

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шаповалов Максим Валерійович

УДК 621.91.01

ДИСЕРТАЦІЯ
ЗМІЦНЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ
ІМПУЛЬСНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ ДЛЯ ОБРОБКИ
ВИРОБІВ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

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



М. В. Шаповалов

Науковий керівник
Васильченко Яна Василівна,
доктор технічних наук,
доцент

Краматорськ – 2019

АНОТАЦІЯ

Шаповалов М. В. Зміцнення твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем для обробки виробів важкого машинобудування – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Донбаська державна машинобудівна академія, МОН України, Краматорськ, 2019.

Об'єкт дослідження – процес оброблення деталей на важких верстатах різальними інструментами, які зміцнені обробкою імпульсним магнітним полем.

Предмет дослідження – параметри процесу зміцнення та роботи твердосплавного різального інструменту для важких верстатів.

У вступі розкрито суть і стан наукової задачі, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукові положення, які виносяться на захист, наведено дані щодо наукової новизни, обґрунтовано достовірність і показано практичну цінність отриманих наукових результатів, наведено дані про публікації й апробацію роботи.

У першому розділі «Методи підвищення ефективності оброблення деталей на важких верстатах твердосплавним інструментом» здійснено аналіз сучасного стану проблеми вдосконалення інструментального забезпечення нових верстатів для високоточного продуктивного оброблення важкооброблюваних матеріалів. Проведено аналіз умов оброблення великогабаритних деталей на підприємствах важкого машинобудування, методів визначення раціональних параметрів процесу різання на важких верстатах та застосування новітніх методів зміцнення інструменту. Особливо актуальною ця задача є для твердосплавних різальних інструментів.

Напрямами в розв'язанні проблеми подовження ресурсу інструментів для важкого машинобудування є забезпечення поверхневої та об'ємної міцності. Шляхами отримання інструментальних матеріалів з комплексом необхідних в умовах обробки на важких верстатах характеристик є технологія оброблення імпульсним магнітним полем (ОІМП).

Накопичено досвід застосування методу для підвищення стійкості інструментів з швидкорізальних сталей, безвольфрамових твердих сплавів. Але технологія зміцнення твердих сплавів розроблена недостатньо. Потребує вивчення методика визначення раціональних режимів оброблення імпульсним магнітним полем твердих сплавів та режими експлуатації зміцнених інструментів. Аналіз цих актуальних питань визначило мету роботи і задачі дослідження.

У другому розділі «Методика дослідження впливу оброблення імпульсним магнітним полем (ОІМП) на міцність і зносостійкість твердосплавних різальних інструментів» наведені методики досліджень стійкості твердосплавних різальних інструментів, які пройшли оброблення імпульсним магнітним полем, за допомогою форсованих методів випробувань.

Для попередньої оцінки впливу ОІМП на стійкість твердосплавних різальних інструментів проводилися їх форсовані випробування, які дозволяють скоротити час випробувань, витрат інструментального і оброблюваного матеріалу.

Метод ступеневої збільшення режимів різання (подачі і швидкості різання) дозволяє реалізувати принцип екстраполяції по навантаженню, тобто поступового збільшення навантаження по міцності і швидкості зношування інструментального матеріалу. Випробування інструментів методом ступеневого збільшення подачі полягали у визначенні подачі, досягнення якої викликає руйнування різальної частини різця. Проведені випробування інструментів методом безперервного збільшення швидкості різання (метод торцевого точіння).

Розглянута методика оцінки несучої здатності інструменту методом руйнуючої подачі. Методика встановлює організаційні й методичні принципи збору й обробки інформації про надійність різців в умовах експлуатації. Метою експериментальних досліджень було встановлення залежностей руйнуючої подачі й імовірності руйнування інструмента від параметрів умов їх експлуатації. Також розглянута кінетика зношування твёрдосплавного різального інструменту після ОІМП.

Представлена порівняльна методика оперативної оцінки ефективності модифікації різальних пластин з визначення опору руйнуванню і зношуванню при контактному навантаженні.

У третьому розділі «Вплив ОІМП на фізико-механічні фактори, що визначають різальну здатність твёрдих сплавів» було розглянуто вплив ОІМП на фізико-механічні фактори, що визначають різальну здатність твёрдих сплавів при попередньому обробленні виробів. Досліджувалася зміна міцності і абразивної зносостійкості твёрдих сплавів ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6 з використанням методів моделювання.

Для оцінки міцності різальної частини інструментів проводилися випробування зразків при консольному вигині та під дією зосередженого навантаження на зразок, що лежить на двох опорах. Проведені також дослідження зміни конструкційної міцності різальних пластин на трьохточковий згин.

Проведені дослідження впливу ОІМП на характеристики конструкційної міцності зразків, які виготовлені з напайних пластин. Особливо екстремальною з точки зору навантаження на різальні пластини є попереднє оброблення, яке відбувається із значними величинами глибин різання (15–20 мм) та подач (до 3 мм), а також супроводжується коливаннями фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. За таких надривних умов на ПрАТ НКМЗ використовуються напайні твёрдосплавні пластини із вольфрамокобальтових та титанокобальтових сплавів.

Розроблена методика оцінювання конструкційної міцності напайних твёрдосплавних пластин та встановлення її зв'язку з показниками, що можуть бути визначені при дослідженнях та в умовах виробництва сервісною службою підприємства. Для дослідження міцності напайних пластин з них було виготовлено зразки шляхом розрізання вздовж пластини, що дозволило задовольнити вимозі щодо зменшення зусилля навантаження, виявлення впливу дефектності на характеристики міцності, а також отримати данні про міцність та дефектність різних частин пластини. Досліджено вплив ерозійної різки на характеристики міцності. Запропоновано спосіб контролю міцності та якості різальної поверхні лезвійного твёрдосплавного інструменту, який дозволяє шляхом випробування реальних елементів інструменту, у тому числі напайних та змінних пластин враховувати вплив визначальних технологічних, конструкційних, експлуатаційних та масштабного факторів.

У четвертому розділі «Результати експлуатаційних виробничих випробувань твёрдосплавних різальних інструментів, після ОІМП та їх вплив на підвищення ефективності процесу різання» представлені результати експлуатаційних виробничих випробувань твёрдосплавних різальних інструментів після ОІМП та їх вплив на підвищення ефективності процесу різання.

Важливим засобом підвищення ефективності випробувань і розширення обсягу одержуваної інформації є проведення випробувань різальних інструментів у виробничих умовах на конкретній технологічній операції. Проведені виробничі випробування твёрдосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, в умовах ПрАТ НКМЗ. Для дослідження впливу геометричних параметрів різців на ефективність зміцнення оцінювання працездатності проводилося за зносом задньої поверхні інструменту.

Відзначено високу тісноту зв'язку між експериментальними і теоретичними даними, а також достатню узгодженість отриманих результатів з даними лабораторних і виробничих випробувань інструментів.

У п'ятому розділі «Оцінювання ефективності оброблення твердосплавного різального інструменту імпульсним магнітним полем» проводилося оцінювання ефективності оброблення металів різанням за цільовими функціями, що характеризує продуктивність Q , собівартість C і інструментальні витрати S в залежності від стійкості інструментів і режимів різання. У цих функціях враховувалося також вплив розсіювання стійкості інструментів.

Використовуючи результати виробничих випробувань, на основі принципів системного підходу було представлено взаємозв'язок параметрів механічного оброблення і ефективності виробничого процесу при використанні ОІМП.

Визначена залежність продуктивності оброблення різцями, зміцнених ОІМП, від домінуючих чинників: напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_s , вмісту кобальту в твердому сплаві Co , частоти імпульсів f , яка має практичне застосування

Ключові слова: оброблення імпульсним магнітним полем; твердосплавний інструмент; важкий верстат, виробничі випробування; стійкість; напруженість магнітного поля, частота імпульсів, продуктивність.

ANNOTATION

Shapovalov M.V. Strengthening of the carbide tool by impulse magnetic field for the processing of heavy machine-building products – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate degree technical sciences for specialty 05.03.01 "Processes of machining, machines and tools" – Donbass State Engineering academy, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2019.

The object of research - the process of machining parts on heavy machine tools cutting tools, which are strengthened by processing impulse magnetic field.

Subject of research - parameterhards of the process of strengthening and working hard-alloy cutting tool for heavy machine tools.

The introduction reveals the essence and the state of the scientific problem, substantiates the relevance of the topic, formulates the purpose and objectives of the research, outlines the scientific provisions that are put forward in defense, presents the data on scientific novelty, validates the validity and shows the practical value of the scientific results obtained, provides data on publications and approbation work.

