесу відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_i на робочу поверхню деталі наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Числові значення середнього квадратичного відхилення σ і математичного сподівання μ для кожного способу наплавлення металу

	Δh_1	Δh_2	Δh_3
σ	0,77	0,44	0,14
μ	$0,97^{-1}$	$0,65^{-1}$	$0,63^{-1}$

Перевірка гіпотези про нормальний розподіл вибіркової сукупності випадкової величини Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 необхідна для підтвердження, або відхилення нульової гіпотези про розподіл випадкової величини та належність вибіркової сукупності до генеральної. Перевірка відповідності розподілу випадкової величини Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 нормальному закону розподілу проведена за критерієм відповідності Колмогорова-Смирнова $K(\lambda)$.

Аналіз наведених графічних відтворень (гістограм і полігонів щільності розподілу) випадковості процесу функціональної зміни Δh_1 , Δh_2 і Δh_3 (рис. 4.14-рис. 4.16) показує, що імовірність значень генеральної вибірки експериментального масиву даних основної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу знаходиться в межах:

- без вібрації $\Delta h_1 = 0,62 \dots 0,87$ мм з кількістю випадків рівним 27 (рис. 4.14);
- з вертикальною вібрацією $\Delta h_2 = 0,35 \dots 0,37$ мм з кількістю випадків рівним 24 та $\Delta h_2 = 0,41 \dots 0,51$ мм з кількістю випадків рівним 57 (рис. 4.15);
- з горизонтальною вібрацією $\Delta h_3 = 0,07 \dots 0,11$ мм з кількістю випадків рівним 47 та $\Delta h_3 = 0,15 \dots 0,19$ мм з кількістю випадків рівним 37 (рис. 4.16).

На другому етапі для побудови емпіричної математичної моделі, яка характеризує зміну відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 для трьох способів наплавлення, було проведено планований дво- (Δh_1) та трифакторний (Δh_2 , Δh_3) експерименти типу ПФЕ 3^2 і ПФЕ 3^3 . Після їх реалізації утворювали загальну таблицю отриманих результатів точок композиційного плану експериментальних досліджень (додаток Г.3.1). При цьому таблицю отриманих результатів точок композиційного плану експерименту ПФЕ 3^3 побудовано згідно з порядком рандомізованої план-матриці (табл. 2.В.1.1 додатка В.1.1).

Залежність для проведення апроксимації експериментальних даних відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 ,

Δh_2 , Δh_3 , або визначення апроксимуючої функції у вигляді емпіричної моделі $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, яка характеризує зміну Δh_1 від зміни вхідних факторів U_k і t_n та $\Delta h_2 = \Delta h_3 = f_{\Delta h_{2,3}}(a_k; U_k; t_n)$, яка характеризує зміну Δh_2 і Δh_3 від зміни вхідних факторів A_k , U_k і t_n проводили шляхом перебору відомих алгебраїчних функцій та встановлювали за найбільшим значенням відповідного коефіцієнта множинної детермінації D_1 , D_2 , D_3 .

Встановлення виду алгебраїчної функції для проведення апроксимації експериментального масиву даних зміни відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 проводили наступним чином. Заповнювали відповідні числові значення графів несиметричної план-матриці результатів експериментальних досліджень Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 , яку завантажували у програму обробки експериментальних даних Statistica 10.

На першому етапі за результатами перебору наявних у програмі Statistica 10 основних відомих алгебраїчних функцій за рівня значимості $P = 0,95$ було встановлено вид алгебраїчної функції, яка найбільш повно (адекватно) апроксимує результати експериментального масиву даних відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 (додаток Г.4.1, додаток Г.5.1, додаток Г.6.1) згідно з найбільшим значення коефіцієнта множинної детермінації: $D_{1l} = 0,926$, який відповідає лінійній функції (додаток Г.4.1-а); $D_{2l} = 0,603$, який відповідає лінійній функції (додаток Г.5.1-а); $D_{3z} = 0,289$, який відповідає зворотній функції (додаток Г.6.1-а).

На другому етапі визначили значення коефіцієнта множинної детермінації D_1 , D_2 , D_3 для апроксимуючої моделі отриманих значень відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 у вигляді повного полінома другої степені, при цьому було встановлено, що за рівня значимості $P = 0,95$ коефіцієнти дорівнюють: без застосування вібрації $D_{1n} = 0,997$ (додаток Г.4.1-в); з застосуванням вертикальної вібрації $D_{2n} = 0,959$

(додаток Г.5.1-в); з застосуванням горизонтальної вібрації $D_{3n} = 0,933$ (додаток Г.6.1-в).

На основі того, що $D_{1n} = 0,997 > D_{1l} = 0,926$, $D_{2n} = 0,959 > D_{2l} = 0,603$, $D_{3n} = 0,933 > D_{3z} = 0,289$ було встановлено, що апроксимуюча модель повного полінома другої степені більш точно, або найбільше адекватно апроксимує (вирівнює) значення експериментального масиву даних функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 , який наведено у додатку Г.3.1.

Результати статистичних розрахунків обробки експериментального масиву даних і регресійного аналізу зміни відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 та які записано у вигляді функцій $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$ і $\Delta h_2 = \Delta h_3 = f_{\Delta h_{2,3}}(a_k; U_k; t_n)$ наведено у додатку Г.4.1-додатку Г.6.1.

Тому алгебраїчний вид функції згідно з якою проведено апроксимацію експериментального масиву даних зміни відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 , яку визначали за найбільшим значенням коефіцієнта множинної детермінації $D_{1n} = 0,997$, $D_{2n} = 0,959$, $D_{3n} = 0,933$ (додаток Г.4.1-в - додаток Г.6.1-в), знаходили у вигляді математичної моделі повного полінома другої степені

$$\Delta h_1 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2; \quad (4.5)$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_3 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2; \quad (4.6)$$

де b_0 – вільний член емпіричної моделі;

$b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти відповідних факторів x_i ;

x_1, x_2, x_3 – відповідні фактори.

Невідомі натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії (4.5) і (4.6),

які характеризує функціональну зміну відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 у натуральних величинах, або визначення коефіцієнтів рівняння регресії апроксимуючої моделі $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, яка характеризує зміну Δh_1 та $\Delta h_2 = \Delta h_3 = f_{\Delta h_{2,3}}(a_k; U_k; t_n)$ від зміни вхідних факторів було визначено за допомогою програми Statistica 10.

Визначені числові значення коефіцієнтів рівняння регресії (4.5) і (4.6) у натуральних величинах, які характеризують функціональну зміну відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 у вигляді функції $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$ і $\Delta h_2 = \Delta h_3 = f_{\Delta h_{2,3}}(a_k; U_k; t_n)$ наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Натуральні значення коефіцієнтів b_i рівняння регресії зміни відхилення товщини шару наплавленого металу на поверхню Δh_1 , Δh_2 , Δh_3

Позначення	Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії				
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}
$\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$	1,18	-0,05	0,002	0,001	-0,005
	b_{22}				
	-0,0002				
$\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k; t_n)$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
	0,64	-0,81	0,02	-0,003	-0,05
	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
	$0,41 \cdot 10^{-6}$	0,0003	2,03	-0,006	-0,00002
$\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k; t_n)$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
	1,9	-0,74	-0,6	-0,004	0,01
	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
	-0,0006	-0,003	1,28	0,06	0,0002

Після проведення оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії за t -критерієм Стюдента згідно з умовою $t_p < t_T$ [127] за рівня достовірності $P = 0,95$ (результати статистичних розрахунків статистичної значущості коефіцієнтів рівняння наведено у додатках Г.4.1-в – Г.6.1-в), отримано рівняння регресії у натуральних величинах, яке характеризує та функціонально описує зміну товщини шару наплавленого металу Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 у натуральних

факторах як функція $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$ і $\Delta h_2 = \Delta h_3 = f_{\Delta h_{2,3}}(a_k; U_k; t_n)$ залежно від зміни вхідних факторів, додаток Г.4.1-б - додаток Г.6.1-б:

- без застосування вібрації

$$\Delta h_1 = 1,18 - 0,05U_k + 0,002t_n + 0,001U_k t_n - 0,005U_k^2 - 0,0002t_n^2, \quad (4.7)$$

при цьому всі коефіцієнти рівняння регресії є значущими;

- з застосуванням вертикальної вібрації

$$\Delta h_2 = 0,64 - 0,81a_k + 0,02U_k - 0,003t_n - 0,05a_k U_k + 2,03a_k^2 - 0,006U_k^2 - 0,00002t_n^2, \quad (4.8)$$

при цьому коефіцієнти рівняння регресії $b_{13} = 0,41 \cdot 10^{-6}$ і $b_{23} = 0,0003$ є незначущими;

- з застосуванням горизонтальної вібрації

$$\Delta h_3 = 1,9 - 0,74a_k - 0,6U_k - 0,004t_n + 0,01a_k U_k - 0,003U_k t_n + 1,28a_k^2 + 0,06U_k^2 + 0,0002t_n^2, \quad (4.9)$$

при цьому коефіцієнт рівняння регресії $b_{13} = -0,0006$ є незначущими.

Перевірку адекватності, або значимості регресійної моделі (4.7)-(4.9) проведено за F -критерієм Фішера згідно з умовою $F_p < F_T$ згідно [127] за рівня достовірності $P = 0,95$ та коефіцієнта множинної кореляції $R_{1n} = 0,998$, $R_{2n} = 0,979$, $R_{3n} = 0,966$ і рівня достовірності коефіцієнта множинної детермінації $D_{1n} = 0,997$, $D_{2n} = 0,959$, $D_{3n} = 0,933$ з вірогідністю $P = 1,00$ (результати статистичних розрахунків адекватності регресійної моделі (4.7)-(4.9) наведено у додатку Г.4.1-в – Г.6.1-в).

Отримані регресійні залежності (4.7)-(4.9) дозволяють визначати відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 залежно від вхідних факторів у таких межах їх зміни: амплітуди

коливання деталі під час наплавлення $0,1 \text{ мм} \leq A_k \leq 0,5 \text{ мм}$; напруги на контурі $4,4 \text{ кВ} \leq U_k \leq 6,4 \text{ кВ}$; часу наплавлення $20 \text{ с} \leq t_n \leq 50 \text{ с}$.

Аналіз числового підрахунку значень Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 за рівняннями регресії (4.7)-(4.9) та побудованих згідно з ними графічних відтворень у вигляді поверхонь відгуку та двомірних перерізів поверхонь відгуку (рис. 4.17 - 4.21), які характеризують функціональну зміну відхилення товщини шару наплавленого металу, яке описується функцією $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$ (рис. 4.17), $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k)$ (рис. 4.18), $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; t_n)$, рис. 4.19, $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k)$ (рис. 4.20), $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; t_n)$, рис. 4.21 показує, що основний масив апроксимованих відповідних значень Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 знаходиться у межах:

- без застосування вібрації $\Delta h_1 = 0,57 \dots 0,92 \text{ мм}$, рис. 4.17;
- з застосуванням вертикальної вібрації $\Delta h_2 = 0,34 \dots 0,58 \text{ мм}$, рис. 4.18;
- з застосуванням горизонтальної вібрації $\Delta h_3 = 0,08 \dots 0,26 \text{ мм}$, рис. 4.20.

Це також характерно графічним відтворенням поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів, які наведено на рис. 1.Г.7.1 та рис. 2.Г.7.1 додатка Г.7.1.

Таким чином, застосування, як вертикальної, так і горизонтальної вібрації деталі під час наплавлення металу призводить до зменшення відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_2 і Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1 \text{ мм}$ відносно відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_1 без застосування вібрації, відповідно, Δh_2 – 1,6...1,8 рази, а Δh_3 – у 3,5...7,5 рази, що підтверджує ефективність застосування запропонованої технології індукційного наплавлення металу для відновлення тонких деталей.

Крім того, застосування горизонтальної вібрації деталі під час наплавлення металу зменшує відхилення товщини шару Δh_3 наплавленого металу на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1 \text{ мм}$

відносно відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі Δh_2 з застосуванням вертикальної вібрації у 2,2...4,3 рази.

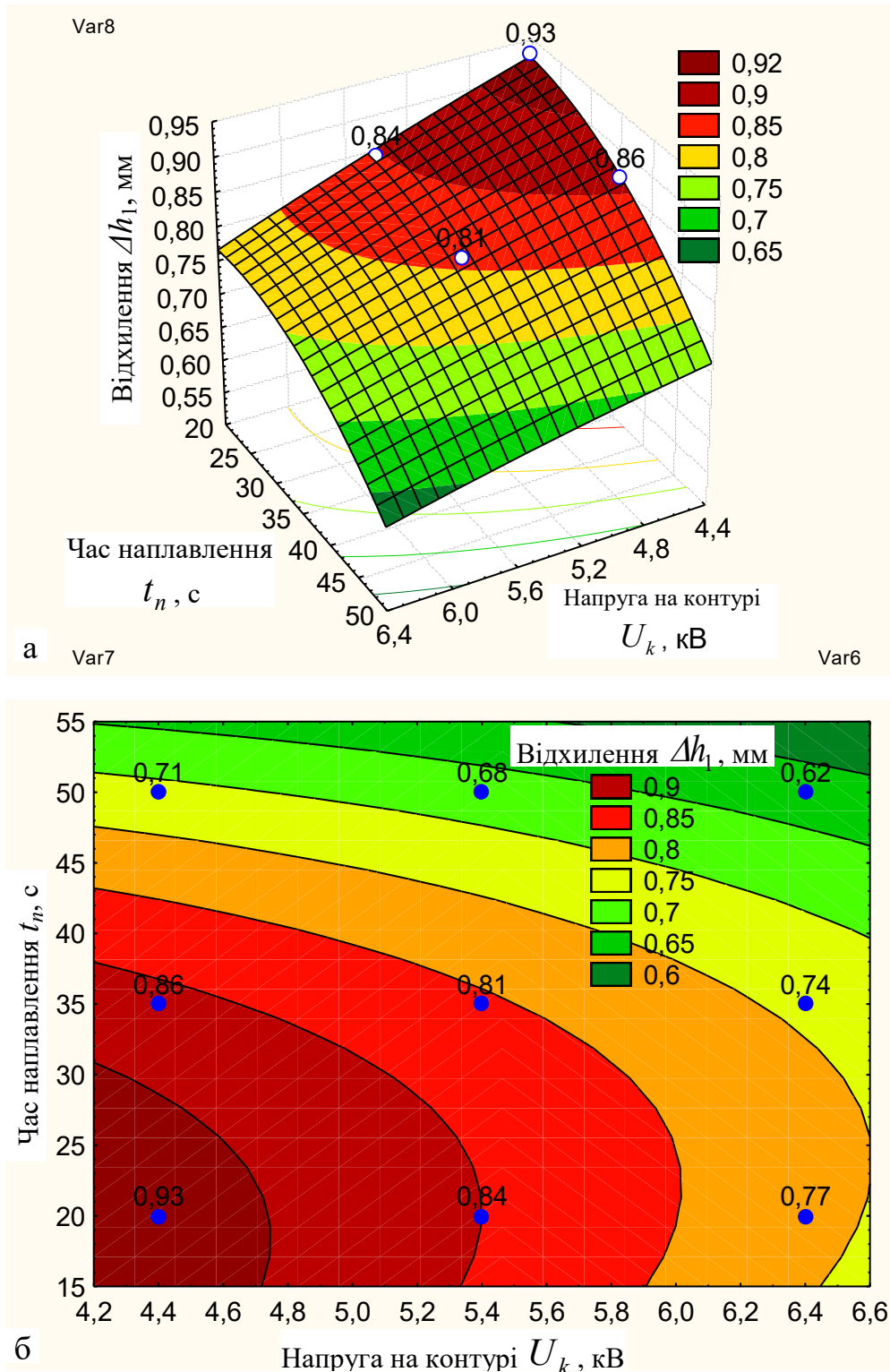


Рисунок 4.17 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу

$$\text{як функція } \Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k, t_n)$$

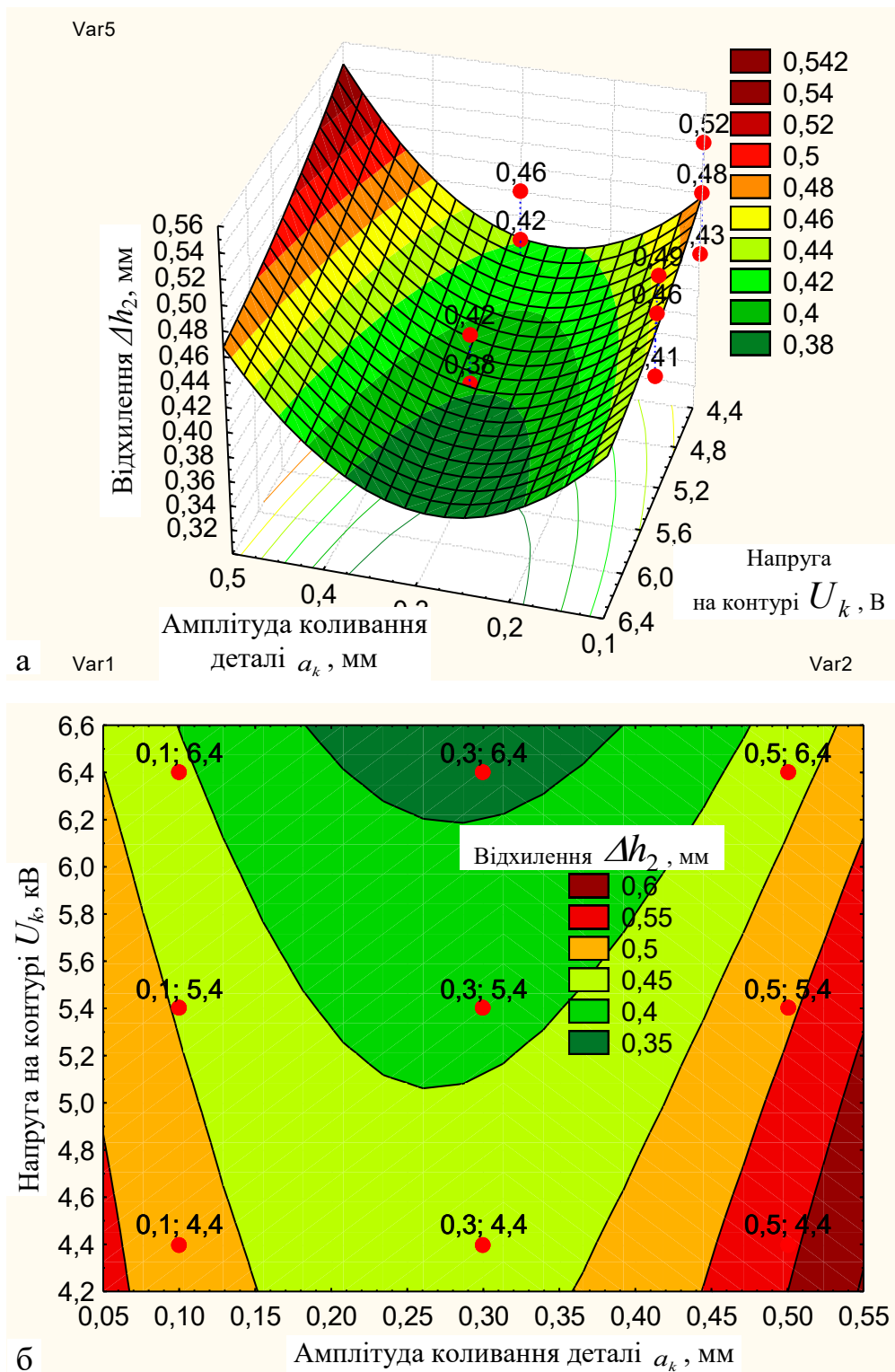


Рисунок 4.18 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу

$$\text{як функція } \Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; U_k)$$