In the first section "Methods of increasing the effectiveness of machining parts on heavy machine tools by the hard alloy tool", an analysis of the current state of the problem of improving the tooling of new machines for precision, productive processing of hard-working materials was carried out. The analysis of the conditions of processing of large-sized parts at the enterprises of heavy mechanical engineering, methods of determining the rational parameters of the cutting process on heavy machine tools and the application of the newest tools for strengthening the instrument. This problem is especially important for carbide cutting tools.

Directions in solving the problem of extending the resource of tools for heavy mechanical engineering is to provide surface and bulk strength. Ways of obtaining tool materials with a set of necessary in the conditions of machining on heavy duty machine tools is the technology of processing pulsed magnetic field (IMFP).

The experience of using the method for increasing the stability of tools from high-speed steels, tungsten hard alloys has been accumulated. But the technology for strengthening hard alloys is not developed enough. Need to study the methodology for determining the rational modes of processing pulsed magnetic field hard alloys and modes of operation of strengthened instruments. The analysis of these topical issues defined the purpose of the work and the research tasks.

In the second section "Methods of studying the impact of pulsed magnetic field processing (PMFP) on the strength and wear resistance of carbide cutting

tools", the methods of investigating the stability of carbide cutting tools, which have been processed by pulsed magnetic field, are given with the help of forced test methods.

For the preliminary estimation of the influence of PMFP on the stability of carbide cutting tools, their forced tests were carried out, which allow to shorten the test time, the cost of tool and workable material.

The method of stepwise increase of cutting modes (feed and cutting speed) allows to realize the principle of extrapolation by load, that is, the gradual increase in the load on the strength and speed of wear of the instrumental material. Testing of instruments by a stepwise increase in feed was to determine the supply, the achievement of which causes the destruction of the cutting part of the cutter. Instrument testing is carried out by a method of continuous increase of the cutting speed (the method of face turning).

The method of estimating the load carrying capacity of the tool by the method of destructive feed is considered. The methodology establishes organizational and methodical principles of collecting and processing information on the reliability of cutters in the conditions of operation. The purpose of experimental research was to determine the dependencies of the destructive filing and the likelihood of destruction of the instrument from the parameters of the conditions of their operation. The kinetics of wearing of the carbide cutting tool after PMFP is also considered.

The comparative method of operative estimation of the efficiency of modification of the cutting plates for determination of the resistance to destruction and wear at contact load is presented.

In the third section, "Influence of PMFP on physical and mechanical factors determining the cutting ability of hard alloys", the influence of PMFP on the physical and mechanical factors determining the cutting ability of hard alloys during pre-processing of products was considered. The strength and abrasive wear resistance of hard alloys VK6, VK8, T5K10, T15K6 was studied using simulation methods.

To test the strength of the cutting part of the instruments, samples were tested at the console bend and under the action of a concentrated load, such as on two supports. Also conducted studies of the change in the structural strength of the cutting plates to the three-point bend.

Investigations of the influence of PMFP on the characteristics of structural strength of samples made of spatula plates have been carried out. In particular, from the point of view of the load on the cutting plates, there is a preliminary treatment, which takes place with significant values of cutting depths (15 ... 20 mm) and feedings (up to 3 mm), and also accompanied by fluctuations of the physical and mechanical properties of the material being processed. Under such super-heavy conditions, PJSC NKMZ uses spat hard-alloy plates of tungsten-cobalt and titanocobalt alloys.

The method of estimating the structural strength of spat hard-alloy plates and establishing its connection with the indicators that can be determined in the research and in the conditions of production by the service of the enterprise is developed. To study the strength of the spin plates, samples were made from them by cutting along the plate, which allowed to satisfy the requirement for reducing the load of the load, detecting the impact of defect on the strength characteristics, and also obtain data on the strength and defect of the various parts of the plate. The effect of the erosion cut on the strength characteristics was investigated. The method of control of the strength and quality of the cutting surface of the blade carbide tool is proposed, which allows to take into account the influence of the determining technological, structural, operational and scale factors by testing the real elements of the tool, including swing and replaceable plates.

In the fourth section "Results of operational testing of carbide cutting tools, after PMFP and their influence on increasing the efficiency of the cutting process", the results of operational production tests of carbide cutting tools after IMFP and their influence on the efficiency of the cutting process are presented.

An important means to increase the effectiveness of tests and increase the volume of information received is the testing of cutting tools in the production

conditions on a specific technological operation. The production tests of carbide cutting tools, which are reinforced by PMFP, have been carried out in the conditions of PJSC NKMZ. To study the influence of the geometric parameters of the cutters on the efficiency of the strengthening, the performance evaluation was carried out with the wear of the back surface of the tool.

The high correlation between the experimental and theoretical data, as well as the sufficient consistency of the results with the data of laboratory and industrial test instruments was noted.

In the fifth section, "Estimation of the efficiency of treatment of the carbide cutting tool with a pulsed magnetic field", an estimation of the efficiency of cutting metals by targeted functions, characterizing Q productivity, cost C and instrumental costs S , depending on the stability of tools and cutting modes was carried out. These functions also take into account the influence of the dispersion of the stability of tools.

Using the results of production tests, based on the principles of the system approach, the relationship between the parameters of mechanical processing and the efficiency of the production process when using PMFP was presented.

The dependence of the productivity of the machining by the cutters strengthened by the PMFP on the dominant factors is determined: the intensity of the magnetic field H , the strength of the hard alloy σ_v , the content of cobalt in the hard alloy Co , the pulse frequency f , which has practical application

Key words: pulsed magnetic field processing (PMFP); carbide tool; heavy machine tool manufacturing test; stability; magnetic field strength, pulse frequency, performance.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Клименко Г. П., Мироненко Є. В., Гузенко В. С., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Експлуатація збірних різців : монографія для студентів спеціальностей 6.050503, 6.050502, 8.05050301, 8.05050302, 8.05050201 денної та заочної форми навчання. Краматорськ : ДДМА, 2015. 86 с.

Публікації, що входять до міжнародних науко-метричних баз

2. Soroka O., Rodichev I., Shabetia O., Kovalov V., Vasilchenko Y., Shapovalov M. Strength of tool materials. Modern trends in material processing : collective monograph / Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja, 2018. Pp. 185–217. ISBN 978-86-6075-065-7.

Публікації, що входять до переліку фахових видань

3. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Исследование технических параметров и технологических возможностей тяжелых токарных станков. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. пр. Краматорськ. 2011. № 29. С. 76–84.

4. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Разработка технологических систем для обработки крупногабаритных деталей на базе адаптивных многоцелевых тяжелых станков. *Машиноприладобудування та транспорт* : вестник СевНТУ. 2013. № 139. С. 28–32.

5. Клименко Г. П. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Качество и надежность эксплуатации сборных твердосплавных инструментов. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Series: Techniques in a machine industry* : зб. наук. пр. № 34 (1310) 2018. Харків, 2018. С. 34–39.

6. Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Прискорені випробування різальних пластин при інтенсивному контактному навантаженні. *Вісник Донбаської державної*

машинобудівної академії : зб. наук. пр. Краматорськ, 2018. № 1 (43). С. 181–187.

7. Sharovalov M. Kovalov V., Vasylichenko Y. Increase the productivity of hard-alloy tools for heavy machine tools by processing impulse magnetic field (Підвищення продуктивності твердосплавних інструментів для важких верстатів шляхом обробки імпульсним магнітним полем). *Вісник ТНТУ*. Тернопіль, 2018. № 4 (92). С. 52–59.

8. Шаповалов М. В., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. Вплив результатів виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів, зміцнених ОІМП на підвищення ефективності технологічного процесу різання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Харків, 2018. Вип. 4 (6). С. 84–92.

Публікації у закордонних виданнях

9. Шаповалов М. В., Васильченко Я. В. Банк данных для выбора рациональной конструкции сборных резцов. *Теория и практика в машиностроении* : сборник научных трудов ЗАО ОНИКС. Ирбит, 2013. С. 159–162.

Публікації апробаційного характеру

10. Васильченко Я. В. Шаповалов М. В. Способ комбинированного упрочнения режущего инструмента и деталей машин. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : тези доповідей X Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Суми, 2010. С. 139–140.

11. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В., Полунина Л. В. Входные параметры адаптивных технологических систем работы тяжелых станков. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* : матеріали VIII Міжнародної науково технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2010. С. 21.

12. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Савелова И. К., Савелов Д. В. Моделирование процесса механической обработки крупногабаритных деталей на тяжелом токарном станке. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2011. С. 23.

13. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Информационный банк данных режущего инструмента на тяжелых станках. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*: тези доповідей ХІІ Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Київ, 2012. С. 27–30.

14. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Михайлюк А. В. Повышение эффективности работы тяжелого токарного оборудования за счет разработки рекомендаций по выбору рациональных режимов резания. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали ХІ Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2013. С. 25.

15. Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Статична та втомна міцності твердих сплавів, оброблених імпульсним магнітним полем. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали ХІ Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2013. С. 102.

16. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Підвищення ефективності різального інструменту на важких верстатах за рахунок розробки та впровадження технологічного методу обробки імпульсним магнітним полем. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї наука виробництво*: тези доповідей ХІV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Суми, 2014. С. 108.

17. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Киреева А. Е. Розробка технологій модифікації інструментальних матеріалів для важкого машинобудування, оптимізованих за параметрами міцності і працездатності.

Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2014. С. 24.

18. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Визначення раціональних технічних та конструктивних параметрів верстатів для обробки крупногабаритних деталей. *Прогресивні технології у машинобудуванні*: Збірник наукових праць III-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції. Львів, 2015. С. 26–28.

19. Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Визначення опору руйнуванню і зношуванню різальних пластин при контактному навантаженні. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2015. С. 82.

20. Васильченко Я. В., Турчанин М. А., Шаповалов М. В., Киреева А. Е. Повышение эффективности режущего инструмента на тяжелых станках за счет разработки и внедрения технологического метода обработки импульсным магнитным полем. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2015. С. 16.

21. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Григорьев В. К. Адаптивное управление процессами резания на тяжелых станках. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2015. С. 15.

22. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Методики підвищення експлуатаційних властивостей твердосплавних різальних пластин за рахунок обробки імпульсним магнітним полем. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2016. С. 19.

23. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Оцінка характеристик конструкційної міцності різальних пластин та оптимізація технологій зміцнення за параметрами міцності. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : тези доповідей XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції. Чернігів, 2017. С. 104–105.

24. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Оцінка конструкційної міцності твердих сплавів та особливостей обробки імпульсним магнітним полем. *Обладнання і технології сучасного машинобудування*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Тернопіль, 2017. С. 45–46.

25. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Лобова К. В. Обґрунтування торцевої схеми ОІМП твердосплавних пластин для важких верстатів. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2017. С. 12–13.

26. Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Сукова Т. О. Методика визначення підвищення міцності твердосплавного різального інструменту для важких верстатів шляхом оброблення імпульсним магнітним полем. *Прогресивні технології у машинобудуванні*: Збірник наукових праць VI-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Львів, 2017. С. 53.

27. Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Зміцнення твердосплавного різального інструменту для важкого машинобудування на основі обробки імпульсним магнітним полем. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції. Чернігів, 2018. Т. 1. С. 67–68.

28. Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Подоляк Я. В. Встановлення взаємозв'язку між параметрами, що характеризують процес різання, параметрами імпульсного магнітного поля і ефективністю виробництва. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2018. С. 41–42.

29. Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Дослідження стійкості твердосплавних різальних інструментів, оброблених імпульсним магнітним полем, за допомогою форсованих методів випробувань. *Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 18-й Международной научно-технической конференции, 04-08 июня 2018. Свалява, Закарпатская обл. – Киев, 2018. С. 75–77.*

30. Васильченко Я. В., Хорошайло В. В., Сукова Т. О., Шаповалов М. В., Саєнко М. О., Железняк В. Р, Гармаш М. О. Розробка автоматизованої системи синтезу та оцінки компонувань верстатів. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XVIII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2018. С. 29–31.*

31. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Переходченко С. С., Казанцева Т. Ю. Підвищення ефективності обробки деталей важкого машинобудування за рахунок визначення раціональних режимів різання. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XVIII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2018. С. 31–33.*

32. Клименко Г. П., Шаповалов М. В., Ковалев Д. А. Анализ надежности сборных фрез. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XVIII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2018. С. 72–74.*

33. Шаповалов М. В., Тіторук Т. І., Печений О. О. Підвищення працездатності металорізального інструменту з твердих сплавів методом обробки імпульсним магнітним полем. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези доповідей XVIII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2018. С. 196–197.*

34. Sharovalov M., Kovalov V., Vasilchenko Y. Improving the Efficiency of Machining Through Modifying Carbide Cutting Tips by Pulsed Magnetic Field

Processing. *Mamalis International Symposium on Advanced Manufacturing of Advanced: Materials and Structures with Sustainable Industrial Applications*. Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition, 4–8 November 2018. Rio Othon Palace, Rio De Janeiro, Brazil.

Патенти

35. Різальний інструмент: пат. на корисну модель 126778 Україна : МПК В23В 27/00. № u201712789; заявл. 22.12. 2017; опубл. 10.07. 2018, бюл. № 13.

ЗМІСТ

ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ ТВЕРДОСПЛАВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ.....	28
1.1 Умови роботи різальних інструментів на підприємствах важкого машинобудування.....	28
1.2 Методи підвищення фізико-механічних властивостей твердосплавних інструментальних матеріалів.....	34
1.3 Мета і завдання досліджень	55
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОБРОБЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ (ОІМП) НА МІЦНІСТЬ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ	56
2.1 Методика проведення лабораторних досліджень	56
2.1.1 Метод ступінчасто-збільшувальних режимів різання.....	57
2.1.2 Метод безперервного збільшення швидкості різання	63
2.1.3 Методика випробувань на стійкість і працездатність різальних пластин, які зміцнені ОІМП і комбінованими технологіями в лабораторних умовах	65
2.1.4. Методика оцінювання несівної здатності інструменту методом руйнувальної подачі	68
2.1.5 Вплив складу твердого сплаву на його зносостійкість	77
2.1.6 Вплив форми різальної частини інструменту на його зносостійкість	78
2.1.7 Вплив режимів ОІМП на зносостійкість інструменту	79
2.1.8 Порівняльна методика оперативного оцінювання ефективності модифікації різальних пластин з визначення опору руйнуванню та зношуванню при контактному навантаженні	81

2.2 Особливості зношування твердосплавних інструментів, які зміцнені ОІМП.....	84
2.2.1 Характер руйнування поверхонь різця	84
2.2.2 Особливості кінетики зношування твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП.....	86
2.2.3 Характер зношення твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП.....	92
2.3 Висновки до розділу 2	96
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ОІМП НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РІЗАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ	97
3.1 Дослідження зміни міцності при консольному вигині твердих сплавів.....	97
3.2 Дослідження зміни міцності твердих сплавів при дії зосередженого навантаження на зразок, що лежить на двох опорах.....	104
3.3 Дослідження зміни конструкційної міцності різальних пластин на триточкове згинання.....	108
3.5 Вплив ОІМП на характеристики конструкційної міцності зразків, які виготовлені з напайних пластин	112
3.6 Прогнозування втомної міцності твердого сплаву після ОІМП.....	121
3.7 Спосіб контролю міцності та якості різальної поверхні лезв'яного твердосплавного інструменту	128
3.8 Дослідження абразивної зносостійкості твердих сплавів.....	134
3.8.1 Методика досліджень абразивної зносостійкості твердих сплавів	134
3.8.2 Вплив складу твердого сплаву, який зміцнений ОІМП, на міцність і зносостійкість.....	140
3.8.3 Вплив режиму зміцнення на міцність і зносостійкість твердого сплаву.....	143
3.8.4 Вплив частоти імпульсів на міцність і зносостійкість твердого сплаву.....	143

3.9 Висновки до розділу 3	149
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИРОБНИЧИХ	
ВИПРОБУВАНЬ ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ	
ПІСЛЯ ОІМП ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	
ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ	
	147
4.1 Методика виробничих випробувань і оброблення результатів	147
4.2 Вплив ОІМП на показники експлуатаційної стійкості інструменту	153
4.3 Вплив геометричних параметрів різця на ефективність ОІМП	158
4.4 Висновки до розділу 4	166
РОЗДІЛ 5. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ	
ТВЕРДОСПЛАВНОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ІМПУЛЬСНИМ	
МАГНІТНИМ ПОЛЕМ.....	
	167
5.1 Підвищення ефективності технологічного процесу	
при використанні ОІМП для твердосплавних різальних інструментів	167
5.2 Взаємозв'язок параметрів ОІМП, параметрів процесу механічного	
оброблення й ефективності виробництва, їх практичне застосування.....	178
5.2.1 Фактори, які впливають на параметри функціонування	
системи під час механооброблення деталей.....	181
5.2.2 Вибір найвпливовіших факторів на ефективність	
механічного оброблення деталей при використанні ОІМП.....	182
5.2.3 Математичне оброблення експериментальних даних	186
5.3 Висновки до розділу 5	191
ВИСНОВКИ.....	193
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	196
ДОДАТОК А. Результати виробничих випробувань різців.....	214
ДОДАТОК Б. Акт виробничих випробувань твердосплавних пластин	
після оброблення імпульсним магнітним полем (ОІМП)	218
ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	220

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво важкого металургійного, енергетичного, транспортного обладнання є основою машинобудування України та важливою складовою частиною її експорту. Для виготовлення важких машин, конкурентоспроможних на світовому ринку, актуальною проблемою є підвищення показників міцності відповідних конструкційних матеріалів, працездатності та ресурсу великогабаритних деталей за рахунок застосування нових ефективних технологій, оснащення машинобудівних підприємств сучасним технологічним обладнанням і різальним інструментом з використанням результатів наукових досліджень і розробок. З розвитком промисловості посилюються вимоги до машин, підвищення точності та якості їх виготовлення, впровадження нових міцних матеріалів, які дають можливість досягнення підвищеного рівня експлуатаційних характеристик. Важливою задачею є вдосконалення інструментального забезпечення нових верстатів для високоточного продуктивного оброблення важкооброблюваних матеріалів за рахунок застосування новітніх методів зміцнення інструменту. Однією з перспективних технологій підвищення міцності, ресурсу й експлуатаційних властивостей металевих виробів для різних галузей техніки є обробка імпульсним електромагнітним полем.