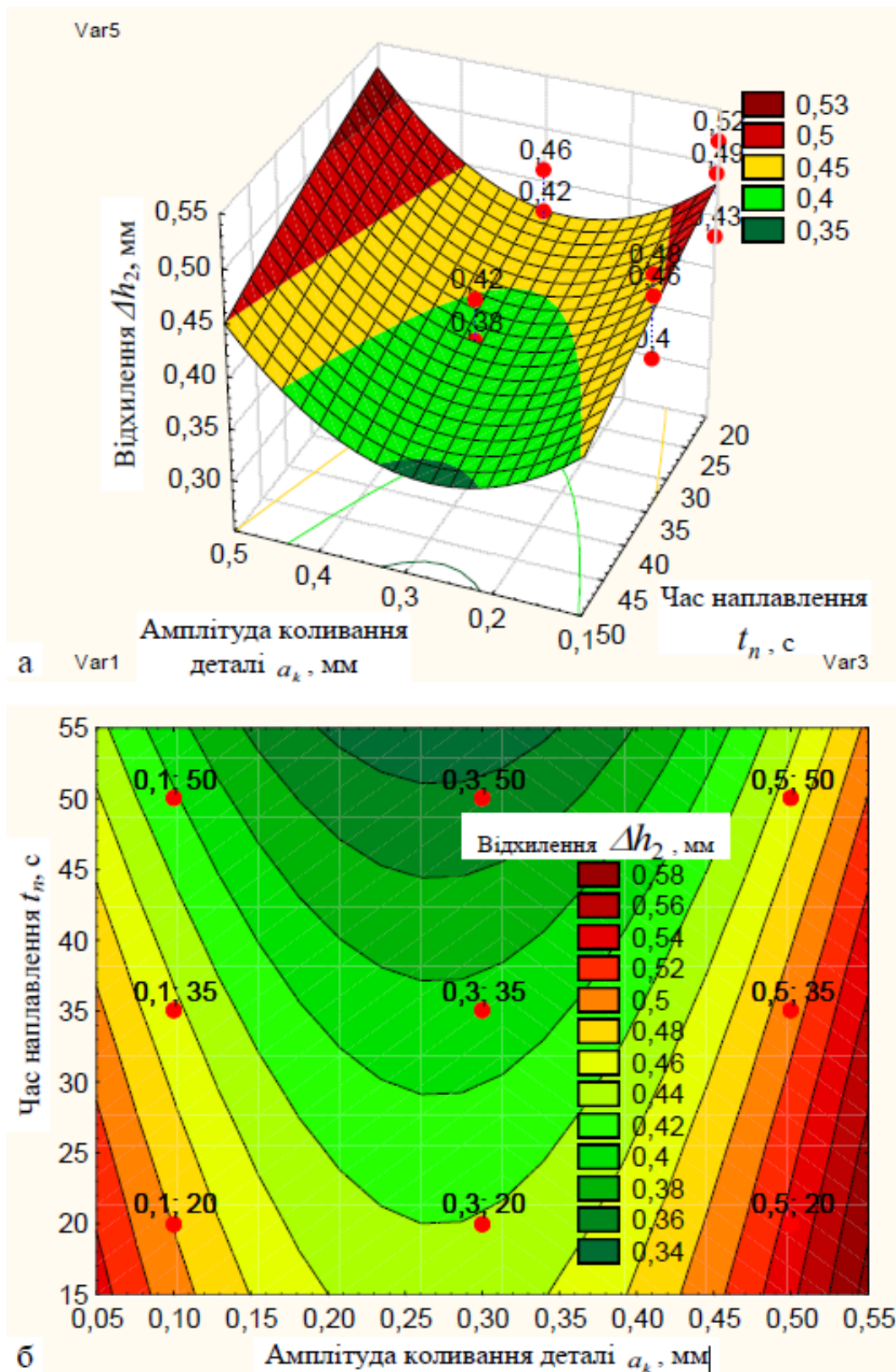


Рисунок 4.19 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу

$$\text{як функція } \Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(a_k; t_n)$$

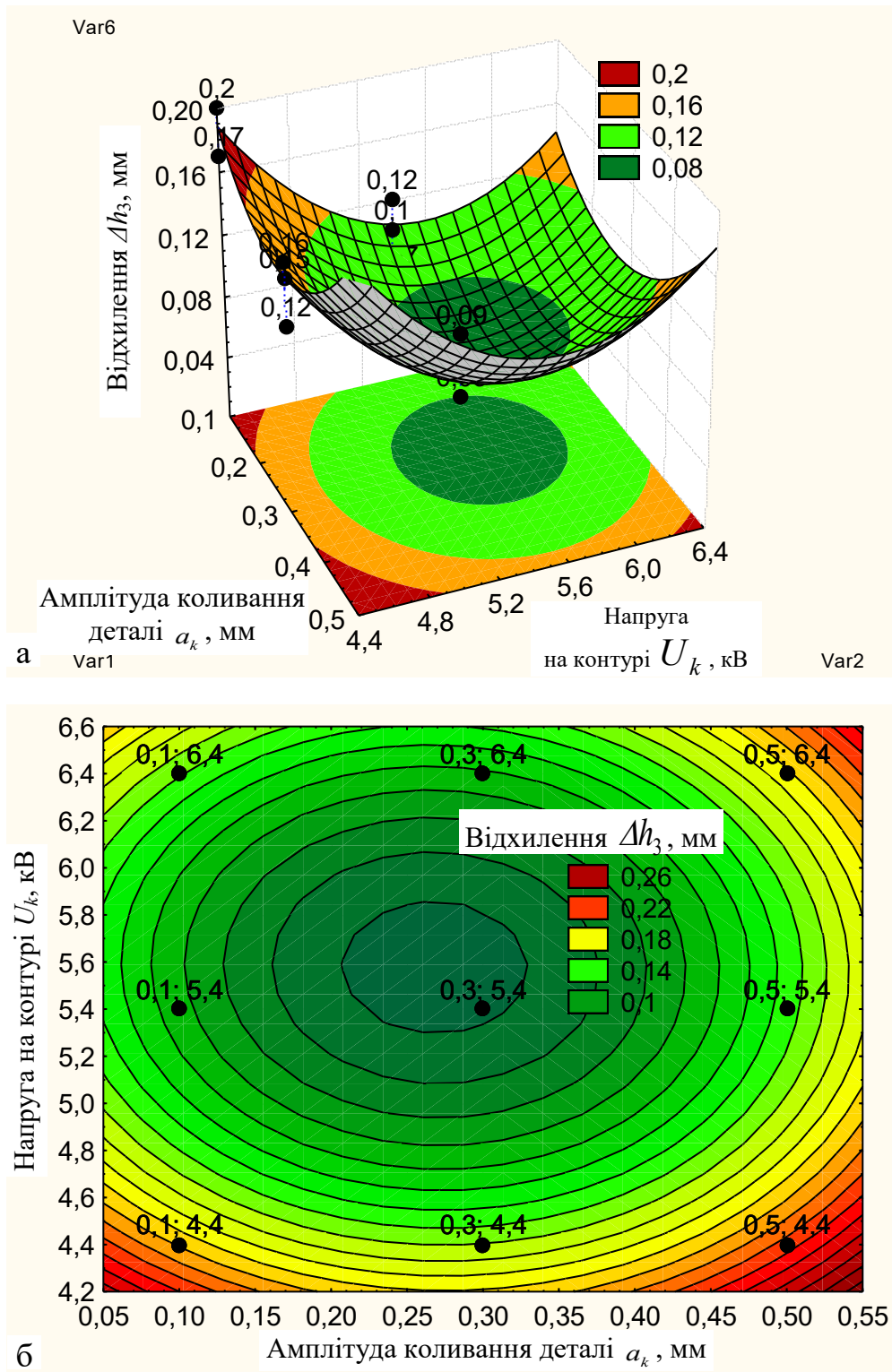


Рисунок 4.20 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу

$$\text{як функція } \Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; U_k)$$

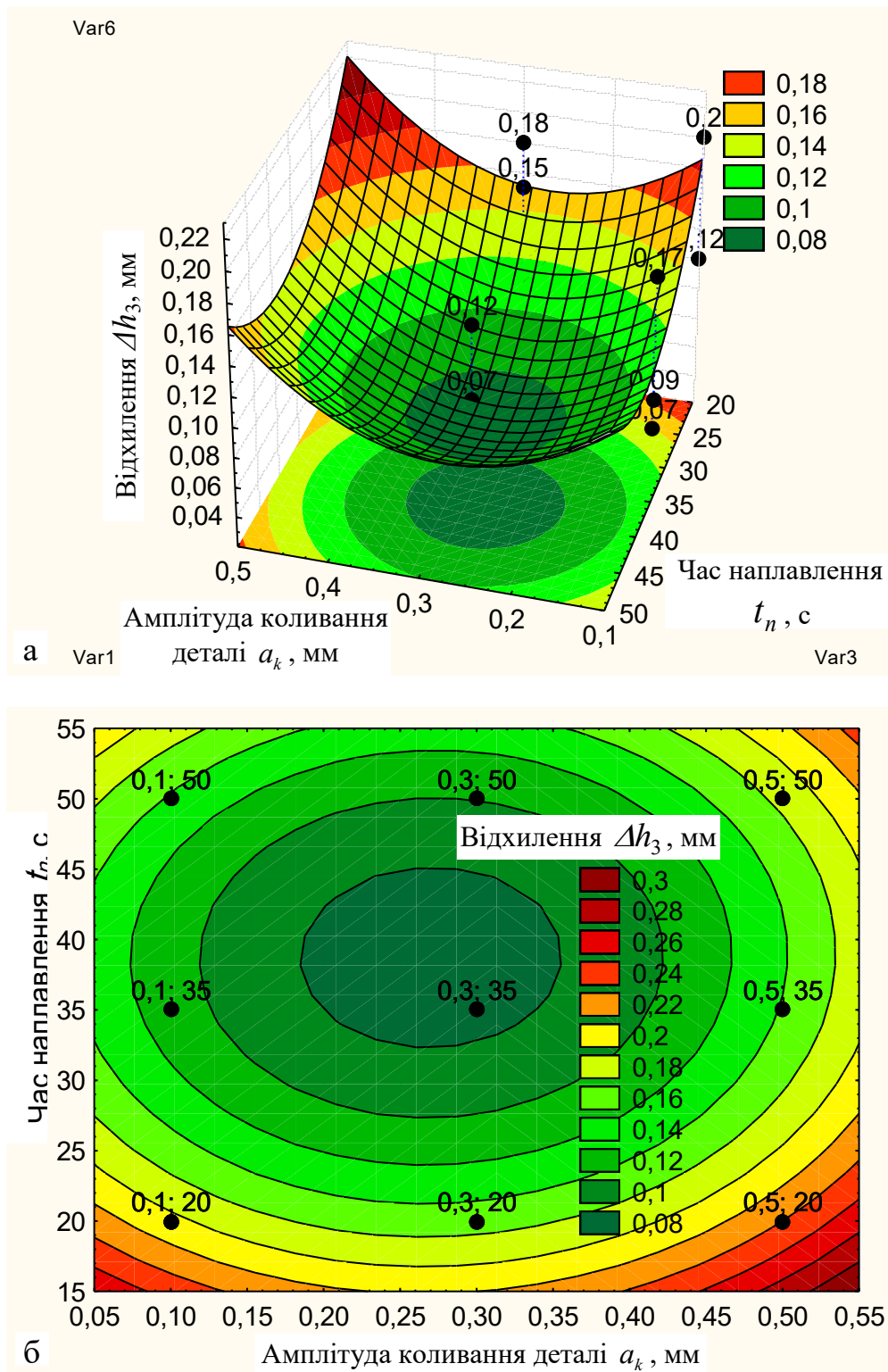


Рисунок 4.21 – Поверхня відгуку (а) та двовірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу

$$\text{як функція } \Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k; t_n)$$

Справедливість наведеної констатації також характерна графічним побудовам, які наведено на рис. 4.22, рис. 4.23.

Тобто, спосіб індукційного наплавлення металу з застосуванням горизонтальної вібрації є найбільш раціональним для відновлення зношених робочих поверхонь тонких деталей.

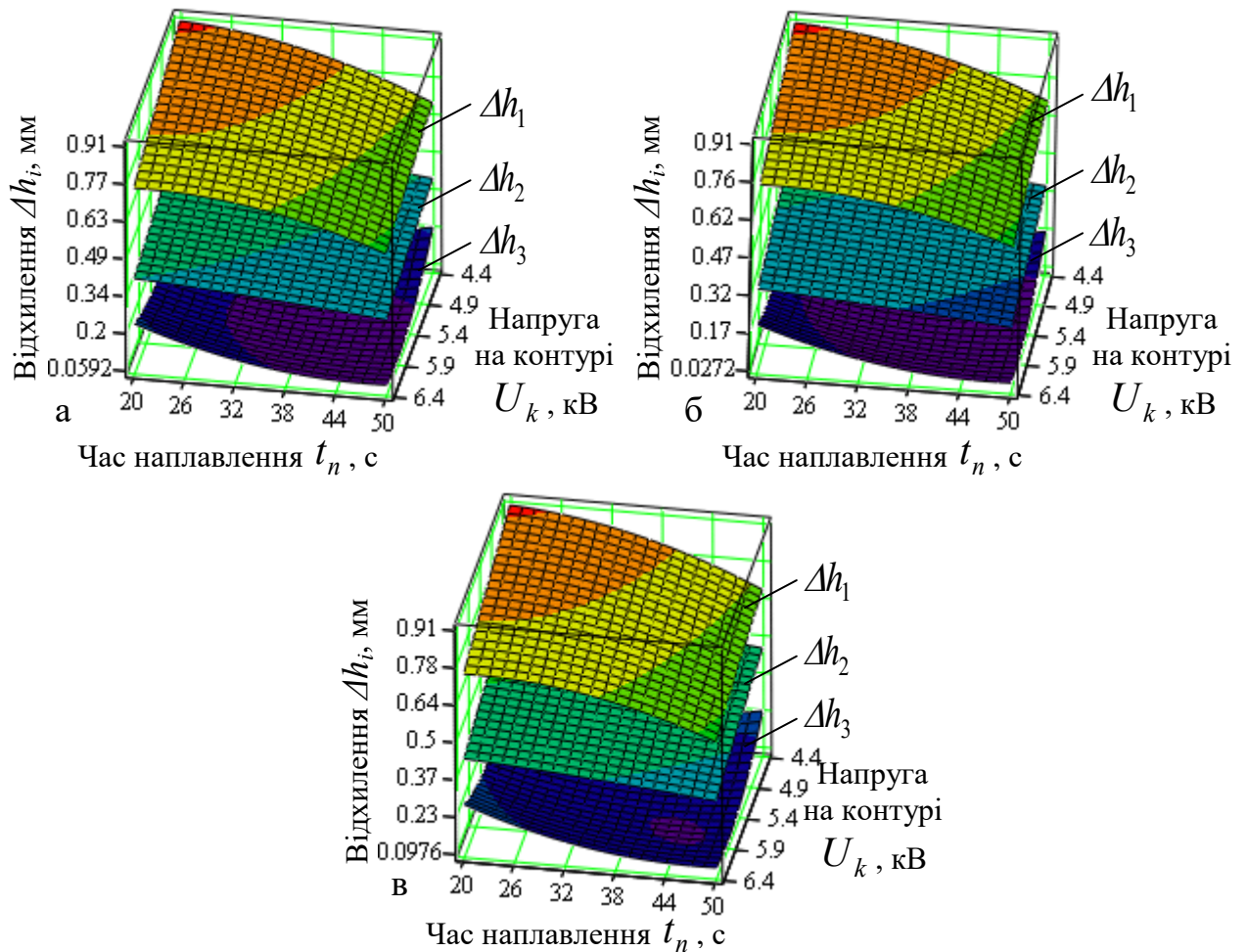


Рисунок 4.22 – Залежність функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу як функція $\Delta h_i = f_{\Delta h_i}(U_k; t_n)$:

а, б, в – амплітуда коливання деталі, відповідно, $a_k = 0,1; 0,3; 0,5$ (мм)

Тому, обґрунтування параметрів індукційного способу наплавлення металу на робочу поверхню деталей проведемо для способу наплавлення з застосуванням горизонтальної вібрації, яка прикладається до деталі.