Особливо актуальною ця задача є для твердосплавних різальних інструментів. Як відомо, тверді сплави мають, з одного боку, високу теплостійкість, що дозволяє різальним інструментам працювати при високих швидкостях різання. З іншого боку, тверді сплави мають низьку міцність на вигин, що обмежує їх можливість працювати на попередніх, обдирних операціях, на яких на інструмент діє ударне навантаження, що утворилося з боку заготовки, яка виготовлена методами лиття або кування, абразивного пилу, нерівномірності припуску й інше. Тому дослідження цих питань має актуальне науково-технічне завдання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності з науковою тематикою кафедри «Комп'ютеризовані

мехатронні системи, інструменти та технології» Донбаської державної машинобудівної академії Дк-03-2001 «Підвищення якості та ефективності верстатного обладнання та різального інструменту для важкого машинобудування» (№0102U001664); Д-04-2004 «Розробка системи управління якістю роботи важких верстатів та інструментів» (№0104U004038); Д-06-07 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (№0107U001306); Дк-08-04 «Удосконалювання технологічного середовища для автоматизованого виробництва продукції важкого машинобудування» (№0105U002445); Д-06-2007 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (0107U001306); Д-05-2009 «Розробка інформаційних технологій для систем адаптивного управління процесом механічної обробки деталей на важких верстатах» (0109U002669); Д-03-2011 «Оперативна оптимізація процесів різання для систем адаптивного управління важкими верстатами нового покоління» (0111U000884); Д-03-2013 «Розробка технологічних систем для екологічно ефективної обробки деталей енергетики на базі адаптивних багатоцільових важких верстатів» (0113U000607); Дк-01-2014 «Підвищення надійності та продуктивності комп'ютеризованих мехатронних верстатів інструментальних систем важкого машинобудування» (0114U002757); Д-03-2015 «Управління процесами механічної обробки деталей вітроенергетики з нових важкооброблюваних матеріалів на важких верстатах» (0115U003124); Д-03-2017 «Підвищення ефективності виготовлення виробів оборонного та енергетичного призначення шляхом створення високотехнологічних мехатронних верстатоінструментальних систем» (0117U001165).

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності оброблення деталей на важких верстатах шляхом зміцнення твердосплавного різального інструменту імпульсним магнітним полем (ОІМП).

Під ефективністю оброблення деталей розуміється підвищення її продуктивності, зниження собівартості та витрат інструментальних матеріалів, підвищення надійності інструменту.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити такі **основні задачі**:

- проаналізувати умови роботи різальних інструментів на підприємствах важкого машинобудування;

- дослідити зносостійкість твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, за допомогою форсованих методів випробувань і моделювання процесу різання;

- встановити механізм зміни властивостей твердого сплаву під дією оброблення імпульсним магнітним полем; виділити основні фактори, що впливають на зміну зносостійкості твердого сплаву під дією оброблення імпульсним магнітним полем;

- дослідити вплив оброблення імпульсним магнітним полем на працездатність твердосплавних різальних інструментів у виробничих умовах;

- встановити вплив зміцнення на продуктивність, собівартість операції та інструментальні витрати;

- впровадити результати досліджень на підприємствах важкого машинобудування, дослідити взаємозв'язок параметрів ОІМП і параметрів процесу механічного оброблення деталей на ефективність виробництва.

Об'єкт дослідження – процес оброблення деталей на важких верстатах твердосплавними різальними інструментами, які зміцнені обробкою імпульсним магнітним полем.

Предмет дослідження – параметри процесу зміцнення та роботи твердосплавного різального інструменту на важких верстатах.

Методи досліджень. Методологічною основою роботи є комплексний підхід до вивчення процесу оброблення деталей на важких верстатах, їх умов і особливостей, закономірностей процесів.

Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях теорії різання матеріалів, теорії проектування різальних інструментів, кваліметрії, теорій надійності, дослідження операцій, прийняття рішень, теорії ймовірності та математичної статистики.

Експериментальні дослідження базуються на теоріях регресійного та кореляційного аналізів, математичної статистики з використанням методик форсованих, прискорених, тривалих випробувань, моментних спостережень, інформаційного банку даних, евристичних методів. Робота виконувалася за допомогою сучасних засобів обчислювальної техніки.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено теоретичні засади підвищення ефективності оброблення деталей твердосплавним інструментом на важких верстатах за допомогою дії на них імпульсного магнітного поля. Встановлено, що головними параметрами, які керують зміцненням, є напруженість магнітного поля і частота імпульсів, які діють на різальні пластини.

2. Встановлено цільові функції, що дозволяють оптимізувати процес об'ємного зміцнення твердосплавного різального інструменту.

3. Вперше теоретично обумовлене і експериментально встановлено зниження коефіцієнта варіації стійкості твердосплавних збірних різців після оброблення імпульсним магнітним полем при обробленні деталей на важких верстатах.

4. Визначено режими різання і властивості інструментального матеріалу, які дозволяють ефективно застосовувати об'ємне зміцнення для досягнення найвищої продуктивності при найменших собівартості й інструментальних витратах.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено метод об'ємного зміцнення твердосплавного різального інструменту, що дозволяє підвищити його період стійкості.

2. Доведено значне підвищення надійності (безвідмовності та довговічності) і зносостійкості твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП.

3. Створено методику визначення оптимальної величини напруженості магнітного поля і частоти імпульсів у залежності від геометричних параметрів інструменту.

4. Оптимізовано режими різання для різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, за критеріями продуктивності оброблення, собівартості операції та інструментальними витратами.

5. Розроблено статистичну модель, яка дозволяє визначити продуктивність механооброблення у залежності від властивостей інструментального матеріалу і параметрів оброблення деталей на важких верстатах.

Реалізація результатів роботи. На підставі результатів досліджень цієї роботи розроблені та впроваджені у виробництво технологічний метод оброблення імпульсним магнітним полем різальних пластин з твердого сплаву, технологічні рекомендації щодо підвищення ефективності операцій оброблення великорозмірних деталей на важких токарних верстатах. Фактичний економічний ефект від впровадження результатів роботи на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» становить 78200 тис. грн.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень роботи на ПрАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» впроваджено технологію зміцнення та результати впливу режимів оброблення твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем (ОІМП) при механічному обробленні металевих виробів на важких верстатах, що підтверджується відповідним актом про впровадження.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються у навчальному процесі на кафедрі «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» ДДМА (м. Краматорськ)

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати отримані здобувачем самостійно. Здобувач здійснив наукове обґрунтування розробок у галузі машинобудування, що забезпечує вирішення важливої прикладної задачі – підвищення ефективності оброблення деталей на важких верстатах шляхом зміцнення тврдосплавного різального інструменту імпульсним магнітним полем.

Постановка задач і аналіз наукових результатів виконані разом з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на понад 20 наукових конференціях і семінарах, у тому числі на міжнародних: X Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Суми, 2010 р.), IX Міжнародній науково технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку». (м. Краматорськ, 2011 р.), XII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Київ, 2012 р.), XI Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2013 р.), XIV Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»(м. Суми, 2014 р.), XII Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2014 р.), XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2015 р.), XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2016 р.), VI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні» (м. Львів, 2017 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Обладнання і технології

сучасного машинобудування» (м. Тернопіль, 2017 р.), XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Чернігів, 2017 р.), XV Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку». (м. Краматорськ, 2017 р.), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2018 р.), XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2018 р.), XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (м. Свалява, Закарпатська обл. – Київ: АТМ України, 2018); XVIII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»(м. Краматорськ, 2018 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 35 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у міжнародних науко-метричних базах, 1 стаття у закордонних виданнях, 6 статей у вітчизняних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних), 1 патент, 25 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел – 162 найменувань (18 с.) і 3 додатка. Основний текст роботи містить 156 сторінок, 70 рисунків, 23 таблиці. Загальний обсяг роботи становить 222 сторінки.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ ТВЕРДОСПЛАВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

1.1 Умови роботи різальних інструментів на підприємствах важкого машинобудування

Для дослідження умов експлуатації різального інструменту на важких верстатах у роботах [46; 72; 110] розглядався ряд типорозмірів верстатів з $D_{max} = 1250\text{--}2500$ мм, де D_{max} – максимальний діаметр деталі, що обробляється над станиною, який був прийнятий як непряма характеристика типорозміру і вібростійкості верстату [108].

Статистичні дослідження довели, що при обробленні на важких верстатах сила різання, що допускається механізмами верстата, крутний момент (рис. 1.1), не є обмеженнями на режими різання. Максимальні значення сил до 10 раз перевищують їх середнє значення, за якими звичайно здійснюють розрахунки конструктивних параметрів різальних інструментів.

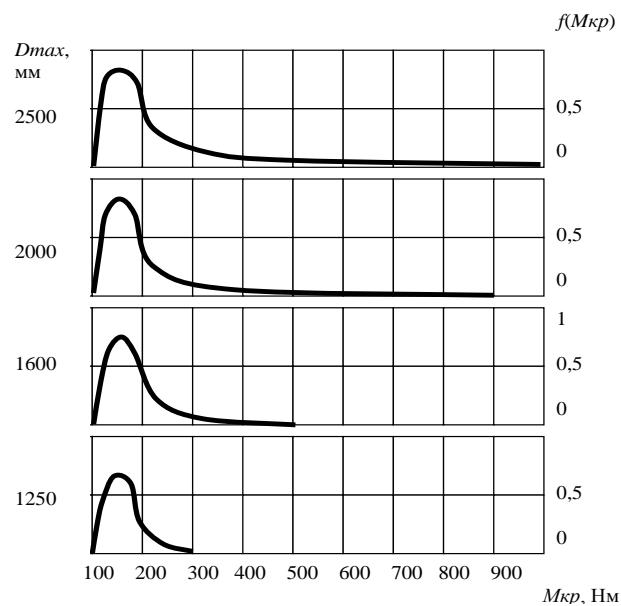


Рисунок 1.1 – Розподіли моменту обертання $f(M_{кр})$, що створює
робота одного супорта важкого токарного верстата

Істотним обмеженням на режими різання при обробленні на важких верстатах існуючих конструкцій є маса деталі, що не дозволяє у ряді випадків збільшувати частоту обертання [8; 47].

На працездатність різального інструменту також впливають змінні навантаження, якість його виготовлення, розсіювання фізико-механічних властивостей та ін. В остаточному підсумку сукупний вплив багатьох випадкових факторів може спричинити непередбачену відмову у результаті катастрофічного зношування або випадкового руйнування інструменту.

Зниження середньої швидкості різання на важких верстатах у порівнянні із середніми й малими верстатами, крім збільшеного перетину зрізу, пояснюється тим, що зазначені швидкості вимагають у деяких випадках застосування частоти обертання шпинделя верстата, що перебуває на межі можливостей обертання великогазових деталей на верстатах існуючих конструкцій та високої потужності верстатів (рис. 1.2).

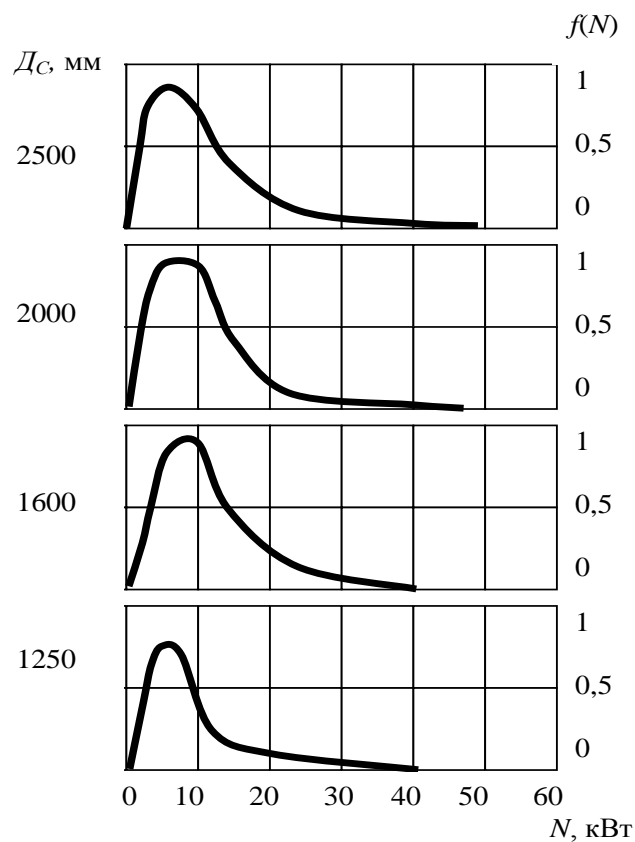


Рисунок 1.2 – Розподіли потужності різання $f(N)$ на один супорт важкого токарного верстата

На рис.1.3 зображений розподіл застосовуваної частоти обертання n шпинделя важких токарних верстатів. Зона обмежень перекриває різну частину поля розсіювання частот обертання шпинделя для верстатів з різним значенням D_{max} , що пов'язано з конструктивними особливостями верстатів і ще раз підтверджує необхідність врахування типорозміру верстата при визначенні раціональних регламентів експлуатації (рис. 1.4).

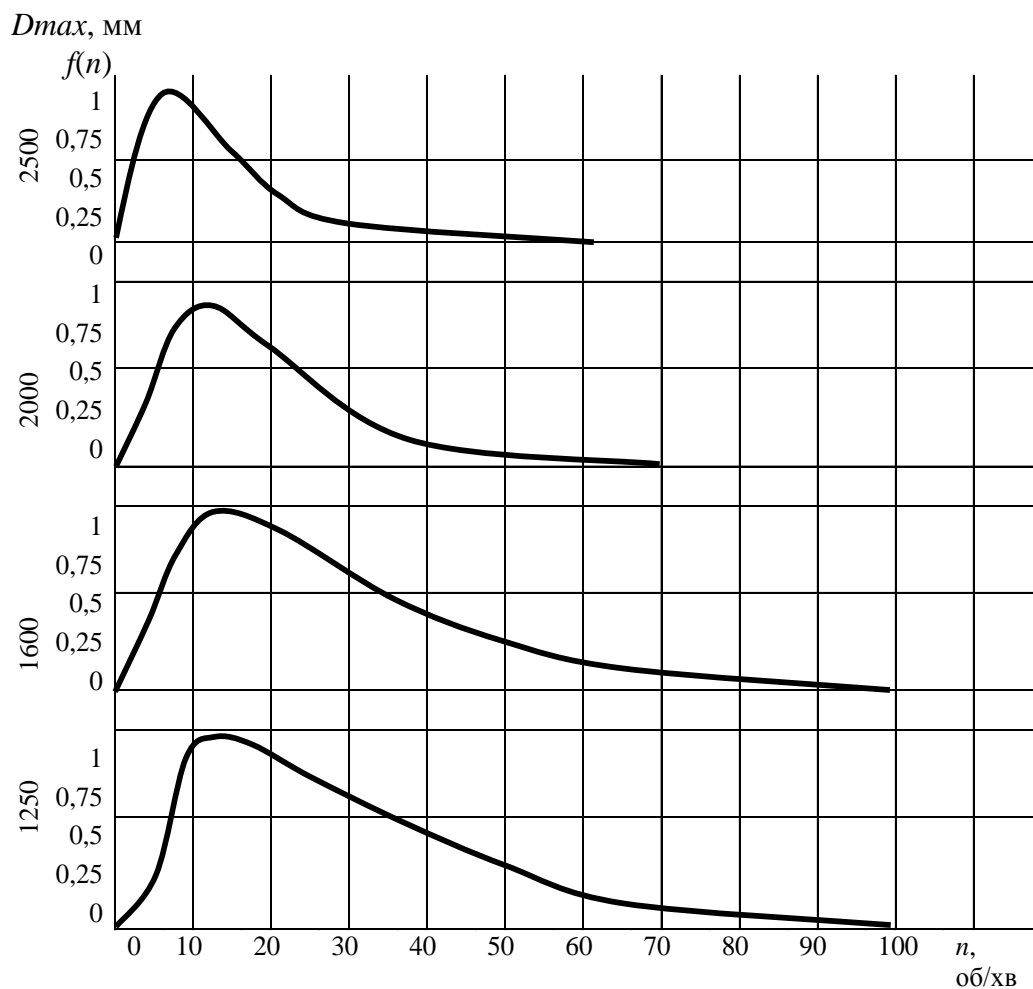


Рисунок 1.3 – Розподілу частоти обертання шпинделя $f(n)$, застосовуваної на важких токарних верстатах

Під час дослідження періоду стійкості різального інструменту важких токарних верстатів фактичний період стійкості різального інструменту при переході від верстатів з $D_{max} \leq 1600$ мм до більших типорозмірів верстатів

зростає. Це пояснюється такими причинами: заміна інструмента здійснюється із супортного майданчика, а не з підлоги, збільшується розмір різця ($H = 80$ мм) і його маса, зростають габарити деталей і погіршується огляд зони різання, зростає маса деталей, їх вартість [47; 133].