Характер зміни відхилення товщини наплавленого шару металу Δh_3 з застосуванням горизонтальної вібрації залежно від дії окремих факторів відбувається по-різному.

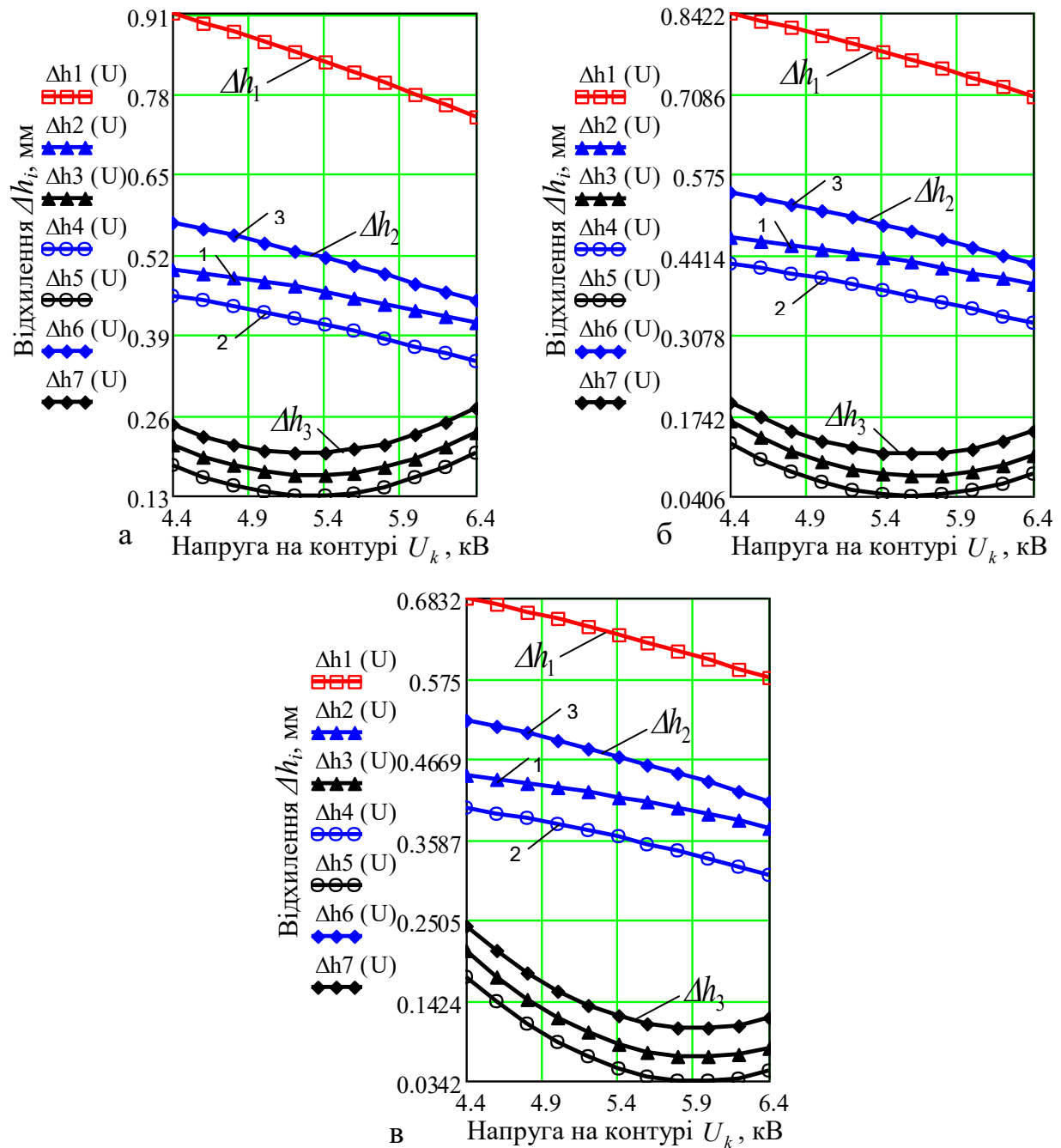


Рисунок 4.23 – Залежність функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу як функція $\Delta h_i = f_{\Delta h_i}(U_k)$:

а, б, в – відповідно, час наплавлення деталі $t_n = 20; 35; 50$ (с);

1, 2, 3 – відповідно, амплітуда коливання деталі $a_k = 0,1; 0,3; 0,5$ (мм)

При збільшенні амплітуди коливання деталі a_k від 0,1 мм до 0,25 мм відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм зменшується від 0,23 мм до мінімального

значення $\Delta h_{3min} = 0,04$ мм, тобто зменшення Δh_3 становить 0,19 мм. Подальше збільшення A_k від 0,25 мм до 0,5 мм призводить до збільшення відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм від мінімального значення $\Delta h_{3min} = 0,04$ мм до максимального значення $\Delta h_{3max} = 0,27$ мм, рис. 4.24а.

Аналогічний характер зміни відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі спостерігається від зміни двох інших факторів – напруги на контурі U_k та часу наплавлення деталі t_n . При збільшенні напруги на контурі U_k від 4,4 кВ до 5,8 кВ відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм зменшується від 0,25 мм до мінімального значення $\Delta h_{3min} = 0,03$ мм, тобто зменшення Δh_3 становить 0,22 мм. Подальше збільшення U_k від 5,8 кВ до 6,4 кВ призводить до збільшення відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм від мінімального значення $\Delta h_{3min} = 0,03$ мм до максимального значення $\Delta h_{3max} = 0,33$ мм, рис. 4.24б. При збільшенні часу наплавлення деталі t_n від 20 с до 40 с відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм зменшується від максимального значення $\Delta h_{3max} = 0,27$ мм до мінімального значення $\Delta h_{3min} = 0,04$ мм, тобто зменшення Δh_3 становить 0,23 мм. Подальше збільшення t_n від 40 с до 50 с призводить до збільшення відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм від мінімального значення $\Delta h_{3min} = 0,04$ мм до значення $\Delta h_3 = 0,24$ мм, рис. 4.24в. Таку поведінку характеру зміни відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3 на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм (спочатку

зменшення Δh_3 , а у подальшому – збільшення Δh_3) залежно від збільшення вхідних факторів можна обґрунтувати наступним чином.

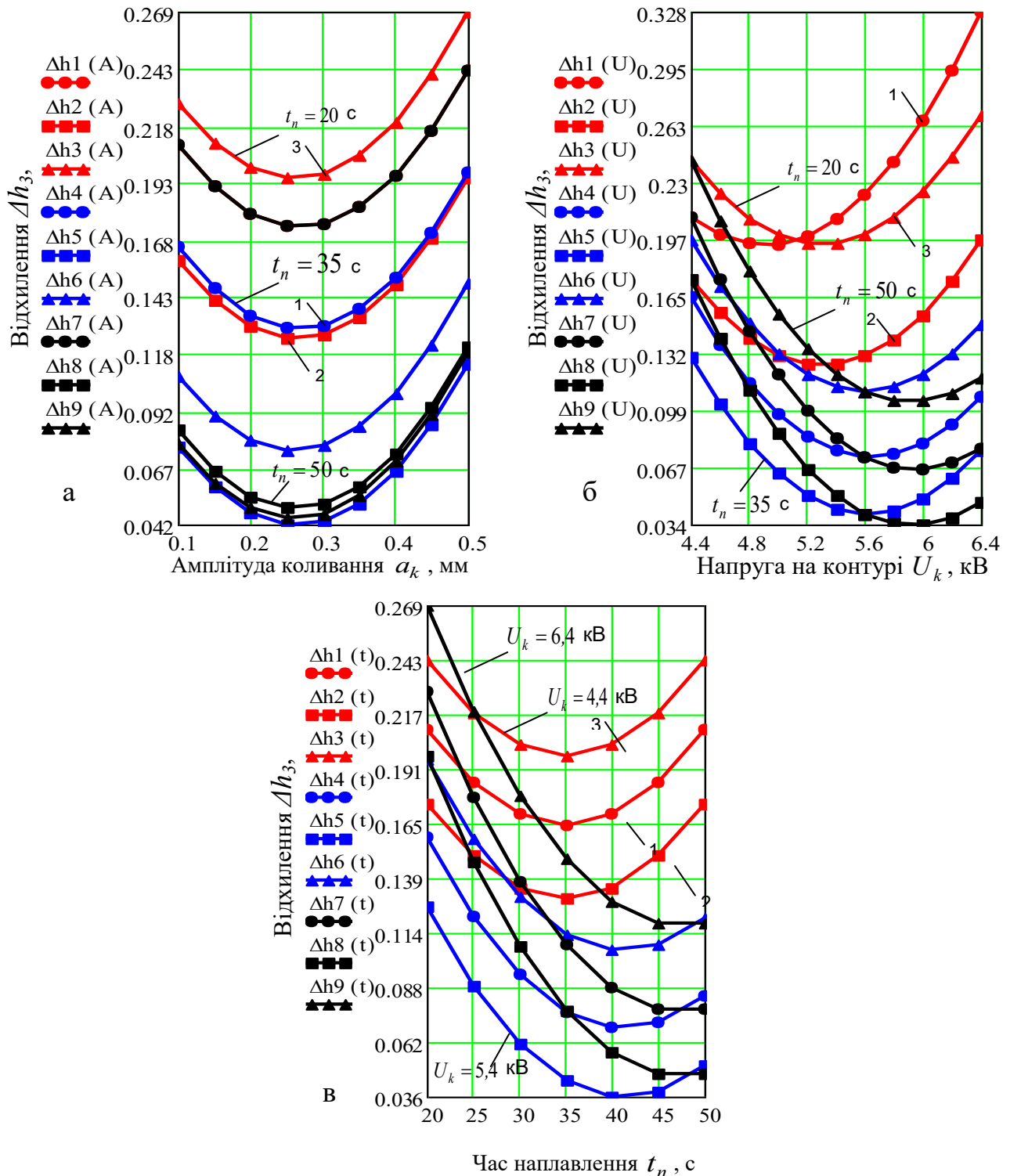


Рисунок 4.24 – Залежність функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу як функція: а, б, в – відповідно, $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(a_k)$,

1, 2, 3 – напруга на контурі, відповідно, $U_k = 4,4; 5,4; 6,4$ (кВ); $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(U_k)$,
 $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(t_n)$, 1, 2, 3 – амплітуда коливання, відповідно, $a_k = 0,1; 0,3; 0,5$ (мм)

Зменшення відхилення Δh_3 при зменшенні факторів виникає внаслідок не повного розплавлення порошкоподібного твердого сплаву, а збільшення відхилення при збільшенні факторів - внаслідок витікання та видудання розплавленого сплаву із зони наплавлення. Це пояснюється тим, що при індукційному напавленні із застосуванням горизонтальної вібрації необхідним є підбір оптимальних величин амплітуди коливань, напруги на контурі та часу наплавлення.

Таким чином, на основі проведеного аналізу характеру зміни мінімального відхилення товщини шару напавленого металу $\Delta h_{3min} = 0,03 \dots 0,04$ мм на робочу поверхню деталі від раціонального значення $h = 1$ мм згідно з графічними побудовами (рис. 4.20, рис. 4.21, рис. 2.Г.7.1 додатка Г.7.1, рис. 4.24) можна констатувати, що раціональні значення параметрів індукційного способу напавлення сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт) із застосуванням горизонтальної вібрації будуть: амплітуда коливання деталі $a_k = 0,2 \dots 0,35$ мм; $U_k = 5,3 \dots 5,8$ кВ; $t_n = 30 \dots 40$ с.

4.3. Висновки до розділу 4

1. Обґрунтовано доцільність застосування механічної вібрації амплітудою коливань 0,2 мм та частотою 50 Гц при індукційному напавленні тонких деталей. Застосування механічної вібрації в процесі напавлення дозволяє досягти дрібнозернистої структури та рівномірного розподілу карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$, за рахунок чого підвищується відносна зносостійкість напавленого металу в 1,5 рази і відповідно твердість з 3200 МПа до 5400 МПа. Однак найбільш ефективним з проведених досліджень є застосування горизонтальної вібрації в процесі напавлення, застосування вертикальної вібрації є затруднене, оскільки в процесі напавлення деталь розміщена між витками індуктора на відстані 5-10 мм, і в процесі напавлення

відбувається видування рідкого сплаву із зони наплавлення електромагнітним полем індуктора.

2. Показано, що при введені в процес наплавлення додаткових технологічних операцій, а саме горизонтальної вібрації можна досягти значного підвищення експлуатаційних властивостей наплавленого металу та деталей в цілому.

3. Встановлено, що застосування горизонтальної вібрації дозволяє підвищити рівномірність товщини шару наплавленого металу у 3,5...7,5 рази в порівнянні із наплавленням за традиційною технологією.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ

Одним з основних шляхів підвищення техніко-економічних показників процесу наплавлення тонких деталей, поряд з вдосконаленням технології і підвищення якості наплавлюваного металу, є створення високопродуктивного для наплавлення обладнання, яке має високу ступінь надійності і здатного працювати в автоматичних лініях виробництва. При створенні обладнання для наплавлення цих деталей вирішувались задачі конструкторських розробок окремих вузлів, механізмів, установок для наплавлення, а потім уже наплавлювальних роботизованих комплексів (автоматичних, потокових ліній) з автоматичним завантаженням і розвантаженням деталей, переміщенням їх по технологічних позиціях для засипання шихти, наплавлення і т.д. [148-153, 155-158].

5.1 Вібраційна потокова лінія для індукційного наплавлення

У теперішній час для відновлення робочих органів сільськогосподарської техніки широко застосовують нові методи індукційного наплавлення робочих поверхонь порошкоподібними твердими сплавами, які характеризуються задовільними стійкими властивостями і значно підвищують ресурс та надійність роботи механізмів, робочі органи яких працюють в агресивних середовищах [148, 2].

В залежності від потреб технологій виготовлення і номенклатури відновлювальних деталей цей процес постійно вдосконалюється у напрямку розробки інтенсивних способів індукційного наплавлення із застосуванням додаткових операцій, які дозволять підвищити технологічно-експлуатаційні показники роботи виготовлених і відновлених робочих органів.

Для наплавлення ножів-гичкорізів дискових викопувальних робочих

органів машин для збирання коренеплодів і т.д., розроблено лінію для послідовно-неперервного способу їх відновлення, що в повному аспекті забезпечило механізацію всіх процесів наплавлення тонких фасонних дисків [148, 155, 158].

Проте існуючої лінії мають ряд суттєвих недоліків, основними з яких є: порівняно низька продуктивність процесу наплавлення порошкоподібних сплавів; велика енергоємність, яка пов'язана з режимами наплавлення, а також переміщенням значних мас горизонтально-рухомої платформи з устаткуванням до індуктора; короблення деталей, для усунення якої необхідна додаткова операція рихтування.

З метою ліквідації вищезгаданих недоліків була модернізована існуюча лінія послідовно-неперервного способу для одночасного індукційного наплавлення тонких фасонних дисків по всій робочій поверхні з використанням двовиткового кільцевого індуктора [157], яка підвищує продуктивність процесу наплавлення в 4-5 рази. Водночас за значенням енергозатрат було обґрунтовано раціональний режим наплавлення робочих поверхонь, який змінюється за експоненціальним законом [65] і дозволяє зменшити затрати електроенергії на 15...25% залежно від застосованих матеріалів для наплавлення та способів одночасного індукційного наплавлення [156].

Для вдосконалення процесу нами запропонована нова технологія індукційного наплавлення тонких деталей із прикладанням горизонтальної механічної вібрації під час процесу наплавлення. Застосування вібрації у процесі наплавлення призводить до подрібнення структури наплавленого шару металу, що підвищує його зносостійкість в 1,5 рази порівняно з традиційним методом [97].

На основі результатів досліджень нової технології було встановлено її переваги застосування горизонтальної вібрації перед вертикальною [151], водночас було вдосконалено існуючу автоматичну лінію, яка б забезпечила надання додаткової технологічної операції під час процесу індукційного наплавлення матеріалів у вигляді горизонтальної механічної вібрації.

Автоматична потокова лінія для наплавлення тонких дисків складається із встановлених на основній рамі 1 (рис. 5.1, рис. 5.2) наступних складових одиниць: механізм завантаження-розвантаження дисків 2; механізм засипання і повернення шихти 3; механізму переміщення дисків 4; механізму горизонтальних коливань 5; механізму поштучного видавання 6, що має змінну касету 7 із тонкими дисками 8; механізму приймання готових дисків 9, що має пусту змінну касету 10; високочастотного генератора 11; пристрою 12 для під'єднання клем високочастотного генератора 11; двовиткових кільцевих індукторів 13.

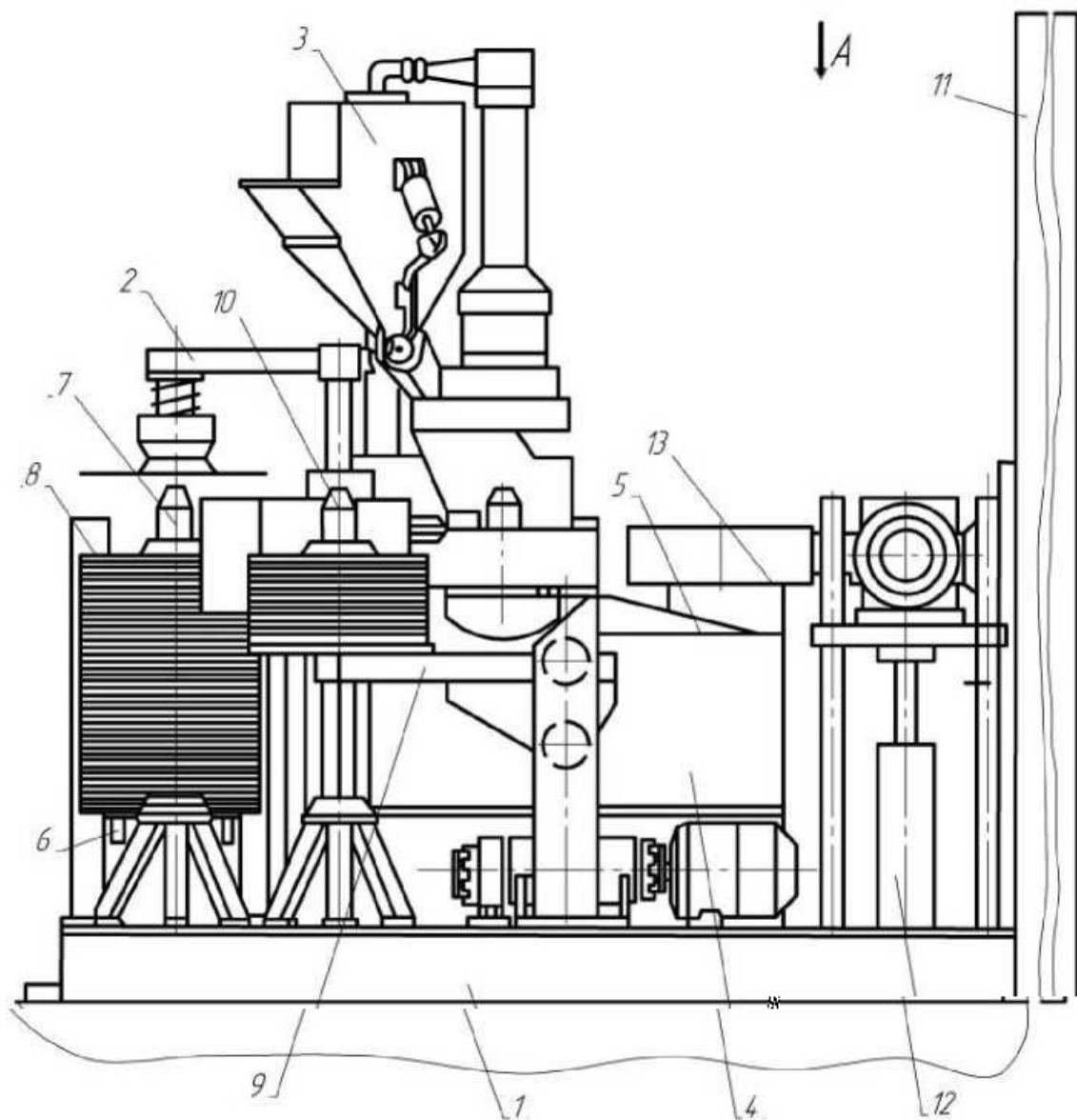


Рис. 5.1. Схема автоматичної лінії для індукційного наплавлення тонких сталевих дисків (вигляд спереду) [151]

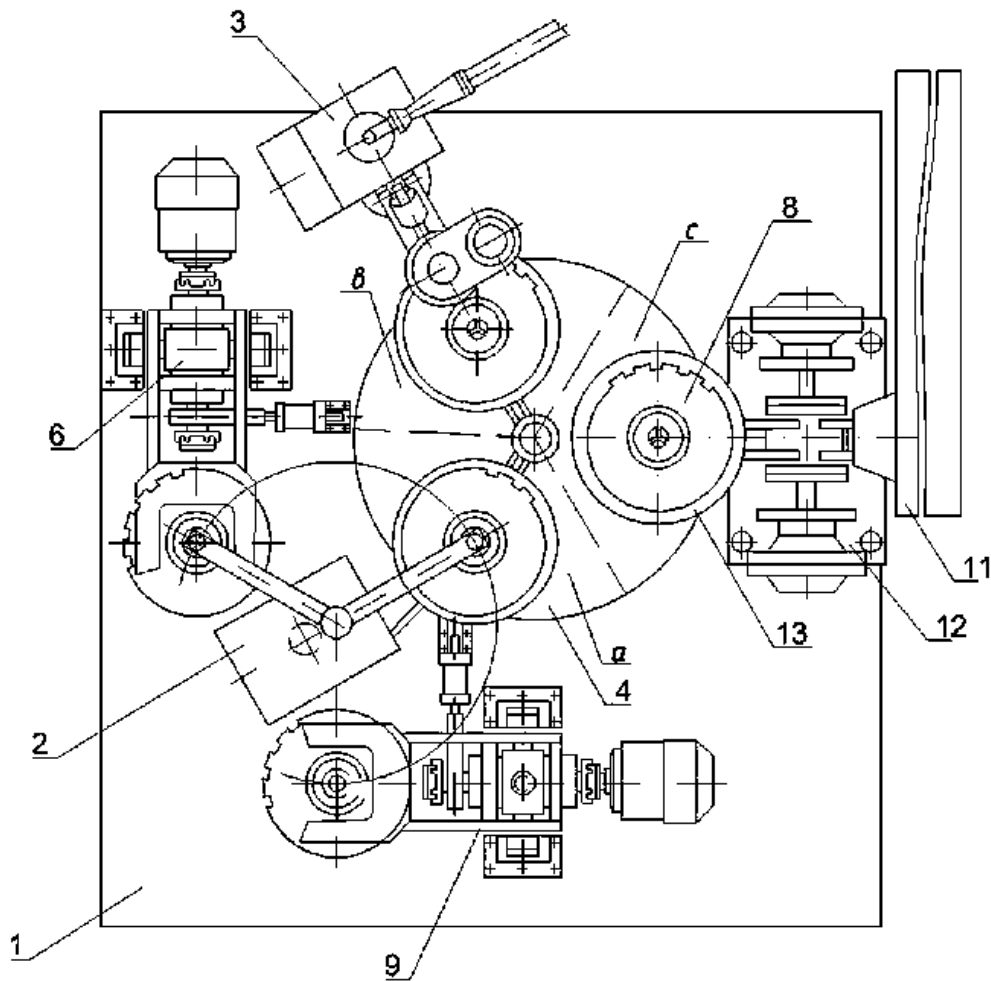


Рис. 5.2. Схема автоматичної лінії для індукційного наплавлення тонких сталевих дисків (вигляд зверху) [151]

Механізм завантаження-розвантаження дисків складається із коромисла 14 (рис. 5.3), на кінцях якого розміщено електромагніти 15 із трапецієподібним заглибленням, що дозволяє виконувати зручне встановлення та знімання дисків 8, силового циліндра 16, електродвигуна 17, черв'ячного редуктора 18. Механізм завантаження-розвантаження дисків за допомогою силового циліндра може переміщуватися вертикально або повертатися за рахунок наявності електродвигуна та черв'ячного редуктора, на вихідному валу якого встановлено шестерню 19 і електромагнітну муфту 20. Шестерня, яка вільно обертається взаємодіє із шестернею 21 вала 22 коромисла.

Механізм переміщення дисків виконано у вигляді обертового стола 23 (рис. 5.4) із трьома поворотними планшайбами 24 для базування дисків і

вмонтованими в столі двовитковими кільцевими індукторами 24, кількість яких дорівнює кількості поворотних планшайб. Він умовно розділений на три позиції (рис. 5.2): *a* - завантаження-розвантаження дисків; *b* - засипання шихти; *c* - наплавлення матеріалу.

Обертвий стіл складається із приводного двигуна 26, редуктора 27, на вихідному валу якого закріплено шестерню 29 та муфту 30, за допомогою яких проводиться цикл повороту стола з позиції на позицію. Рух від редуктора зубчасту пару 29, 25, муфту 33 та зачеплення 31, 33 передається валу 40, який знаходиться у корпусі механізму горизонтальних коливань 36. Корпус підпружинений пружинами 42 встановлений у столі на опорах кочення 37 та гнучких ланок 38, що забезпечує можливість його переміщення у горизонтальній площині по напрямних 39. Зазор між столом та корпусом 36 становить 8 мм. У корпусі встановлено шпindel з тризубим фіксатором 41 і електромагніт 43.

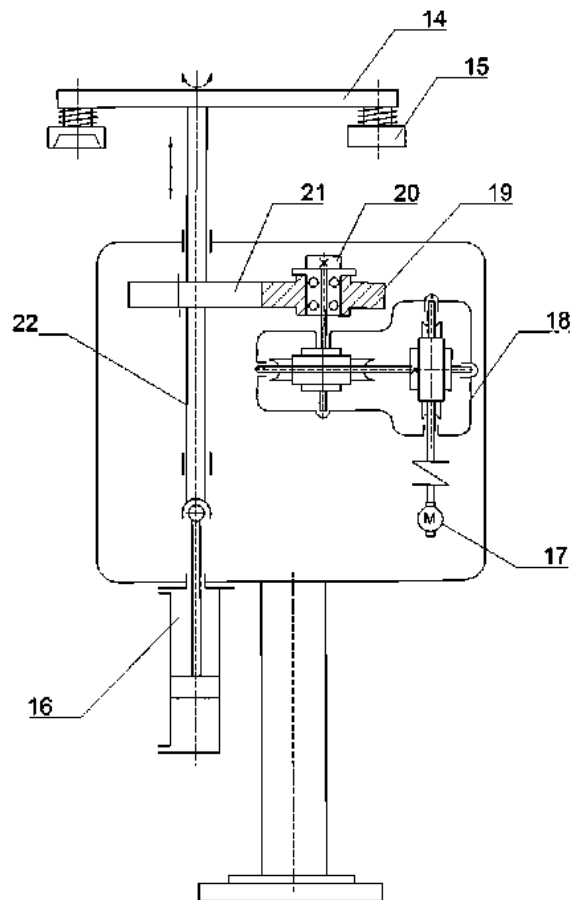


Рис.5.3. Кінематична схема механізму завантаження та розвантаження дисків [151]

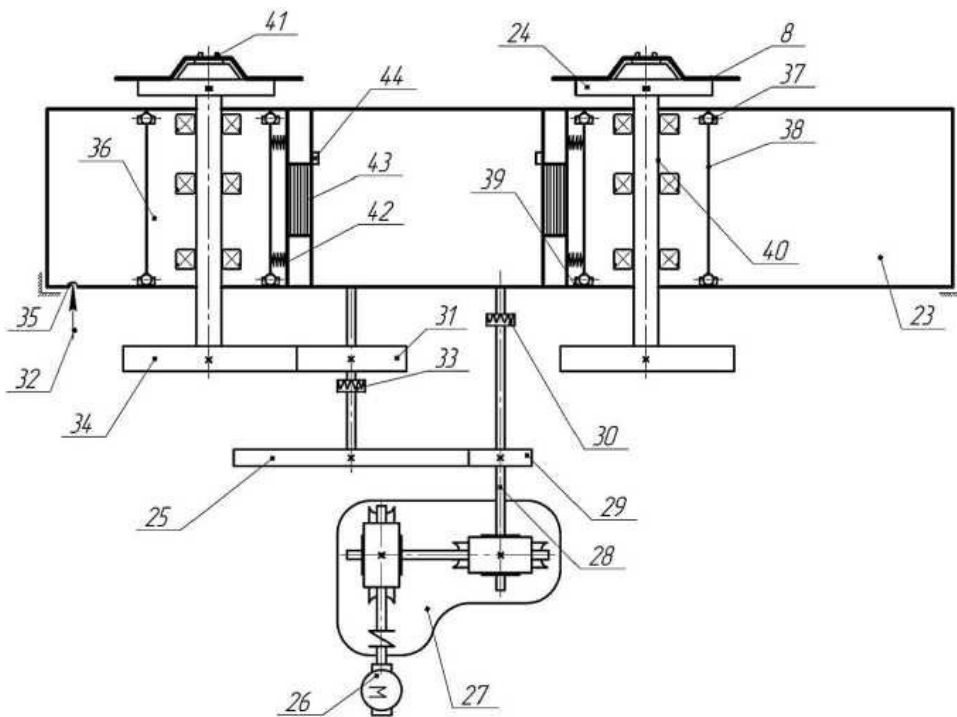


Рис. 5.4. Кінематична схема механізму переміщення дисків та механізму горизонтальних механічних коливань [151]

Пристрій 12 (рис. 5.1, рис. 5.2) для під'єднання клем високочастотного генератора 11 до індукторів 13 встановлено на основі 1 між обертовим столом 23 та високочастотним генератором 11. Водночас витки кожного кільцевого індуктора 13 розташовано співвісно осі обертання поворотної планшайби 24 (рис. 5.4) та по обидві сторони її базової площини.

Принцип роботи лінія для наплавлення дисків наступний.

На автоматичну лінію подається змінна касета 7 з дисками 8 і пуста змінна касета 10, встановлених, відповідно, у механізм поштучного видавання 6 та механізм приймання дисків 9.

За допомогою силового циліндра 16 (рис. 5.3) виконується переміщення коромисла 14 вверх-вниз разом з електромагнітами 15, які захоплюють диски 8 та доставляють їх на позицію *a* завантаження-розвантаження та знімання готових дисків. Стіл 23 повертають за допомогою обертаючого механізму 4 (рис. 5.2), при цьому відбувається подача диска на позицію засипання шихти 3, де диск із шихтою направляється на позицію наплавлення *c*, а після виконання наплавлення відновлений диск поступає на позицію завантаження-

розвантаження *a*, де відбувається його знімання.

В механізмі засипання і повернення шихти 3, диск притискається до шпинделя 24 та фіксується тризубим фіксатором 41 з метою запобігання можливості його повороту відносно шпинделя під час засипання шихти.

З метою підвищення зносостійкості наплавленого шару металу використовують горизонтальну вібрацію, яка здійснюється електромагнітом 43 на позиції наплавлення *c* без загального коливання обертаючого стола 23.

На позиції засипання шихти *b* шпиндель 40 з шестернею 34 з'єднаний з електроприводом 26. Потім обертаючий стіл 23 повертається на 120° на позицію наплавлення *c*, при цьому шпиндель із шестернею 34 від'єднуються від шестерні 31, що з'єднана з електроприводом 26. На позиції наплавлення *c* включається високочастотний генератор 11 та подається струм на індуктор 13, де відбувається нагрівання диска 8. Коли температура порошкоподібного сплаву досягає температури його плавлення, включається електромагніт 43 і здійснюється коливання диска 8 в горизонтальному напрямку. Датчик 44 включає часового реле, яке встановлює час роботи електромагнітного приводу коливання заготовки в процесі наплавлення. Електромагніт 43 вимикається після наплавлення диска 8 з витримкою в часі 10 с.

Диск 8 поступає на позицію завантаження-розвантаження *a*, після чого готовий наплавлений диск 8 знімається, а новий подається на обертаючий стіл 23 і так цикл роботи автоматичної потокової лінії повторюється заново.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено нове наукове завдання підвищення експлуатаційних властивостей та стабільності товщини наплавленого шару металу на робочі поверхні деталей шляхом розроблення та обґрунтування параметрів в процесі індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації.

1. На основі аналізу розробленої розрахунково-математичної моделі, яка описує вплив параметрів індукційного наплавлення з застосуванням механічної вібрації на структуру наплавленого металу встановлено, що оптимальні розміри структурних складових наплавленого металу досягаються за амплітуди та частоти механічних коливань 0,2 мм та 50 Гц відповідно.

2. Застосування механічної вібрації в процесі наплавлення порошкоподібним твердим сплавом типу ПГ-С1 (Сормайт1) на сталь Ст3 призводить до зміни розмірів структурних складових карбідів типу $(Fe, Cr)_7C_3$ і $(Fe, Cr)_3C$ та рівномірного розподілу вмісту хрому по товщині наплавленого шару металу, при цьому структурні складові подрібнюються з 10...12 мкм без вібрації до 7...10 мкм при вертикальній та до 3,5...7 мкм при горизонтальній вібрації.

3. Показано, що механічна вібрація в процесі наплавлення із застосуванням порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1 (Сормайт 1) дозволяє підвищити зносостійкість наплавленого шару металу з 2,2 без вібрації до 3,1 та 3,4 при вертикальній і горизонтальній вібрації та твердість наплавленого шару металу з 3500 МПа до 4800 МПа та 5400 МПа відповідно.

4. На основі аналізу гістограм і полігонів щільності розподілу випадковості процесу функціональної зміни товщини відхилення наплавленого шару металу на робочу поверхню деталі встановлено, що відхилення товщини шару наплавленого металу знаходиться в межах: без вібрації 0,62...0,87 мм з кількістю випадків рівним 27; з вертикальною вібрацією 0,41...0,51 мм з кількістю випадків рівним 57; з горизонтальною вібрацією 0,07...0,11 мм з

кількістю випадків рівним 47.

5. Експериментально встановлено, що при застосуванні горизонтальної вібрації відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню деталі від її раціонального значення рівного 1 мм знаходиться у допустимих межах від 0,03 мм до 0,04 мм за зміни амплітуди коливань 0,2...0,35 мм, напруги на контурі високочастотного генератора 5,3...5,8 кВ і часу наплавлення 30...40с.

6. За результатами аналітично-емпіричних досліджень встановлено раціональні параметри індукційного наплавлення з застосуванням механічної горизонтальної вібрації: амплітуда коливання 0,2...0,35 мм; середня напруга наплавлення 5,5 кВ; середній час наплавлення 35 с.

7. Розроблено трипозиційну роторну лінію для індукційного наплавлення сталевих дисків на базі технологічного процесу з використанням механічної вібрації, які захищені 4 патентами на корисні моделі України.