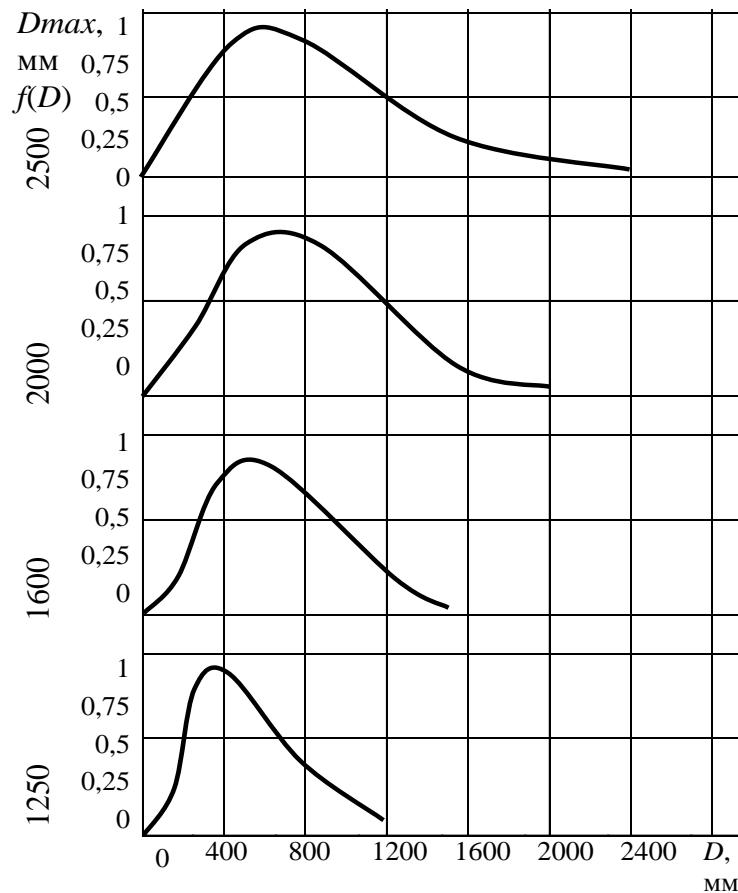


Рисунок 1.4 – Розподіли діаметрів заготовок D , що обробляються на важких токарних верстатах

З підвищенням навантаження на інструмент збільшується коефіцієнт варіації періоду стійкості, що призводить до розширення діапазону його розсіювання. Поряд із середньою стійкістю інструмента одним з найважливіших показників надійності є стійкість із заданою імовірністю $T(P)$ або гамма-відсоткова стійкість, яка визначається залежно від характеру розподілу періоду стійкості. Цей показник надійності має особливе значення при обробленні деталей на важких верстатах з ЧПК.

Дослідження умов експлуатації [15; 32; 44; 46; 72; 113] різальних інструментів при обробленні деталей на важких верстатах показує, що поряд зі зношуванням значне місце має руйнування різальної частини у вигляді викрашувань і руйнувань (рис. 1.5–1.6).



Рисунок 1.5 – Розподіл відмов різальних інструментів при обточуванні деталей на важких верстатах (взагалі)



Рисунок 1.6 – Розподіл відмов різальних інструментів при обробленні на важких верстатах (попереднє оброблення)

Аналіз відмов інструменту виявив також неоднорідність ступеню деградації різних ділянок змінних пластин різців і фрез, характерних для важких верстатів (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Види пошкодження та руйнування змінних пластин

Відмови, у тому числі непередбачені, пов'язані з випадковими коливаннями фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу особливо при попередньому точінні за наявності корки.

На працездатність різального інструменту також впливають розсіювання фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу, його дефектність у вигляді агломератів зерен карбідів і пор, що призводить до нестабільності межі міцності при згинанні й твердості інструментальних твердих сплавів.

Руйнування твердосплавних пластин при обробленні на важких верстатах пов'язано з тим, що великі значення товщини зрізу обумовлюють зростання величини і зони дії напружень розтягу на передній поверхні інструменту.

Наявність відмов різців у значній мірі впливає на ефективність обточування великогабаритних деталей, тому що виникає необхідність затрачувати незапланований час та кошти на їх відновлення.

Тому актуальною проблемою є оптимізація технологій матеріалів і елементів для екстремальних умов за критеріями міцності та роботоздатності. Таким чином, напрямами у розв'язанні проблеми подовження ресурсу інструментів для важкого машинобудування є забезпечення поверхневої та об'ємної міцності. Шляхами отримання інструментальних матеріалів з комплексом необхідних в умовах оброблення на важких верстатах характеристик слід вважати технології модифікації поверхонь, що дозволяють керувати дефектністю та міцністю поверхневих шарів інструментальних матеріалів, а також об'ємну модифікацію матеріалів та інструменту.

1.2 Методи підвищення фізико-механічних властивостей твердосплавних інструментальних матеріалів

Відомі способи підвищення фізико-механічних властивостей інструментальних матеріалів хоча і дозволяють домогтися збільшення зносостійкості інструменту, проте витрати у порівнянні з ефективністю використання таких методів залишаються значними, а у багатьох випадках

неекономічними і недоцільними через втрату інших цінних властивостей, зокрема, наприклад, міцності інструменту в цілому. Тому розроблення нових прогресивних методів зміцнення різального інструменту є важливим завданням зі збільшення терміну служби металооброблювального інструменту.

Особливо актуальною ця задача є для твердосплавних різальних інструментів. Як відомо, тверді сплави мають, з одного боку, високу теплостійкість, що дозволяє різальним інструментам працювати при високих швидкостях різання. З іншого боку, тверді сплави мають низьку міцність, що обмежує їх можливість працювати на попередніх операціях, де інструмент має ударне навантаження, що утворилося при обробленні заготовки, яка виготовлена методами лиття або кування, абразивного пилу, нерівномірність припуску і т. п.

Основні відомі методи підвищення зносостійкості та міцності твердосплавних інструментів можна розділити на такі групи: конструктивні методи; зміцнення механічним наклепом; нанесення зносостійких покриттів; хіміко-термічне оброблення; лазерне зміцнення; плазменно-дугове зміцнення; радіаційне зміцнення; іонне легування; магнітно-абразивне оброблення, оброблення імпульсним магнітним полем.

Вибір того чи іншого методу зміцнення залежить від багатьох факторів, які обумовлюють його ефективність і витрати на здійснення у певних виробничих умовах.

Серед конструктивних методів слід виділити [16; 25]:

- округлення різальних лез, що призводить до зміни напрямку сил різання і зменшення коливань;
- збільшення розмірів небезпечного перетину пластини, можливо її потовщення або розташування її вздовж задньої поверхні;
- збільшення жорсткості опори різальної пластини в державці, шліфування або доведення опорної поверхні пластини, гарт державки, зменшення заднього кута пластини;

– застосування підкладок з високим модулем пружності й опіростисненню при температурі, що виникає у опори.

Ці методи не приводять до збільшення виробничих витрат, але ефективність їх залежить від певних умов експлуатації (матеріал, що оброблюється, режим різання, характеристика обладнання, пристосувань й ін.).

Одним з перспективних способів збільшення міцності інструменту є оброблення робочих поверхонь пластичним деформуванням (ППД): вібраційне, дрібеструйне оброблення [6; 29; 102; 109].

При обробленні ППД по різальних поверхнях наноситься велика кількість ударів, у результаті чого відбувається пластичне деформування і крихко-абразивне зношування цих поверхонь. Пластично деформуються всі фазові складові твердого сплаву, але найбільшою мірою – карбід вольфраму. При цьому дробляться блоки мозаїки, збільшується мікродеформація решітки і виникають стискувальні напруги порядку 100–130 Н/м².

Застосування методів ППД при зміцненні твердосплавних різців дозволило підвищити подачу в 1,1–1,2 разу.