8. Результати роботи впроваджені на підприємствах ПП «Чіп» (Волинська обл., м. Володимир-Волинський) та KZESO ПрАТ «Каховський завод електрозварювального устаткування» (Херсонська обл., м. Каховка), а також в навчальному процесі при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю «Зварювання» та «Прикладна механіка».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сенчишин В.С. Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор) / Сенчишин В.С., Пулька Ч.В. // Автомат. сварка №9. - 2012. - С. 48-54.
2. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. - М.:Машиностроение, 1971. - 264 с.
3. Боль А. А., Лесков С. П. Индукционная наплавка деталей в сельскохозяйственном машиностроении // Наплавка. Опыт и эффективность применения. - Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. - С. 72-75.
4. Вишневецкий А.А., Костылев Ю.А., Остров Д.Д. Технология изготовления наплавленных дисковых ножей. Наплавка деталей металлургического и горного оборудования. - Реф. сб. - М.:НИИИнформтяжмаш, 1978. -С.15-18.
5. Пулька Ч.В. Наплавка рабочих узлов почвообрабатывающей и уборочной сельскохозяйственной техники (Обзор)/ Ч.В. Пулька// Автомат. сварка. – 2003. – №8. – С.36-41.
6. Рабинович А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворезущие детали машин. -М.: ГОСНИТИ, 1962. - 165 с.
7. Николаенко М.Р., Рымов Е.В. Новые технологические процессы электродуговой и электроконтактной наплавки быстроизнашивающихся деталей строительных и дорожных машин. -М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1976.- 157 с.
8. Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. – К.: «Екотехнологія», 2007. – 292 с.
9. Bouaifi B. Plazma-Pulver-Auftragschweibunger zum Verschleibschutz abrasive beanspruchter Bouteil mit Kantenbelastung / Bouaifi B., Gebert A., Heinze H. // Schweißen und Schneiden. – 1993. - № 9. – S. 506-509.
10. Денисенко М. І. Підвищення експлуатаційної надійності деталей робочих органів ґрунтообробних машин [Електронний ресурс] : научне видання /

- М. І. Денисенко, В. Д. Войтюк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". Вип. 166. Ч. 1 : Збірник наукових праць / ред. колегія Д. О. Мельничук. - К. : НУБПУ, 2011. - С. 274-284.
11. Кобець, А. С. Методи і способи підвищення зносостійкості робочих органів культиваторів / А. С. Кобець, А. М. Пугач // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету [Текст] : наук.-теорет., наук.-практ. журн. №1. - 2010. - С .61-63.
 12. Кузнецов Ю.А. Восстановление и упрочнение лемехов плугов металлокерамическими пластинами / Ю.А. Кузнецов, В.В. Гончаренко // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета №2(7). – 2007. С. 122 – 123.
 13. Электроконтактная наплавка дисковых ножей / В. П. Туркин, В. Г. Путилин, М. Р. Николаенко и др. -Автоматическая сварка, 1978. - № 2. - С. 74-76.
 14. Волков Д.А. Удосконалення технології економнолегованого наплавлення зносостійкого сплаву з використанням порошкового дроту: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук / Д.А. Волков. – Краматорськ, 2012. – 21 с.
 15. Контактное плакирование рабочих органов почвообрабатывающих машин / Г.Е. Мамулия, Г.Ф.Муров, В.П. Тюленеев, Г.Д. Диборова - Свароч. пр-во, 1984. - № 2. - С. 37-39.
 16. Плакирование стали взрывом А.С. Гельман, Б.Д. Цемахович, А.Д. Чудповский и др. - М.:Машиностроение, 1978. - 191 с.
 17. Рябцев И.А. Биметаллический прокат с плакирующим слоем из гранулированного порошка ПГ-С1 //Современные методы наплавки и наплавочные материалы: Тез. докл. III Республ. науч.-техн. конф. -Харьков, 1981. -С. 9-10.
 18. Кальнер В.Д., Горюшина М.Н. ,Сичужникова А.А. Процессы взаимодействия на границе разделабиметаллической заготовки,

- полученной методом прокатки неспеченного порошка. -Металловедение и терм. обраб. металлов, 1984. - № 3. - С. 28-29.
19. Перспективы применения компактных материалов в биметаллических деталях рабочих органов сельхозмашин, Б. Н. Федоров, В. А. Осадчий, М. Ю. Тиц и др. - Тракторы и сельхозмашины, 1975. -.№ 9. - С. 39-41.
 20. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. – К.: «Екотехнологія», 2004. – 160 с.
 21. Переплетчиков Е.Ф. Высокованадиевые сплавы для плазменно-порошковой наплавки инструментов / Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев, Г.М. Гордань // Автомат. сварка. – 2003. – №3. – С. 21-25.
 22. Е. Ф. Переплетчиков. Плазменная наплавка// Ремонт, восстановление, модернизация . – 2005.– №12.– с. 35.
 23. Денисенко М. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин / Денисенко М., Опальчук А. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Спецвипуск — частина 2. — С.201-210.
 24. Кобець, А. С. Польові дослідження спрацювання культиваторних лап з локальним зміцненням / А. С. Кобець, О.М. Кобець, А. М. Пугач // Вісник ХНТУ ім. П. Василенка Випуск №107 [Текст] : «механізація сільськогосподарського виробництва», Том1, Харків 2011. - С .208-213.
 25. Михальченков А.М. Повышение износостойкости плужных лемехов нанесением упрочняющих валиков в области наибольшего износа [Текст] / А.М. Михальченков, А.А. Тюрева, М.А. Михальченкова // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2007. - №9. - С. 17-19.
 26. Василенко М.О. Перспективи застосування локального зміцнення при виготовленні та відновленні робочих органів // Техніка АПК Випуск 1, 2008. – С.29-31.
 27. Киргизов В.Е. Повышение долговечности плужных лемехов при восстановлении наплавкой угольным электродом / Киргизов В.Е., Шишкин Г.М., Балданов К.П., Андреев С.В., Гом П.Э.//

- Научно-практический журнал "Вестник ИрГСХА", 2010, выпуск 38. – С.65-70.
28. Гончаренко В.В. Восстановление и упрочнение режущей кромки лемеха пайкой металлокерамических пластин / В.В. Гончаренко, А.В. Фербяков, Ю.А. Кузнецов [и др.]// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – №11. С.21-22.
 29. Фоминский Л.П. Наплавка рабочих органов сельхозмашин с помощью электронного ускорителя / Л.П. Фоминский, М.В. Левчук, А.Ф. Байсман и др. // Свароч. пр-во. – 1987. – №11. С. 4-6.
 30. Ивашко В.С. Упрочнение быстроизнашивающихся деталей почвообрабатывающей техники /В.С. Ивашко, В.К. Ярошевич, П.Г. Лузан, Г.Н. Мдзинарашвшш, // Свароч. пр.-во 2008г. N 11
 31. Коваленко В.С. Упрочнение деталей лучом лазера / В.С. Коваленко, Г.В. Меркулов, А.И. Стрижак. – К.: Техніка, 1981. – 131с.
 32. Солових Є.К. Аналіз характеру зношування лез ґрунторіжучих деталей та підвищення їх ресурсу лазерними технологіями / Є.К. Солових, В.В. Аулін, В.М. Бобрицький // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – Вип. 35. – С. 153-159.
 33. Пулька Ч.В. Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: 05.03.06 / Пулька Чеслав Вікторович; НТУУ «КПІ». – Київ., 2006. – 37 с.
 34. Шаблій О.М. Основні напрямки індукційного наплавлення робочих органів сільськогосподарських машин / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Король О.І. // Вісник ТДТУ. – 2008. - Том 13. - №4. – С. 100-109.
 35. Шаблій О.М. Розроблення енергоощадних нагрівальних систем для індукційного наплавлення деталей сільськогосподарських машин /Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я. // Вісник ТНТУ. – 2011. - №4. – С. 107-120.

36. Пулька Ч.В. Ресурсозберігаюча технологія індукційного наплавлення деталей сільськогосподарських машин / Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Базар М.С., Сенчишин В.С. // Вісник ХНТУ сільського господарства ім. Петра Василенка, випуск 96. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. Харків 2010. с.46 – 55.
37. Пулька Ч.В. Экспериментальные исследования температурного поля при индукционной наплавке тонких плоских деталей с использованием теплового и электромагнитного экранов / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Базар М.С., Береженко Б.М. // Индукционный нагрев №25. – 2013. – С. 30–33.
38. Шаблій О. Режими індукційного наплавлення деталей із урахуванням використання екранування теплових і електромагнітних полів / О. Шаблій, Ч. Пулька, В. Гаврилюк, В. Сенчишин // Вісник Тернопільського національного технічного університету. - 2014. - № 1. - С. 109-118. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tstub_2014_1_15
39. Пулька Ч.В. Математична модель оптимізації енерговитрат індукційного наплавлення / Ч.В. Пулька, В.М. Барановський, В.С. Сенчишин, В.Я. Гаврилюк, // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2015. - Вип. 226. - С. 386-393. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_226_51
40. Шаблій О.М. Математичне моделювання, оптимізація і конструювання енергоощадних нагрівальних систем для індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Король О.І., Сенчишин В.С. // Тези доповіді VIII Міжнародної наукової конференції « Математичні проблеми механіки неоднорідних структур» 14-17 вересня 2010р.м. Львів. С. 503 – 505.
41. Пулька Ч.В. Дослідження процесу індукційного наплавлення тонких плоских деталей / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні

- задачі сучасних технологій" ТНТУ ім. Івана Пулюя 21-22 грудня 2010 року Тернопіль, Україна. С.9.
42. Біловод О.І. Дудніков А.А. К вопросу износостойкости рабочих органов свеклоуборочных комбайнов./ О.І.Біловод, А.А. Дудніков // Вісник ХДТУСГ ім. П.Василенка: Механізація сільського господарства. Вип. 59, том 1. –Харків. 2007.– С. 288-293.
 43. Дудников И.А. К вопросу влияния вибрационной обработки на деформирование материала обрабатываемых деталей / И.А. Дудников, А.П. Кившик, А.А. Дудников. Зб. наук. праць. Випуск 39. – Кіровоград: 2009. – С.167-169.
 44. Дудник В.В. Оценка структуры упрочненного слоя лезвия лемехов / В.В. Дудник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий //научный журнал. - Харьков: Технологический центр, 2011. - №4/7 (52). – С. 4-6.
 45. Біловод О. І. Підвищення надійності і обґрунтування параметрів процесу виробництва і відновлення розроблених дискових копачів бурякозбиральних машин [Текст]: Дис. канд. техн. наук: 05.05.11 - 2009.
 46. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
 47. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автоматическая сварка, 1975. - № 5(266). - С. 7-10.
 48. Хафизова О.Ф. К влиянию вибрационной обработки на механические свойства разнородных сварных соединений / О.Ф. Хафизова, В.И. Болобов, А.М. Файрушин, А.Ю. Кузькин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2011. – №1. http://www.ogbus.ru/authors/Khafizova/Khafizova_1.pdf.
 49. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на технологическую прочность и механические свойства сварных соединений из стали 11Х11Н2В2МФ/ А.Н. Салмин, А.М. Файрушин, И.Г.

- Ибрагимов // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело", 2010.
http://www.ogbus.ru/authors/Salmin/Salmin_1.pdf.8c.
50. Пулька Ч.В. Застосування вібрацій в зварюванні та споріднених процесах і технологіях / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В. // Збірник тез доповідей XVIII наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 29–30 жовтня 2014. – С. 46–47.
 51. Технологічні пристосування для індукційного наплавлення деталей сільськогосподарських машин / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Король О.І., Сенчишин В.С. // Вісник ТДТУ. — 2010. — Том 15. — № 1. — С. 138-146. — (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
 52. Вологдин В.В. Пайка и наплавка при индукционном нагреве / Вологдин В.В. — Л.: Энергия, 1965. — 92 с.
 53. Лозинский М.Г. Промышленное применение индукционного нагрева / Лозинский М.Г. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 472 с.
 54. Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
 55. Ниловский И.А. Повышение производительности индукционной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин / Ниловский И.А., Суворов В.А., А.Е. Степанец. Рефер. Сб. Сварочное производство. Сер. Технология и автоматизация производственных процессов. — 1973. — Вып.1. — С.24 — 26.
 56. Расчёт индуктора с магнитопроводом для нагрева плоских поверхностей изделий / А.С. Письменный, Е.А. Пантелеймонов, А.С. Прокофьев, Ч.В. Пулька // Автомат.сварка. — 2000. — №11. — С.39 — 43.
 57. Шаблій О.М. Дослідження індукційного наплавлення тонких фасонних дисків з використанням магнітопроводу / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька // Вісник ТДТУ. Том 7. — №4. — 2002. — С. 77— 80.

58. Патент №55349, Україна В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонкостінних фасонних дисків / Ч.В. Пулька, О.М. Шаблій, Б.П. Будзан, В.М. Скочило (Україна); опубліковано 17.03.2003р.Бюл.№3.
59. Патент №55346, Україна В23К 13/00. Пристрій для наплавлення плоских тонкостінних деталей / Ч.В. Пулька, О.М. Шаблій, Б.П. Будзан (Україна); опубліковано 17.03.2003р; Бюл.№3.
60. Шаблій О.Н. Пути экономии электроэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.П. Будзан // Автомат.сварка. — 1988. — №12. — С.56 — 58.
61. Шаблій О.Н. Оптимизация конструктивных параметров индуктора для индукционной наплавки тонких стальных дисков / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, А.С. Письменный // Автомат.сварка. — 1997. — №6. — С.17— 20.
62. Шаблій О.Н. Оптимизация параметров индуктора для равномерного нагрева дисков по ширине зоны наплавки с учетом экранирования / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, А.С. Письменный // Автомат.сварка. — 2002. — №11. — С.24 — 26.
63. Деклараційний патент UA. № 58943 А В23К13/00. Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Михайлишин та ін. — №2002119491; Заявлено 28.11.2002; опубл. 17.11.2003, Бюл. №11.
64. Шаблій О.Н. Оптимизация индукционной наплавки тонких дисков с учётом теплового и электромагнитного экранирования / О.Н. Шаблій, Ч.В. Пулька, А.С. Письменный // Автомат.сварка. — 2003. — №9. — С.22 — 25.
65. Пулька Ч.В. Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.06 / Пулька Чеслав Вікторович. - К., 2006. - 368 с.
66. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Бабат Г.И. - М.: Энергия, 1965. - 552 с.
67. Pulka Ch.V. Improving induction surfacing equipment and technology / Pulka

- Ch.V., Gavrilyuk V.Ya., Senchishin V.S. // Welding International, Vol. 28. No 4., 2014. – P. 320-323. (Scopus).
68. RU 2250812 С1 МПК В23К13/01 ПОЛУАВТОМАТ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ /Зайченко Ю.А., Демин А.Н., Горшков А.А., Косаревский В.В.// Заявка: 2003124707/02, 07.08.2003. Опубликовано: 27.04.2005 Бюл. № 12.
69. Зависимое от авт. свидетельства № 183856 М. Кл. В 23к 37/04 В 23р 3/10 В 23к 13/00 УСТАНОВКА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ ЛАП КУЛЬТИВАТОРА / И. А. Смирнов, Е. Л. Могилевский, И. Ш. Винокур, В. П. Яковлев, В. М. Берзон, В. А. Красин, Б. Н. Селиверстов, В. И. Попов и Л. П. Шатилина // Опубликовано 16.X.1972. Бюллетень № 31.
70. Алдырев Д. А., Зеленский Г. И., Ильницкий П. С., Егоров А. Т. / Установка для индукционной наплавки МПК: [В23К 37/047](#), [В23К 13/01](#) Опубликовано: [20.01.1995](#)
71. Попов С. М. Тріботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні/ С. Н. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Нетребко – Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2010. – 368с.
72. Статников Е. Ш. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышения надежности и долговечности сварных металлоконструкции / Е. Ш. Статников // Сварочное производство. – 2003. – №4. – С. 17-29.
73. Безбородов В. П. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и свойства сварных соединений теплостойкой стали 12Х1МФ / В.П. Безбородов // Сварочное производство. – 2000. – №7. – С. 17- 21.
74. Бугай Ю.М. Математична модель седиментаційно-вібрацій-ної рівноваги арміторів композиційного зубка шарошкового долота / Ю.М. Бугай, Л.Д. Пітулей, Д.І. Феденчук // Методи та прилади кон-тролю якості. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – № 6. – С. 100-102.
75. Крижанівський Є.І Вплив вібрації на кристалічну структуру долотної сталі / Є.І Крижанівський, Л.Д. Пітулей, Д.І. Феденчук // Науковий вісник

- Національного Технічного Університету Нафти і Газу, 2005- № 3(12). – С. 26-30.
76. Петрина Ю.Д. Вплив вібрації армованого розплаву на кристалічну структуру матричної долотної сталі. / Петрина Ю.Д., Пітулей Л.Д., Феденчук Д.І. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2005. - № 3(16). – С . 15-19.
77. Потанин А.А. Условие разрушение коагуляционной структуры вибрационным полем и критерий агрегируемости / А.А. Потанин, Н.Б.Урьев // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т. XX11. – № 4. – С. 528-534.
78. Сенчишин В.С. Расчет размеров структурных составляющих наплавленного индукционным способом металла с наложением мехаческой вибрации / Сенчишин В.С., Пулька Ч.В. // “Автомат сварка” №8. – 2015. – С. 34-37.
79. Пулька Ч.В. Керування структурою наплавленого металу з прикладанням механічної вібрації / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Шарик М.В. // Збірник тез доповідей «Актуальні задачі сучасних технологій. Том 1.» V міжнародна наукова-технічна конференція молодих вчених та студентів. 17-18 листопада 2016р., м. Тернопіль, С.313-314.
80. Пулька Ч.В. Розрахункова модель оцінки впливу параметрів вібрації на структуру наплавленого шару металу / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., // Тези доповідей на 12-му Міжнародному симпозиумі укр. інж. механіків у Львові, Н.У. «Львівська політехніка», м. Львів, 28-29 травня 2015р. С. 125.
81. Пулька Ч.В. Исследование технологии индукционной наплавки с использованием механической вибрации / Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Сенчишин В.С., Шарик М.В. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, 2016р., №2(38), С. 202-205.
82. Кудрявцев Ю.Ф. Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразву- ковой ударной обработкой / Ю. Ф. Кудрявцев, В. Ф.

- Коршун, А. З. Кузьменко // Автоматическая сварка. – 1989. – № 7. – С. 24-28.
83. Пархимович Е. М. Сварка и наплавка в ультразвуковом поле / Е. М. Пархимович. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 207с.
84. Силин Л. Л. Ультразвуковая сварка. Соединение металлов в твердом состоянии и улучшение качества сварных швов / Л. Л. Силин. – М.: 1962. – 254с.
85. Ерохин А. А. Способы ввода ультразвуковых колебаний в сварочную ванну с целью повышения качества шва / А. А. Ерохин, Л. Л. Силин // Сварочное производство. – 1960. –21 ISSN 2079.5459. Вісник НТУ “ХП». 2013. №38(1011) №5. – С. 4-7.
86. Гуревич Я. Б., Леонтьев В. И., Теумин И. И. Влияние ультразвука на структуру и свойства стали / Я. Б. Гуревич, В. И. Леонтьев, И. И. Теумин // Сталь. – 1966. – №9.
87. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. проф. Л. Д. Розенберга. – М., 1970 – 685 с.
88. Попов С. Н. Модель росту центрів кристалізації при ультразвуковому подрібненні зміцнюючої фази твердих наплавлених сплавів / С. Н. Попов // Вісник НТУ “ХП». 2013. №38(1011). – С.15-21 .
89. Сутырин Г.В. О влиянии вибрации низкой частоты на скорость зарождения центров кристаллизации. / Г.В. Сутырин // Известия АН СССР. Металлы, 1977, № 4, с. 108-110.
90. Мустафазаде Ф.М. Влияние вибрации на кристаллизацию сплавов. / Ф.М. Мустафазаде, Б.Б. Гуляев // В Сб.: Оптимизация металлургических процессов, вып. 4. - М.: Металлургиздат, 1970, с. 323-328.
91. Эльдорхамов А.С. Исследование условий роста кристаллов в поле упругих волн / А.С. Эльдорхамов // Процессы литья. – 1995. – №4. – С.49.
92. Говорков В.М. Влияние вибрации на затвердевание металлов. /В.М. Говорков, К.Н. Шебалин // ЖТФ, 1954, т. 24, вып. 2, с. 41-48.

93. Мысик Р. К. Вибрационное воздействие на кристаллизующийся расплав меди/ Р. К. Мысик, А. И. Голоднов, А. В. Сулицин, С. В. Брусницын// Труды V международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». -М.: Лаборатория рекламы и печати, 2009. - С. 49-55.
94. Титорский И.А. Введение в коллоидную химию. Часть 4. Электроповерхностные свойства дисперсных систем. Устойчивость и коагуляция коллоидных систем. / И. А. Титорский . - М., МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2008 – 60 с.
95. Дерягин Б.В. Поверхностные силы. / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. – М.: Наука, 1985. – 349 с.
96. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали./ В.А. Ефимов. – М.: Металургия, 1973. – 552 с.
97. Пулька Ч.В. Влияние вибраций детали в процессе наплавки на структуру и свойства металла / Ч.В.Пулька, О.Н. Шаблій, В.С. Сенчишин , М.В. Шарык, Г.Н. Гордань // Автоматическая сварка. – 2012. - № 1. – С. 27-29.
98. Ландау Л.Д., Механика. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М: Наука, 1965.
99. Кабачний В.І. Фізична та колоїдна хімія / В.І. Кабачний, Л.К. Осипенко, Л.Д. Грицан та ін.– Х.: Прапор, В-во УкрФА, 1999. – 368 с.
100. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Т. 4 Вибрационные процессы и машины / [Азбель Г.Г., Блехман И.И., Быховський И.И. и др.]; под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
101. Николаев Г.А. Специальные методы сварки. Учебное пособие для студентов вузов / Николаев Г.А., Ольшанский Н.А.; - М.:Машиностроение. – 1975. – 232 с.
102. Шаблій О.М. Новітня технологія індукційного наплавлення тонких плоских деталей з використанням інерційних сил / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Король О.І., Шарик М.В. // Тези доповідей на міжнародній науково-технічній конференції присвяченій 50-ти річчю ТНТУ ім. І. Пулюя 19-21 травня 2010 р., С.35-36.

103. Патент України на корисну модель № 54204, МПК (2009) В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких плоских сталевих деталей / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Король О.І., Шарик М.В. – № u201006501. – Заявл. 28.05.2010. Опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20/2010.
104. Пулька Ч. В. Вдосконалення технології індукційного наплавлення деталей сільськогосподарських машин з використанням інерційних сил (вібрації) / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Король О.І. // Тези доповідей на XIV науковій конференції Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя «Матеріалознавство та машинобудування» 27 – 28 жовтня 2010 р., С. 41.
105. Альтшулер Ю. Г. Измерение малых амплитуд механических перемещений с применением открытого СВЧ резонатора // Известия ВУЗов./ Альтшулер Ю. Г., Сосунов В. А., Усов Н. В.; - Радиоэлектроника. - 1975. - Т.18. - N10. - С. 93 - 98.
106. Гордеев Б. А., Применение ультразвукового метода в вибродиагностике легковых автомобилей / Гордеев Б. А., Новожилов М. В., Образцов Д. И.; -Метрология. - 1990. - №6. - С. 33 - 36.
107. Зак Е. Когерентные световые методы измерения параметров механических колебаний / Зак Е.; - Зарубежная радиоэлектроника. - 1975. - №12. - С. 70 - 76.
108. Викторов В. А., Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. / Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.; - М.: Энергоиздат. - 1989. - С. 124 - 162.
109. Коломойцев Ф. Н., СВЧ установка для измерения вибраций./ Коломойцев Ф. Н., Быстряков Н. П., Снежко Е. М., Налча Г. И., Харагай А. С.; -Измерительная техника. - 1971. - №11. - С. 45 - 46.
110. Пулька Ч.В. Методика визначення амплітуди коливань електромагнітного вібратора при індукційному наплавленні / Пулька Ч.В., Шарик М.В., Сенчишин В.С. // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя №4, 2011 р., с. 120 –125.

111. Пулька Ч.В. Визначення параметрів вібрації при індукційному наплавленні деталей машин / Пулька Ч.В., Шарик М.В., Сенчишин В.С. // Тези доповіді на науково-технічній конференції «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» ТНТУ ім. Івана Пулюя, 16 травня 2011 р. С.78-79.
112. Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла / Под редакцией И.И.Фрумина. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. — 1979. — 170 с.
113. Корж В.Н., Калашников А.В. Расчетноэкспериментальный метод оценки износостойкости газотермических покрытий на основе карбида бора И Праці Міжнародної конференції „Прогресивна техніка і техно логія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва”. - Том IV, Київ, НТУУ „КПГ”, 1998. - С. 319-322.
114. Рябцев И.А. Износостойкость наплавленного металла системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Mo // Автомат, сварка. - 2002. - № 4. - С. 48-51.
115. Износостойкость и структура твердых наплавов. Хрущов М. М. и др. М., «Машиностроение», 1971. – 97 с.
116. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Марьенко В.А. Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона. - 1979. - С. 23-27.
117. Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Письменний О.С. Дослідження стійкості проти спрацювання наплавлених індукційним способом деталей сільськогосподарських машин // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя. - 2004. - Т. 9, № 1.-С. 22-26.
118. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. — Киев: Техніка, 1976. — 200 с..
119. Пулька Ч.В. Влияние технологических схем индукционной наплавки на стабильность толщины наплавленного слоя / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Базар М.С. // Автоматическая сварка №4. - 2013. - С. 65-67.

120. Пулька Ч.В. Вплив технологічних операцій індукційного наплавлення на стабільність товщини шару наплавленого металу / Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С. // Тези доповіді на 11-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові, НУ “Львівська політехніка”, м. Львів, 15-17 травня 2013. – С. 199-200.
121. Пулька Ч.В. Дослідження властивостей шару наплавленого металу з використанням вібрації / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я. // Матеріали VIII міжнародної конференції молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» с.м.т. Ворзель, 20-22 травня 2015р.Київська обл., Україна С. 123.
122. Шаблій О.М. Підвищення ефективності індукційного наплавлення тонких сталевих дисків / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В. // Збірник тез доповідей на міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій України” м. Тернопіль 19 – 20 грудня 2012. - С. 19-20.
123. Пулька Ч.В. Вплив горизонтальної механічної вібрації на експлуатаційні властивості наплавленого металу / Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Сенчишин В.С., Шарик М.В., Гаврилюк В.Я. // "Автомат сварка" №10. – 2019.- С 22-27.
124. Жажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Б.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
125. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработки данных. М.: Колос, 1973. 159 с.
126. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 374 с.
127. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов /Ф.С. Новик. Я.Б. Арсов/ М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. — 304 с.

128. Пути совершенствования технологии индукционной наплавки тонких стальных дисков / Ч.В. Пулька, О.Н. Шаблій, В.Н. Барановский, В.С. Сенчишин, В.Я. Гаврилюк // Автоматическая сварка. — 2015. — № 5-6 (742). — С. 64-67.
129. Шаблій О.М. Віброіндукційне наплавлення тонких плоских деталей / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. // Тези доповіді на 10 Міжнародному симпозиумі українських інженерів механіків у Львові, 25-27 травня 2011 р. С. 289 – 290.
130. Патент України на корисну модель № 59994, МПК (2011.01) В23К 13/00 Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. – № u201013152. – Заявл. 05.11.2010. Опубл. 10.06.2011, Бюл. №11/2011.
131. Патент України на корисну модель № 64371, МПК (2011.01) В23К 13/00. Спосіб наплавлення сталевих деталей / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. – № u201103195. – Заявл. 18.03.2011. Опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21/2011.
132. Патент України на корисну модель № 72129, МПК (2012.01) В23К 13/00. Спосіб наплавлення сталевих дисків / Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В.– № u201200444. – Заявл. 16.01.2012. Опубл. 10.08.2012, Бюл. №15/2012.
133. Патент України на корисну модель № 92612, МПК (2014.01) В23К 13/00. Спосіб наплавлення тонких металевих дисків / Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В.– № u2014 02966. – Заявл. 24.03.2014. Опубл. 26.08.2014, Бюл. №16/2014.
134. Шаблій О.М. Віброіндукційна технологія наплавлення тонких сталевих дисків / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. // Тези доповіді на міжнародній науково-методичній конференції "Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, підготовка кадрів", 6 - 8 вересня 2011 р., м. Маріуполь, Приазовський державний технічний університет (ПДТУ). С. 120 – 121.

135. Пулька Ч.В. Напрямки підвищення зносостійкості деталей машин при індукційному наплавленні / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В. // Збірник матеріалів доповідей на V Всеукраїнській міжгалузевій науково-технічній конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології», НТУУ “КПІ”, Київ, 18-20 квітня 2012 р. с.164-166.
136. Пулька Ч.В. Совершенствование технологии индукционной наплавки стальных дисков / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В. // Тези доповіді на науково-технічній конференції „Современные проблемы металлургии , технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов”, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, 25-26 жовтня 2012. - С. 37 – 38.
137. Шаблій О.М. Нові технологічні процеси індукційного наплавлення тонких фасонних дисків / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Груша В.Я., // Тези доповіді міжнародної конференції в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» 25 – 26 листопада 2013р. С. 185-186.
138. Пулька Ч.В. Енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я. // Тези доповіді на VII науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів “Сварка и родственные технологии”, смт. Ворзель, 22-24 травня 2013. – С. 119.
139. Пулька Ч.В. Шляхи вдосконалення процесу індукційного наплавлення деталей машин / Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С. // Тези доповідей II Міжнародної інтернет-конференції “Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій”, м. Вінниця, 12 листопада 2014. – С.7.
140. Пулька Ч.В. Влияние частоты тока на свойства наплавленного металла при индукционной наплавке / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Гордань Н.Г., // Технологические системы, №2 (67).-2014.-С. 75-80.

141. Пулька Ч.В. Технологічні процеси в зварюванні та споріднених технологіях з використанням механічної вібрації / Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Барановський В.М., Сенчишин В.С. // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції “Сварка и родственные технологии. Перспективы развития». Присвяченої 50-ти річчю кафедри «Обладнання і технологія зварювального виробництва» ДДМА, 4-7 жовтня 2016 р., м. Краматорськ, С.118-120.
142. Пулька Ч.В. Дослідження індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій з використанням механічної вібрації / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В. // Тези доповідей на 13-му Міжнародному симпозиумі укр. інж. механіків у Львові, Н.У. «Львівська політехніка», м. Львів, 18-19 травня 2017р. С. 169-171.
143. Пулька Ч.В. Основні напрямки вдосконалення технології індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій / Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Сенчишин В.С., Шарик М.В., Гаврилюк В.Я. // Міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології» - сьогодні і майбутнє присвячена сторіччю НАН України 5-6 грудня 2018р. м.Київ ІЕЗ С.97.
144. Пулька Ч.В. Підвищення зносостійкості наплавленого металу з використанням механічної вібрації / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Шарик М.В. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті), 22-24 травня 2018. — Т. : ТНТУ, 2018. — С. 67.
145. Пулька Ч.В. Пристрій для керування енергоощадним режимом при індукційному наплавленні тонких елементів конструкції / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Шарик М.В., // Тези доповідей на 14-му Міжнародному симпозиумі укр. інж. механіків у Львові, Н.У. «Львівська політехніка», м. Львів, 23- 24 травня 2019р. С. 164-166.

146. Пулька Ч.В. Вплив різних частот на експлуатаційні властивості наплавленого металу / Пулька Ч.В., Підгурський М.І., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., // Всеукраїнська конференція з міжнародною участю. Проблеми зварювання та споріднених технологій м. Миколаїв НУК 17- 18 вересня 2019 р., С. 40-42.
147. Пулька Ч.В. Сучасні напрямки вдосконалення процесу індукційного наплавлення деталей машин та механізмів / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В., Гурик О.Я., // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій до 60 річчя з дня заснування ТНТУ імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя 14–15 травня 2020 року, С. 108.
148. Пулька Ч.В. Вібраційна потокова лінія для індукційного наплавлення тонких дисків / Пулька Ч.В., Барановський В.М., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В. // Електронний науковий фаховий журнал «Наукові доповіді НУБіП України». <http://nd.nubip.edu.ua> . – № 8 (57), 2015. (РІНЦ)
149. Барановський В. М. Поточкова лінія для виготовлення тонких дисків / В. М. Барановський, Ч. В. Пулька, В. С. Сенчишин, В. Я. Гаврилюк, М. В. Шарик // Наукові нотатки. - 2015. - Вип. 52. - С. 6-9. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2015_52_3.
150. Пулька Ч.В. Автоматична лінія для індукційного наплавлення тонких сталевих дисків / Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С. // Збірник тез доповідей XVIII наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 29–30 жовтня 2014. – С.44–45.
151. Патент України на корисну модель № 94727, МПК (2014.01) В23К 13/00. Автоматична потокова лінія для наплавлення тонких дисків / Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С., Шарик М.В. – № u201406882. – Заявл. 19.06.2014. Опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22/2014.

152. Патент України на корисну модель № 59994, МПК (2011.01) В23К 13/00 Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С. – № u201013152. – Заявл. 05.11.2010. Опубл. 10.06.2011, Бюл. №11/2011 .
153. Пулька Ч.В. Пристрій для керування енергоощадним режимом при індукційному наплавленні тонких елементів конструкції / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Шарик М.В., // Тези доповідей на 14-му Міжнародному симпозіумі укр. інж. механіків у Львові, Н.У. «Львівська політехніка», м. Львів, 23- 24 травня 2019р. С. 164-166.
154. Пулька Ч.В. Сучасні напрямки вдосконалення процесу індукційного наплавлення деталей машин та механізмів / Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Гаврилюк В.Я., Шарик М.В., Гурик О.Я., // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій до 60 річчя з дня заснування ТНТУ імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя 14–15 травня 2020 року, С. 108.
155. А.с. 1544543 СССР, МКИ5 В 23 К 37/04. Автоматическая поточная линия для наплавки фасонных дисков / З. В. Шкуль, Ч. В. Пулька, О. Е. Божемский и др. - Опубл. 23.02.90. - Бюл. № 7.
156. А. с. 1619571 СССР, МКИ В 23 К 13/00. Способ наплавки тонкостенных фасонных дисков / Ч. В. Пулька, О. Н. Шаблей, Б. П. Будзан, В. М. Скочило. Опуб. 08.09.90. - Бюл. № 17.
157. Пулька Ч. В. Енергозберігаюча автоматизована лінія для одночасного індукційного наплавлення тонких фасонних дисків / Пулька Ч. В // Вісник ТДТУ ім. І. Пулюя. - 2002. - Т. 7. - №3.- С.41-48.
158. Пулька Ч. В. Механізована лінія для неперервно-послідовного індукційного наплавлення тонких фасонних дисків / Ч. В. Пулька // Вісник ТДТУ ім. І. Пулюя. - 2002. - Т. 7. - № 2. - С. 83-90.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



«Затверджую»

Перший проректор ТНТУ

Митник М.М.

12 2016 р.

Акт впровадження

результатів дисертаційної роботи Сенчишина В.С.

Комісія в складі: голова – зав. кафедри «Технології і обладнання зварювального виробництва», д.т.н., професор Підгурський М.І.
члени – д.т.н., проф. кафедри ЗВ Пулька Ч.В.
к.т.н., доц. кафедри ЗВ Лазарюк В.В.
к.т.н., доц. кафедри ЗВ Окіпний І.Б.

Склали цей акт про те, що матеріали та результати дисертаційної роботи асистента кафедри «Технології і обладнання зварювального виробництва» (ЗВ) Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Сенчишина Віктора Степановича на тему «Виготовлення та відновлення сталевих виробів технологіями з використанням індукційного нагрівання», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології», впроваджені у навчальний процес при підготовці бакалаврів за напрямком підготовки 6.050504 «Зварювання» і спеціальності 131 «Прикладна механіка» та магістрів з спеціальності 131 «Прикладна механіка» при вивченні дисциплін «Наплавлення та напилення», «Підвищення зносостійкості та відновлення спрацьованих деталей машин та механізмів» та «Прогнозування розвитку зварювальної науки і техніки», а також при виконанні випускних кваліфікаційних робіт магістрів зварювального виробництва в частині розробленої нової технології індукційного наплавлення з використанням горизонтальної та вертикальної вібрації.

Голова комісії
зав. кафедри «Технології і
обладнання зварювального
виробництва», д.т.н., професор

Підгурський М.І.

Члени комісії:
д.т.н., проф. кафедри ЗВ
к.т.н., доц. кафедри ЗВ
к.т.н., доц. кафедри ЗВ

Пулька Ч.В.

Лазарюк В.В.

Окіпний І.Б.