Ефективність методів ППД визначається залежністю міцності від геометричних параметрів, фізико-механічних властивостей матеріалу. При ППД відбувається округлення різальних кромки, що підвищує міцність інструменту.

Однак ефективність округлення різальних кромки і оптимальна величина радіуса округлення залежать перш за все від товщини зрізаного шару і твердості матеріалу, що обробляється. Це обмежує можливості застосування ППД.

Вишукування способу зміцнення, що поєднує у собі можливості досягнення оптимального округлення кромки різців і глибини наклепу, спричинило необхідність вивчення впливу рідини на ефект дрібоструменевий оброблення твердосплавних різців, яке виявилось двояким. З одного боку, рідина зменшує енергію удару і, з іншого боку, видаляє продукти

зношування. Таким чином, інтенсивність пластичного деформування падає, а інтенсивність округлення кромки змінюється у меншому ступені, що має призвести до кращого співвідношення величини радіуса округлення кромки і глибини наклепу.

Застосування рідини при дрібоструменевому обробленні збільшує максимальну величину радіуса округлення на 20 відсотків. У момент досягнення максимальної міцності ступінь деформації у різців обох видів оброблення приблизно однакова, тоді як радіус округлення у різців, які оброблені рідиною, на 10–15 відсотків більше. Це забезпечує збільшення міцності в 1,17 разу. Руйнівна подача при зміцненні без рідини зростає в 1,29 разу, з рідиною – в 1,34 разу.

Вібраційне оброблення являє собою механічний процес знімання найдрібніших частинок матеріалу з поверхні, що обробляється, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування робочими елементами абразивного наповнювача, який здійснює коливальні рухи [29; 81].

Підвищення експлуатаційних властивостей твердосплавного інструменту в результаті його вібраційного оброблення досягається завдяки тому, що остання забезпечує округлення різальних кромки й інших поверхонь різальної частини, сприятливу зміну фізико-механічних властивостей поверхневого шару твердого сплаву. У результаті досліджень було доведено, що близько 60–70 відсотків ефекту при віброзміцненні інструменту досягається за рахунок округлення кромки і 30–40 відсотків – за рахунок зменшення шорсткості та зміни властивостей поверхневого шару. Вібраційне оброблення дуже тривала у часі й тому вимагає значних витрат.

Енергія ударних хвиль [31; 125; 155] знайшла застосування в обробленні металокерамічних сплавів для підвищення їх міцності й стійкості.

Пластину зі сплаву ВК8 поміщали у свинцевий контейнер, вибір якого в якості імпульсної «пастки» був обумовлений відносною рівністю акустичних жорсткостей сплаву ВК8 і свинцю. Формування плоского фронту

детонації здійснено плоскохвильовим генератором. «Той, що біжить» по поверхні фронт детонації, формує у матеріалі косу ударну хвилю, інтенсивність якої падає у міру її проходження – вглиб середовища. При такому поширенні ударного фронту в матеріалі створюються вигідні умови зсуву з точки зору термодинаміки, що призводять до помітного зміцнення компактних матеріалів і неминуче викликають руйнування крихких середовищ. Саме таке руйнування склало 60 відсотків обсягу твердого сплаву. Умови повного збереження пластини було досягнуто за допомогою експериментально знайденого закону загасання плоских ударних хвиль у міді.

Дослідження мікроструктури показали значне подрібнення зерен карбиду вольфраму і уточнення кобальтової зв'язки за рахунок її деформації, що і зумовило підвищення мікротвердості в 1,4 разу. У результаті випробувань було встановлено, що період стійкості підвищувався у 2 рази. Це пояснюється подрібненням карбідів вольфраму, зміцненням кобальтової зв'язки і появою стислих напруг на поверхні пластини.

Нанесення твердого покриття [1; 20; 77; 80; 92; 101; 102; 123; 127], стійкого до стирання, на твердосплавні пластини дозволяє збільшити довговічність різальних кромek у кілька разів у порівнянні зі звичайними пластинками або при тій же довговічності підвищити швидкість різання.

Пластинам з покриттям карбідом титану (TiC) товщиною 5–6 мкм притаманний типовий недолік : наявність знеуглецьованого крихкого шару між покриттям і основою. Внаслідок цього їх можна було застосовувати тільки при безперервному різанні.

Різальні пластини з покриттям завдяки вдосконаленій технології виготовлення не мали зазначеного недоліку. Товщину покриття цих пластин збільшили до 7–8 мкм, а в якості основи застосували спеціальні марки твердого сплаву. Це дозволило використовувати пластини при переривчастому різанні.

Пластини, що мають покриття товщиною до 10 мкм, складаються з 2 і більше найтонших шарів різного складу. На основу найчастіше наносять карбід титану (TiC), а на нього – нітрид титану (TiN) або окис алюмінію (Al₂O₃). Застосування пластин з багат шаровим покриттям [2] дозволило збільшити продуктивність оброблення в 1,5 разу в порівнянні з пластинками, які мають одношарове покриття (TiC).

Однак пластини з покриттям мають ряд недоліків. При переточуванні всі переваги у порівнянні з пластинами без покриття анулюються. Їх не можна застосувати там, де необхідна дуже гостра різальна кромка, тому що при нанесенні покриття завжди неминуче округляються різальні кромки. Вони мало придатні для оброблення легких металів, дерева й інших матеріалів з невеликою твердістю. Непридатні пластини з покриттям у випадках, коли в'язкість їх основного металу недостатня для обраної операції оброблення.

Одним зі способів підвищення стійкості твердосплавного інструменту [73; 102; 115; 116; 134; 141; 153] є термічне оброблення різальної пластини. Найбільший ефект при використанні цього методу досягається шляхом термічного оброблення у газовому середовищі: N₂ (40–60 %), CO (15–20 %), H₂ (30–35 %)

При цьому на поверхні твердосплавних пластини утворюється нітрид титану (TiN), який має достатню теплопровідність, стійкість до окислення при високих температурах, порівняно малу крихкість і високу абразивну зносостійкість.

Метод електроіскрового легування [93; 102; 121; 145] твердого сплаву полягає у перенесенні імпульсом з електричною іскрою частки матеріалу анода (електрода – матеріалу, що зміцнюється) на матеріал катода (інструмент). Поверхневий шар інструмента насичується методом дифузії. Як матеріал анода використовується найчастіше графітові або мідно-графітові електроди. При зміцненні цим способом період стійкості інструмента підвищується в 1,5–3 рази. Це пояснюється тим, що поверхня твердого

сплаву науглероджується і внаслідок нагрівання через високу (4000–10000°C) температуру іскри і швидкого охолодження утворюється цементаційна кірка, яка і оберігає робочу поверхню інструменту від швидкого стирання і затуплення.

Лазерне оброблення сприяє подрібненню і насиченню дислокаціями структури поверхневого шару інструментального матеріалу, що призводить до збільшення твердості, а отже, і значного збільшення зносостійкості інструменту. Лазерне поверхнєве зміцнення характеризується збереженням первісної чистоти верхнього шару виробу і забезпечує локальність процесу [60; 71; 94; 102; 106; 126; 128; 138; 144; 147; 158]. Але технологічний процес поверхневого променевого оброблення складний, залежить від ряду умовностей, вимагає при опроміненні багатолезового інструменту значних енергетичних витрат і тривалий за часом.

Відзначимо основні недоліки поверхневого лазерного зміцнення:

- зміцнення проводиться тільки у місці примикання робочої поверхні до різальної кромки;
- одночасне зміцнення обох поверхонь (передньої і задньої) неприпустимо;
- різальна кромка після лазерного термооброблення ослаблена проти дії сил крихкого руйнування;
- процес тривалий у часі (при зміцненні багатолезового інструменту) і вимагає значних енергетичних витрат;
- при переточуванні інструменту усталений шар видаляється.

Перевагою зазначених методів є те, що через зміни хімічного складу поверхні матеріалу виходить збагачений шар однакової товщини з певними фізико-механічними властивостями.

До недоліків цих методів можна віднести:

- низьку продуктивність;
- неможливість застосування для інструментів невеликого діаметра (до 5 мм) або з тонкою кромкою (викривлення, крихкість і т. п.);

– всі переваги після переточування губляться.

Суть методу плазмено-дугового зміцнення (ПДЗ) складається в нанесенні зносостійкого тонкопліночного покриття з одночасним плазмовим загартуванням приповерхневого шару [19; 78; 103; 122; 134; 139]. Покриття є продуктом плазмохімічних реакцій речовин, які пройшли через дуговий плазмотрон, гартування відбувається завдяки локальному впливу високотемпературного плазмового струму.

Ефект ПДЗ досягається у результаті зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару збільшується мікротвердість, зменшується коефіцієнт тертя, створюється напруга стискання і заліковування мікродефектів.