44700 Україна Волинська обл., м. Володимир-Волинський, вул. Володимира Великого, 50 Тел/факс: (03342) 3-12-75 Тел/бух: 3-12-65



Приватне підприємство «ЧІП» *metal.be@gmail.com* Частное предприятие «ЧИП»

Вих. № 22
від 01.03.2021р.

АКТ

Про використання результатів кандидатської дисертації старшого викладача кафедри «Інжинірингу машинобудівних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Сенчишина Віктора Степановича на тему «Підвищення ефективності індукційного наплавлення шляхом застосування механічної вібрації».

Прийняті режими індукційного наплавлення порошкоподібними твердими сплавами з використанням механічної вібрації, які розроблені дисертантом, застосовуються для зміцнення робочих поверхонь різного профілю деталей з метою підвищення їх зносостійкості.

Результати які були проведені на нашому підприємстві показали доцільність їх використання з метою підвищення експлуатаційних властивостей деталей.

Запропонований спосіб і режими наплавлення розроблені з урахуванням отриманих дисертантом патентів України №54204; №59994; №64371; №94727

Директор ПП «ЧП»

В.М. Іткіс



**ПрАТ «КАХОВСЬКИЙ ЗАВОД ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ»
PrJSC «KAKHOVKA PLANT OF ELECTRIC WELDING EQUIPMENT»**

74800, Україна,
м. Каховка,
Херсонська обл.,
вул. Пушкіна, 109

тел.: (05536) 2-00-03
Факс: (05536) 4-10-41
e-mail: info@kzeso.com
www.kzeso.com

109 Pushkin Street,
74800, Kakhovka,
Kherson reg.,
Ukraine

від 26.02.2021 № 01/246

на № _____ від _____

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи ст. викладача кафедри «Інжинірингу машинобудівних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Сенчишина Віктора Степановича на тему «Підвищення ефективності індукційного наплавлення шляхом застосування механічної вібрації», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології».

Згідно програми робіт з вдосконалення технології виготовлення електрозварювального обладнання прийняті заводом режими індукційного наплавлення, а також нагрівальне обладнання з метою використання їх для зміцнення робочих поверхонь вузлів і деталей із застосуванням механічної вібрації.

Використання результатів дисертаційної роботи Сенчишина Віктора Степановича в комплексі із застосуванням високочастотних генераторів (струмів високої частоти) вирішує актуальні проблеми на заводі, які пов'язані з підвищенням експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей які використовуються в електрозварювальному обладнанні. Запропонований автором дисертації новий технологічний процес індукційного наплавлення з використанням механічної вібрації захищений патентами України № 54204, №59994, №64371, № 94727.

Головний інженер



Додаток Б



УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 59994

ПРИСТРІЙ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ФАСОННИХ
ДИСКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.06.2011.

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 64371

СПОСІБ НАПЛАВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.11.2011.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

М.В. Паладій





ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 94727

АВТОМАТИЧНА ПОТОКОВА ЛІНІЯ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ
ТОНКИХ ДИСКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.11.2014.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

А.Г. Жарінова



Додаток В

Таблиця 1.В.1.1

План-матриця експерименту типу ПФЕ 3^3

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів			Параметр оптимізації, $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$			Середні значення $\Delta h_{1c},$ $\Delta h_{2c}, \Delta h_{3c}$
								Повторюваність			
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	1	2	3	$Y_{\text{сеп.}}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{1c}
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{2c}
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{3c}
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{4c}
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{5c}
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{6c}
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	Y_{7c}
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	Y_{8c}
9	+1	0	0	-1	0	0	0	Y_{91}	Y_{92}	Y_{93}	Y_{9c}
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	Y_{101}	Y_{102}	Y_{103}	Y_{10c}
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	Y_{111}	Y_{112}	Y_{113}	Y_{11c}
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	Y_{121}	Y_{122}	Y_{123}	Y_{12c}
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_{131}	Y_{132}	Y_{133}	Y_{13c}
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_{141}	Y_{142}	Y_{143}	Y_{14c}
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	Y_{151}	Y_{152}	Y_{153}	Y_{15c}
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	Y_{161}	Y_{162}	Y_{163}	Y_{16c}
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	Y_{171}	Y_{172}	Y_{173}	Y_{17c}
18	+1	0	0	+1	0	0	0	Y_{181}	Y_{182}	Y_{183}	Y_{18c}
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	Y_{191}	Y_{192}	Y_{193}	Y_{19c}
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	Y_{201}	Y_{202}	Y_{203}	Y_{20c}
21	+1	0	-1	0	0	0	0	Y_{211}	Y_{212}	Y_{213}	Y_{21c}
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	Y_{221}	Y_{222}	Y_{123}	Y_{22c}
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	Y_{231}	Y_{232}	Y_{233}	Y_{23c}
24	+1	0	+1	0	0	0	0	Y_{241}	Y_{242}	Y_{243}	Y_{24c}
25	+1	-1	0	0	0	0	0	Y_{251}	Y_{252}	Y_{253}	Y_{25c}
26	+1	+1	0	0	0	0	0	Y_{261}	Y_{262}	Y_{263}	Y_{26c}
27	+1	0	0	0	0	0	0	Y_{271}	Y_{272}	Y_{273}	Y_{27c}

Продовження додатку В.1.1

Таблиця 2.В.1.1

Рандомізована план-матриця експерименту типу ПФЕ 3^3

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів			Параметр оптимізації			Середні значення $\Delta h_{1c}, \Delta h_{2c},$ Δh_{3c}
								Повторюваність			
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	1	2	3	
1	+1	0	+1	-1	0	0	-1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{1c}
2	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{2c}
3	+1	0	-1	+1	0	0	-1	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{3c}
4	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{4c}
5	+1	0	0	-1	0	0	0	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{5c}
6	+1	+1	+1	0	+1	0	0	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{6c}
7	+1	0	+1	0	0	0	0	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	Y_{7c}
8	+1	+1	0	+1	0	+1	0	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	Y_{8c}
9	+1	0	0	+1	0	0	0	Y_{91}	Y_{92}	Y_{93}	Y_{9c}
10	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_{101}	Y_{102}	Y_{103}	Y_{10c}
11	+1	+1	-1	0	-1	0	0	Y_{111}	Y_{112}	Y_{113}	Y_{11c}
12	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	Y_{121}	Y_{122}	Y_{123}	Y_{12c}
13	+1	-1	+1	0	-1	0	0	Y_{131}	Y_{132}	Y_{133}	Y_{13c}
14	+1	0	0	0	0	0	0	Y_{141}	Y_{142}	Y_{143}	Y_{14c}
15	+1	0	-1	-1	0	0	+1	Y_{151}	Y_{152}	Y_{153}	Y_{15c}
16	+1	0	-1	0	0	0	0	Y_{161}	Y_{162}	Y_{163}	Y_{16c}
17	+1	0	+1	-1	0	0	-1	Y_{171}	Y_{172}	Y_{173}	Y_{17c}
18	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_{181}	Y_{182}	Y_{183}	Y_{18c}
19	+1	-1	+1	0	-1	0	0	Y_{191}	Y_{192}	Y_{193}	Y_{19c}
20	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	Y_{201}	Y_{202}	Y_{203}	Y_{20c}
21	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	Y_{211}	Y_{212}	Y_{213}	Y_{21c}
22	+1	+1	0	0	0	0	0	Y_{221}	Y_{222}	Y_{123}	Y_{22c}
23	+1	+1	0	-1	0	-1	0	Y_{231}	Y_{232}	Y_{233}	Y_{23c}
24	+1	-1	-1	0	+1	0	0	Y_{241}	Y_{242}	Y_{243}	Y_{24c}
25	+1	0	+1	+1	0	0	+1	Y_{251}	Y_{252}	Y_{253}	Y_{25c}
26	+1	-1	0	+1	0	-1	0	Y_{261}	Y_{262}	Y_{263}	Y_{26c}
27	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_{271}	Y_{272}	Y_{273}	Y_{27c}

Додаток Г

Додаток Г.1.1

Результати експериментальних досліджень генеральної вибірки відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню диска Δh_1 , мм

	Var11	4	0,86	12	0,79	16	0,75	20	0,81	24	0,71
1	0,93	9	0,62	13	0,89	17	0,7	21	0,73	25	0,69
2	0,84	10	0,96	14	0,84	18	0,65	22	0,82	26	0,64
3	0,77	11	0,87	15	0,77	19	0,9	23	0,79	27	0,58

Додаток Г.2.1

Результати експериментальних досліджень генеральної вибірки відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню диска

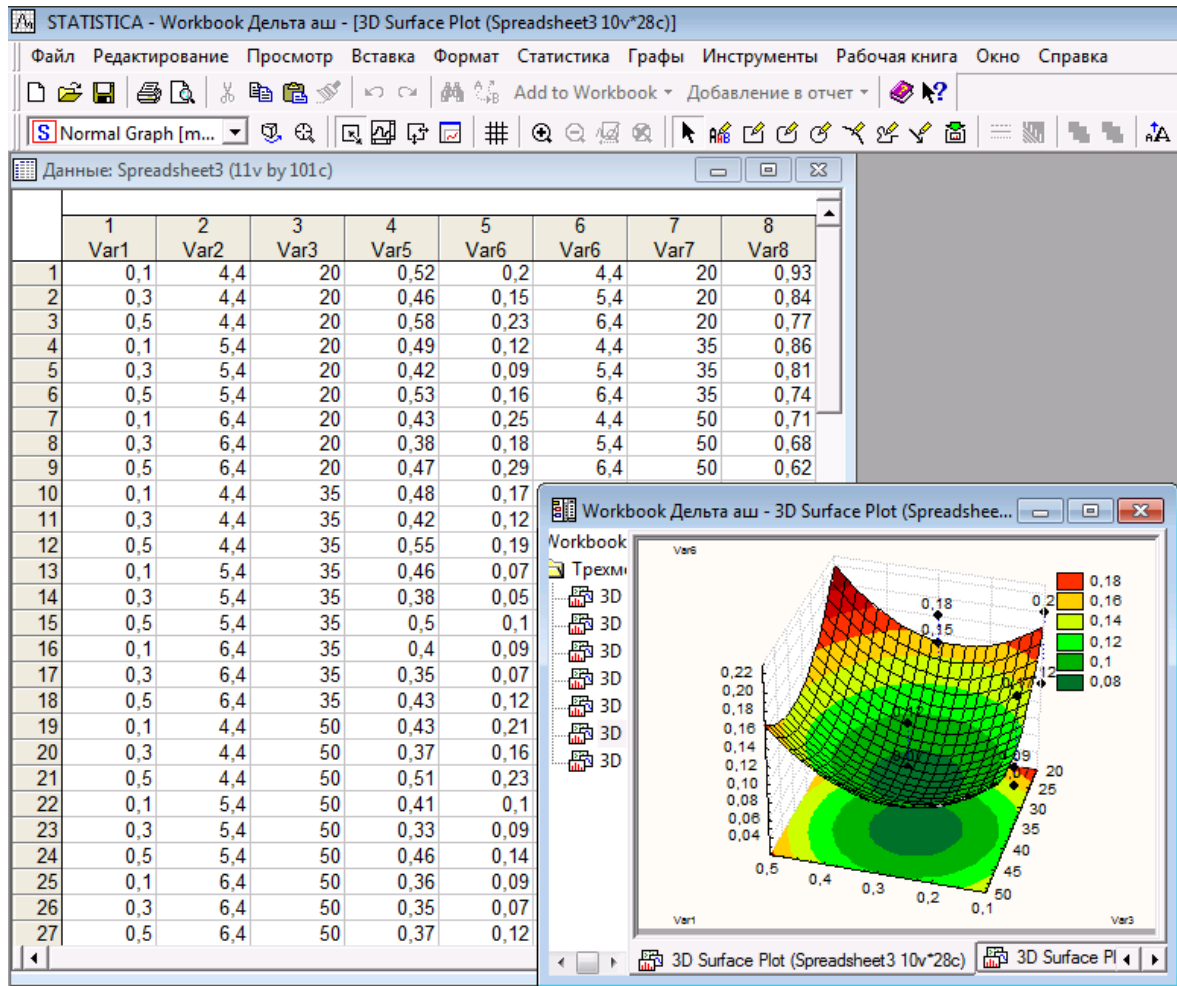
Δh_2 (Var9) та Δh_3 (Var10), мм

	Var9	Var9	Var9	Var9	Var9
1	0,52	1	0,51	1	0,38
2	0,46	2	0,41	2	0,5
3	0,58	3	0,33	3	0,4
4	0,49	4	0,46	4	0,35
5	0,42	5	0,36	5	0,43
6	0,53	6	0,35	6	0,43
7	0,43	7	0,37	7	0,37
8	0,38	8	0,52	8	0,51
9	0,47	9	0,46	9	0,41
10	0,48	10	0,58	10	0,33
11	0,42	11	0,49	11	0,46
12	0,55	12	0,42	12	0,36
13	0,46	13	0,53	13	0,35
14	0,38	14	0,43	14	0,37
15	0,5	15	0,38	15	0,52
16	0,4	16	0,47	16	0,46
17	0,35	17	0,48	17	0,58
18	0,43	18	0,42	18	0,49
19	0,43	19	0,55	19	0,42
20	0,37	20	0,46	20	0,53

	Var10	Var10	Var10	Var10	Var10
1	0,2	1	0,23	1	0,05
2	0,15	2	0,1	2	0,1
3	0,23	3	0,09	3	0,09
4	0,12	4	0,14	4	0,07
5	0,09	5	0,09	5	0,12
6	0,16	6	0,07	6	0,21
7	0,25	7	0,12	7	0,16
8	0,18	8	0,2	8	0,23
9	0,29	9	0,15	9	0,1
10	0,17	10	0,23	10	0,09
11	0,12	11	0,12	11	0,14
12	0,19	12	0,09	12	0,09
13	0,07	13	0,16	13	0,07
14	0,05	14	0,25	14	0,12
15	0,1	15	0,18	15	0,2
16	0,09	16	0,29	16	0,15
17	0,07	17	0,17	17	0,23
18	0,12	18	0,12	18	0,12
19	0,21	19	0,19	19	0,09
20	0,16	20	0,07	20	0,16

Додаток Г.3.1

Результати експериментального масиву даних відхилення товщини шару наплавленого металу на робочу поверхню диска Δh_i



Var1 – амплітуда колювання деталі під час наплавлення A_k , мм;

Var2 – напруга на контурі U_k , кВ;

Var3 – час наплавлення t_n , с;

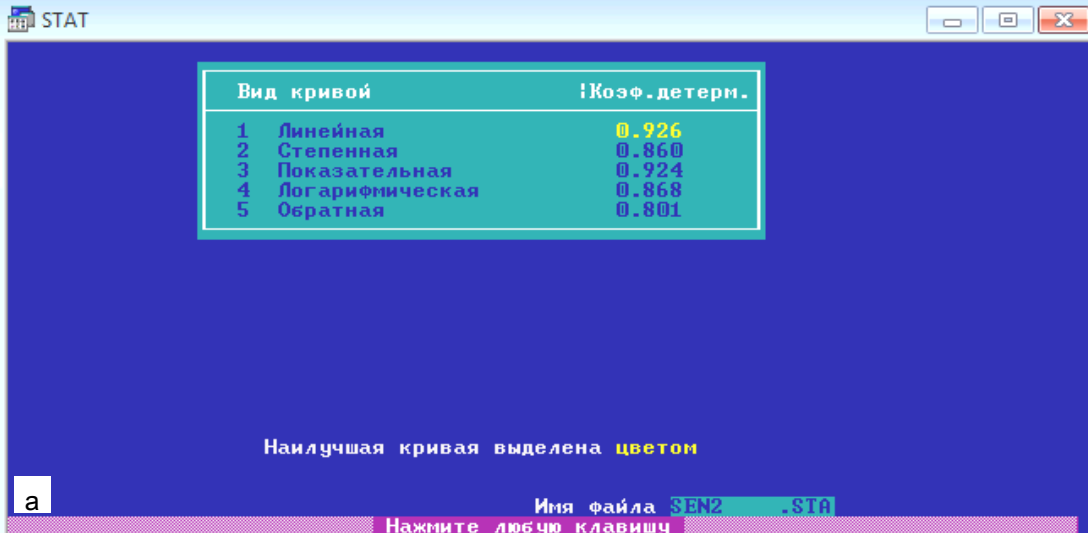
Var5 – відхилення товщини шару наплавленого металу за вертикальної вібрації за раціональної товщини рівній 1 мм, $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(A_k; U_k; t_n)$, мм;

Var6 – відхилення товщини шару наплавленого металу за горизонтальної вібрації за раціональної товщини рівній 1 мм, $\Delta h_3 = f_{\Delta h_3}(A_k; U_k; t_n)$, мм;

Var8 – відхилення товщини шару наплавленого металу без вібрації за раціональної товщини рівній 1 мм, $\Delta h_1 = f_{\Delta h_1}(U_k; t_n)$, мм.

Додаток Г.4.1

Показники статистичних розрахунків експериментального масиву даних відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_1



STAT

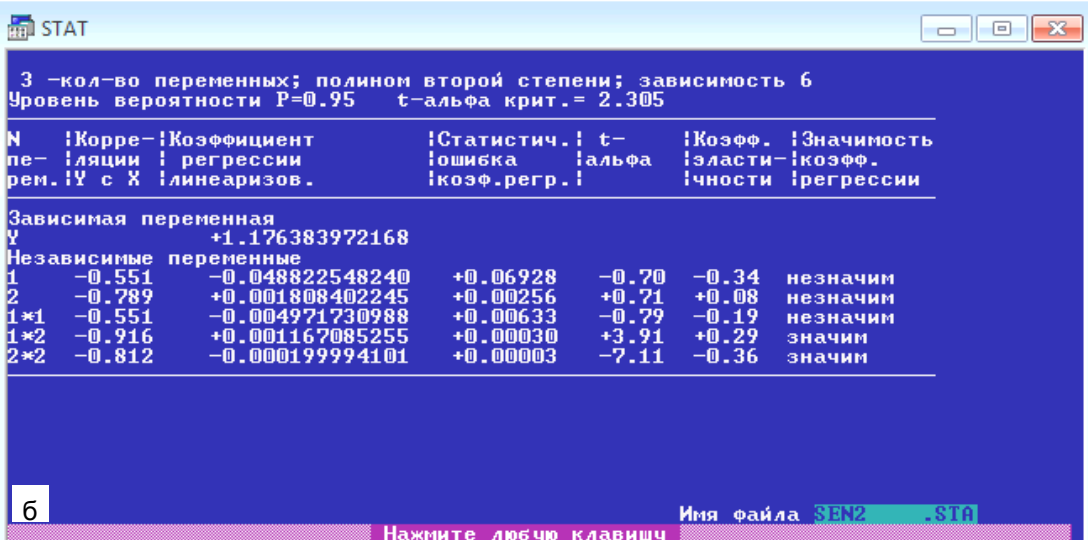
Вид кривой	Козф. детерм.
1 Линейная	0.926
2 Степенная	0.860
3 Показательная	0.924
4 Логарифмическая	0.868
5 Обратная	0.801

Наилучшая кривая выделена цветом

а

Имя файла SEN2 .STA

Нажмите любую клавишу



STAT

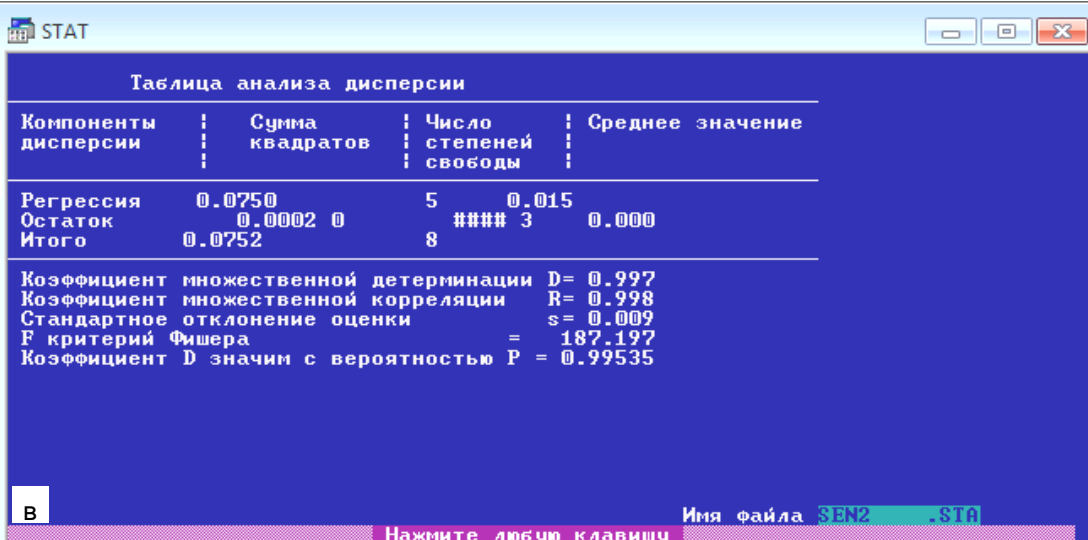
3 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.95 t-альфа крит. = 2.305

N	Корреляция	Кoeffициент регрессии	Статистич. ошибка	t-альфа	Кoeff. эластичности	Значимость коэфф. регрессии
Зависимая переменная Y +1.176383972168						
Независимые переменные						
1	-0.551	-0.048822548240	+0.06928	-0.70	-0.34	незначим
2	-0.789	+0.001808402245	+0.00256	+0.71	+0.08	незначим
1*1	-0.551	-0.004971730988	+0.00633	-0.79	-0.19	незначим
1*2	-0.916	+0.001167085255	+0.00030	+3.91	+0.29	значим
2*2	-0.812	-0.000199994101	+0.00003	-7.11	-0.36	значим

б

Имя файла SEN2 .STA

Нажмите любую клавишу



STAT

Таблица анализа дисперсии

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение
Регрессия	0.0750	5	0.015
Остаток	0.00020	3	0.000
Итого	0.0752	8	

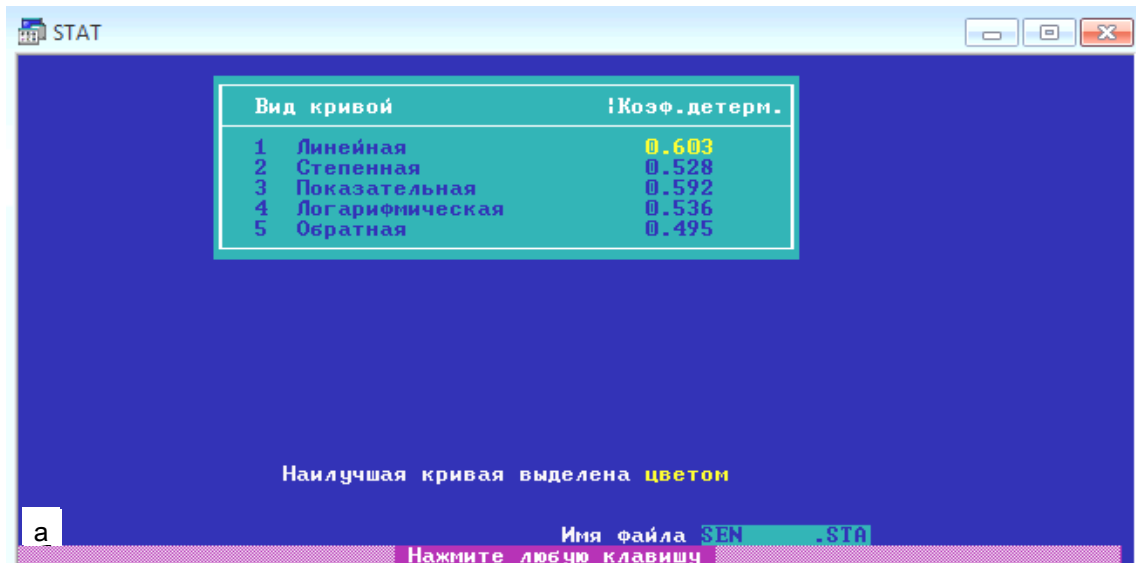
Кoeffициент множественной детерминации D = 0.997
Кoeffициент множественной корреляции R = 0.998
Стандартное отклонение оценки s = 0.009
F критерий Фишера = 187.197
Кoeffициент D значим с вероятностью P = 0.99535

в

Имя файла SEN2 .STA

Нажмите любую клавишу

Показники статистичних розрахунків експериментального масиву даних
відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_2



4 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.95 t-альфа крит. = 2.053

N	Корреляция	Коеффициент регрессии	Статистич. ошибка	t-альфа	Коеф. эластичности	Значимость коэф. регрессии
Зависимая переменная						
Y		+0.643600881100				
Независимые переменные						
1	+0.290	-0.807621002197	+0.17563	-4.60	-0.55	значим
2	-0.539	+0.023067122325	+0.07488	+0.31	+0.28	незначим
3	-0.477	-0.002845113631	+0.00279	-1.02	-0.23	незначим
1*1	+0.395	+2.027842044830	+0.17015	+11.92	+0.54	значим
1*2	+0.118	-0.054154127836	+0.02406	-2.25	-0.20	значим
1*3	-0.013	+0.000000407534	+0.00160	+0.00	+0.00	незначим
2*2	-0.541	-0.005543671083	+0.00681	-0.81	-0.38	незначим
2*3	-0.640	+0.000277691666	+0.00032	+0.87	+0.12	незначим
3*3	-0.477	-0.000017287408	+0.00003	-0.57	-0.05	незначим

Имя файла SEN .STA

Таблица анализа дисперсии

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение
Регрессия	0.1114	9	0.012
Остаток	0.00470	17	0.000
Итого	0.1161	26	

Коеффициент множественной детерминации D = 0.959
Коеффициент множественной корреляции R = 0.979
Стандартное отклонение оценки s = 0.017
F критерий Фишера = 44.541
Коеффициент D значим с вероятностью P = 1.000000

Имя файла SEN .STA

Показники статистичних розрахунків експериментального масиву даних
відхилення товщини шару наплавленого металу Δh_3

STAT

Вид кривой	Коеф. детерм.
1 Линейная	0.235
2 Степенная	0.277
3 Показательная	0.255
4 Логарифмическая	0.256
5 Обратная	0.289

Наилучшая кривая выделена цветом

а

Имя файла SEN .STA
Нажмите любую клавишу

STAT

4 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.95 t-альфа крит.= 2.053

N	Корреляция	Коеффициент регрессии	Статистич. ошибка	t-коэф. регр.	t-альфа	Коефф. эластичности	Значимость коэф. регрессии
Зависимая переменная							
Y		+1.894731998444					
Независимые переменные							
1	+0.206	-0.736913681030	+0.21203	-3.48	-1.55		значим
2	-0.280	-0.596778929234	+0.09040	-6.60	-22.54		значим
3	-0.339	-0.003642997006	+0.00337	-1.08	-0.89		незначим
1*1	+0.276	+1.277796149254	+0.20541	+6.22	+1.04		значим
1*2	+0.126	+0.012486750260	+0.02905	+0.43	+0.14		незначим
1*3	-0.014	-0.000554620114	+0.00194	-0.29	-0.04		незначим
2*2	-0.254	+0.061236277223	+0.00822	+7.45	+12.78		значим
2*3	-0.475	-0.002555209910	+0.00039	-6.60	-3.38		значим
3*3	-0.288	+0.000227196797	+0.00004	+6.22	+2.19		значим

б

Имя файла SEN .STA
Нажмите любую клавишу

STAT

Таблица анализа дисперсии

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение
Регрессия	0.0957	9	0.011
Остаток	0.0069	17	0.000
Итого	0.1026	26	

Кoeffициент множественной детерминации D= 0.933
Кoeffициент множественной корреляции R= 0.966
Стандартное отклонение оценки s= 0.020
F критерий Фишера = 26.245
Кoeffициент D значим с вероятностью P = 1.00000

в

Имя файла SEN .STA
Нажмите любую клавишу

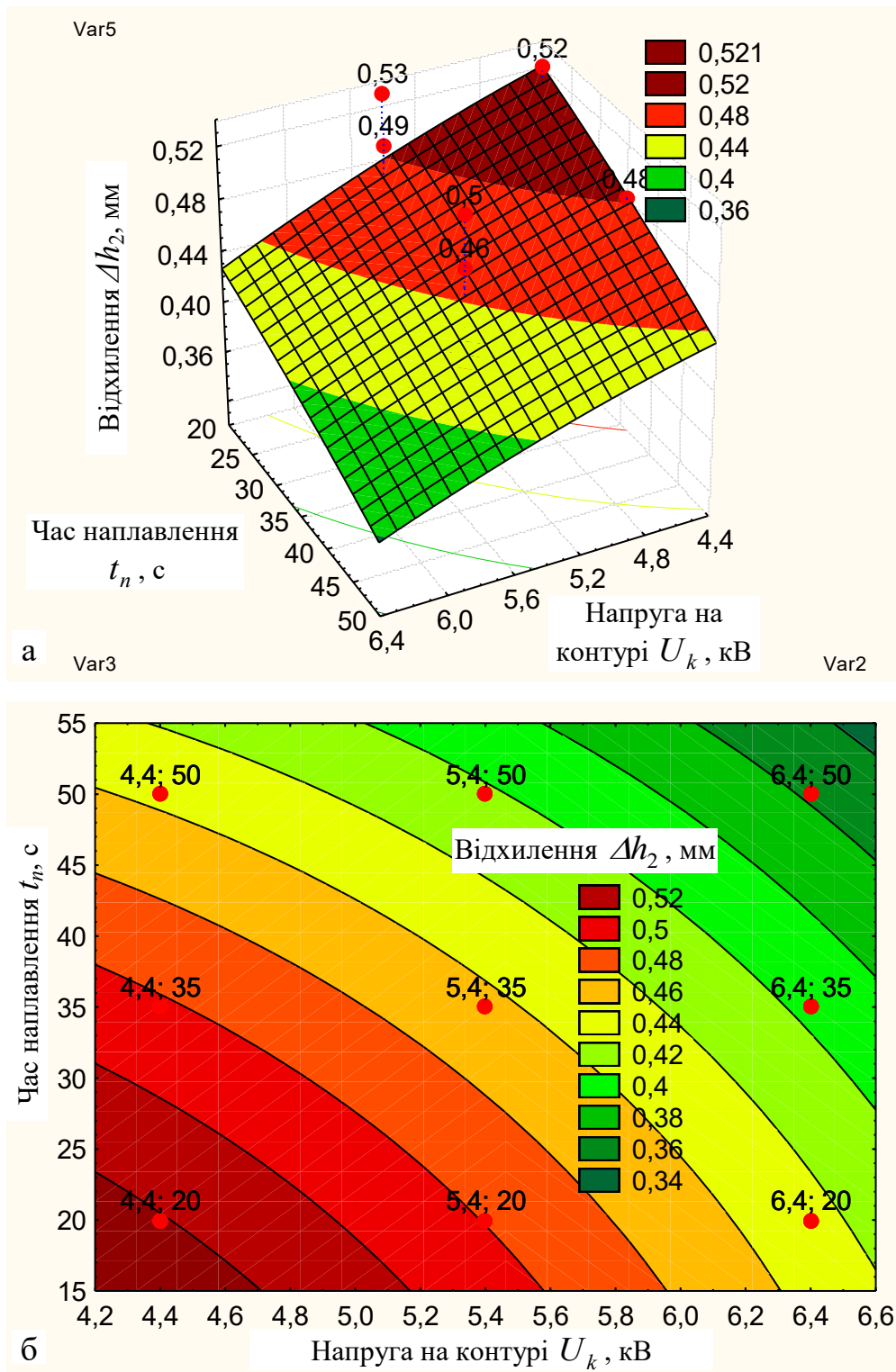


Рисунок 1.Г.7.1 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого металу як функція $\Delta h_2 = f_{\Delta h_2}(U_k; t_n)$

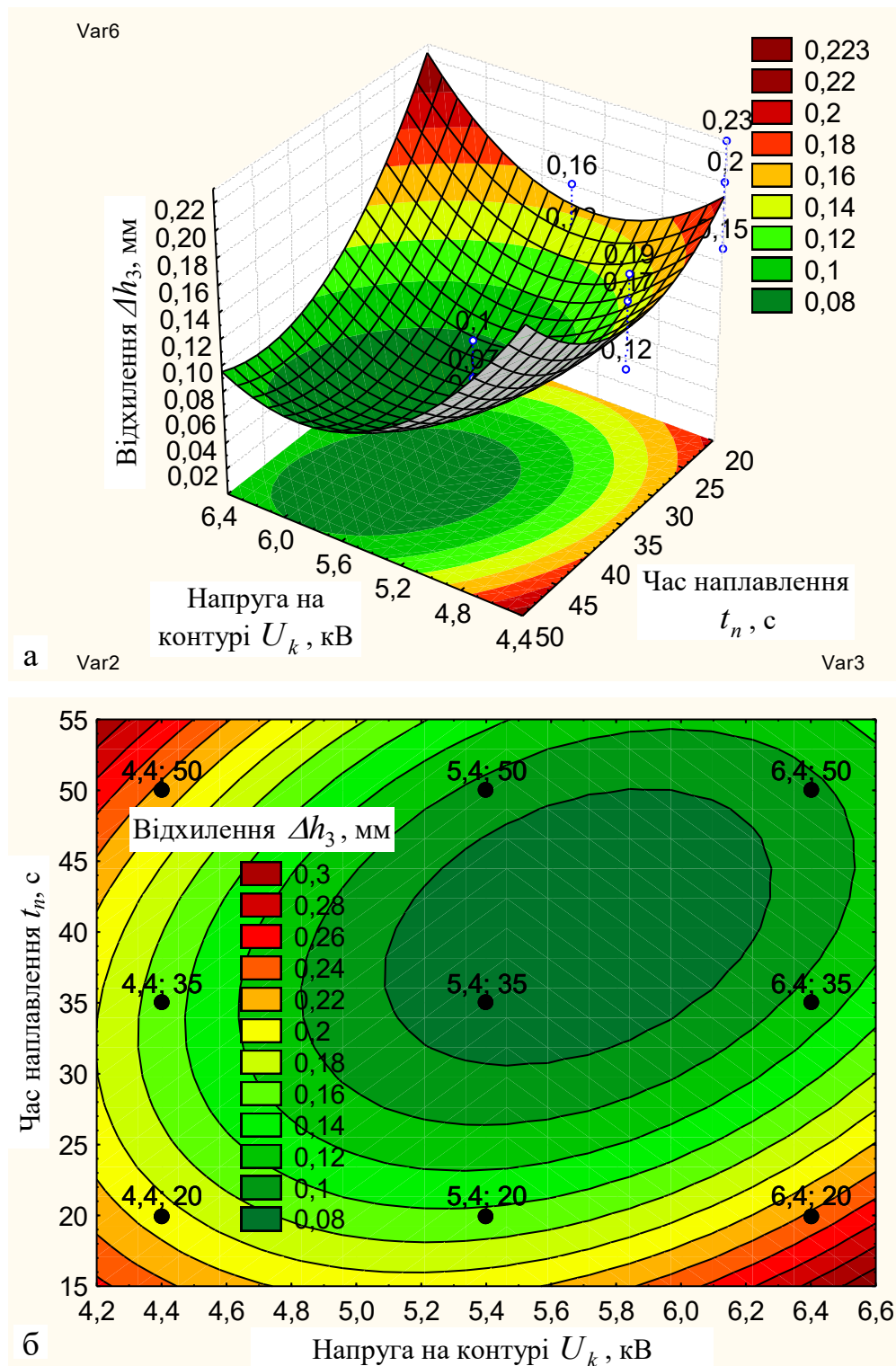


Рисунок 2.Г.7.1 – Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку функціональної зміни відхилення товщини шару наплавленого

$$\text{металу як функція } \Delta h_3 = f_{\Delta h_2}(U_k; t_n)$$