Такий метод дозволяє підвищити період стійкості різального інструмента до 3 разів.

Спроби застосувати спосіб радіаційного зміцнення твердосплавних пластин протонами довели його перспективність і можливе застосування для підвищення стійкості та надійності різальних інструментів.

У результаті оброблення протонами [82; 117; 140] фізико-механічні властивості твердого сплаву можуть значно змінюватися. Внаслідок перетворення кристалічної структури виникають вакантні вузли, які перешкоджають утворенню дислокацій, за рахунок цього відбувається зміцнення матеріалу. Всі ці ефекти у тій чи іншій мірі мають впливати на структуру і твердість поверхневого шару, а отже, і на стійкість інструменту.

Метод іонної імплантації [21; 23; 64; 96; 102; 142; 156; 157] застосовується для зміни механічних властивостей різних металів. Метод полягає в імплантації іонів ряду елементів (N^+ , B^+ , In^+ , $(Ti+N)$, $(Ti + B)$) на поверхню твердосплавних пластин і дозволяє нанести багат шарові покриття [2]. Досліди показали, що період стійкості пластин з твердого сплаву з багат шаровим покриттям збільшується в 1,4–1,8 разу.

Одним з перспективних методів фінішних полірувально-зміцнювального оброблення інструменту є метод магнітно-абразивного

оброблення (МАО), реалізований в умовах великих робочих щілин, коли забезпечується комплексний вплив на оброблювану поверхню і поверхневий шар деталей. Аналіз умов взаємодії МАО в умовах великих магнітних щілин – це насамперед оброблення при активній фрикційно-ударній взаємодії оброблюваної поверхні з магнітно-абразивним інструментом (МАІ), що формується у процесі оброблення [65; 161]. Умовно таку взаємодію можна розділити на два процеси:

- ударний, аналогічний взаємодії при використанні струминних методів оброблення;
- фрикційний, аналогічний взаємодії при терті шорсткуватих поверхонь.

При взаємодії оброблюваної поверхні з МАІ відбуваються такі зміни:

1. Зміна мікрорельєфу поверхні, що відбувається або у результаті пружного-пластичного і пластичного деформування поверхні та поверхневого шару або у процесі мікрорізання;
2. Зміна напруженого стану поверхневого шару деталей;
3. Структурні та фазові перетворення у поверхневому шарі.

Друга і третя групи змін, що відбуваються у процесі МАО і підтвержені експериментально, є наслідком ефектів, що виникають при пластичній і пружно-пластичній деформації оброблюваної поверхні.

Виконані дослідження дозволили чітко ідентифікувати процеси мікрорізання і пластичного деформування мікронерівностей і поверхневого шару при МАО в умовах великих магнітних щілин і слабких магнітних полів. Показано, що процес МАО в зазначених умовах відбувається у режимі ударно-фрикційної взаємодії МАІ і оброблюваної поверхні.

При реалізації процесів переважного мікрорізання або мікропластичного деформування оброблюваних поверхонь суттєвим фактором є розмір, геометричні характеристики і форма частинок магнітно-абразивних порошкових матеріалів. Показано, що МАО свердел після їх переточування із застосуванням округлих рівновісних порошоків забезпечує

можливості зміцнення поверхневого шару, зниження шорсткості робочих поверхонь інструменту і підвищення їх стійкості більш ніж у 1,7 разу.

Однак у зв'язку з інтенсифікацією виробництва виникла одна з найгостріших проблем у розробленні та застосуванні більш ефективних методів зміцнення металообробного інструменту.

Оброблення імпульсним магнітним полем [50; 68; 102; 118; 119; 143; 162] базується на тому, що вихрове магнітне поле взаємодіє з пластиною твердого сплаву, покращує структуру і властивості останньої. При такому зміцненні інструмент розміщують у індукторі так, щоб центр ваги був зміщений відносно геометричного центру соленоїда. Завдяки цьому при вмиканні пристрою інструмент втягується полем у соленоїд з прискоренням і здійснює щодо його геометричного центру затухальні коливання, амплітуда яких з часом зменшується під дією сили тертя і дорівнює нулю.

Внаслідок неоднорідності кристалічної структури матеріалу генеруються вихорові струми. При цьому теплота, що виділяється, розсіюється по об'єму інструменту таким чином, що градієнт теплового поля тим вище, чим складніша і неоднорідніша мікроструктура сплаву. У місцях структурної неоднорідності, а також концентрації напружень виникає наведена теплота, яка у десятки разів збільшує локальну температуру перенапружених ділянок. У результаті цього інструмент піддається "гвинтовому стисненню", при якому електродинамічні сили ущільнюють і впорядковують кристали структури, внаслідок чого знижується їхнє внутрішнє перенапруження.

Застосування магнітних полів у процесах різання й зміцнення різального інструменту є перспективним напрямком розвитку високих технологій у механічній обробці. Підвищення стійкості інструменту може бути досягнуте за рахунок впливу магнітного поля або на умови процесу різання, або на структуру й фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів з феромагнітними компонентами. Відповідно розрізняють два напрямки застосування магнітних полів у механічній обробці. Перше з них

передбачає підвищення стійкості інструмента при різанні в магнітному полі, друге припускає підвищення стійкісних характеристик різального інструменту після оброблення у постійних, змінних й імпульсних магнітних полях за рахунок змін структури й фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу. Підвищення періоду стійкості інструмента при різанні в магнітному полі різні дослідники пояснюють відводом тепла від інструмента за рахунок прояву термомагнітного ефекту Риги – Ледюка [59; 105], підвищенням механічних властивостей інструментального матеріалу за рахунок упорядкування його зернистості [38], виникненням зусилля, що викликає вигинання кореня стружки, скорочення площі контакту стружки з інструментом, зміни кута зрушення й зниженні показників різання. Ефект підвищення періоду стійкості при різанні в магнітному полі залежить від напрямку магнітного потоку, величини магнітної індукції [37] і режимів різання. Вплив зовнішнього магнітного поля на умови процесу різання дозволяє, крім підвищення періоду стійкості інструмента, збільшити оптимальну швидкість різання, зменшити оптимальне поверхнєве зношування [37; 119; 143], поліпшити якість обробленої поверхні [36; 43].

З іншого боку, у роботах [7; 33; 35; 38; 42 й ін.] показано, що інструмент, яких піддано магнітному обробленню, має підвищений період стійкості та під час відсутності зовнішнього магнітного поля в зоні різання. У цьому випадку підвищення стійкості інструмента обумовлено тільки змінами структури й фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу після магнітного оброблення. У літературі наведені різні відомості про підвищення періоду стійкості різального інструменту в результаті магнітного оброблення і його причин. Підвищення стійкості різців і сверدل зі швидкорізальних сталей після оброблення у постійному й змінному магнітному полях пояснюється розпадом залишкового аустеніту у поверхневому, удруге загартованому верстві сталі, що утворилися у результаті заточення інструмента [120; 124; 136]. У роботах [26; 27; 30] ефект підвищення періоду стійкості швидкорізального інструменту після

оброблення у постійних магнітних полях зв'язується з полярністю його робочої частини після намагнічування. У роботах [5; 38; 42] зазначене підвищення періоду стійкості сталевого інструменту при обробленні статичним магнітним полем або з однократним впливом поля, або з рухом інструменту, який зміцнений, у магнітному полі. У роботі [4] зазначене зменшення зношування інструментальних сталей у результаті перемагнічування відносно слабкими полями, що пояснюється авторами з погляду зміни структури й властивостей поверхні сталі за рахунок дифузії у нього атомів вольфраму й інших елементів із внутрішніх обсягів матеріалу після впливу поля.

Найбільш перспективним напрямком використання магнітних полів для підвищення періоду стійкості різального інструменту з матеріалів, що містять ферромагнітні компоненти, є оброблення імпульсним магнітним полем (ОІМП), що дозволяє одержувати найбільш стабільне підвищення стійкості інструмента за рахунок зміни фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу, що досягає у результаті реалізації комплексу структурних змін, що мають магнітострикційну природу. Імпульсний характер магнітного поля при ОІМП дозволяє легко здійснити інтенсивний енергетичний вплив на матеріал за допомогою електромагнітних хвиль [53]. Своєрідне імпульсне електромагнітне струшування конденсованих систем з безліччю реальних дефектів прискорює темпи релаксації й структурної перебудови у них [41]. Вибір імпульсного магнітного поля також дозволив спростити вимоги до джерел живлення й зробити установки компактними й портативними. При цьому устаткування для ОІМП може бути встановлено у механічних цехах підприємства, а параметри режимів оброблення варіюються у залежності від інструментального матеріалу з метою оптимізації характеристик пластини [28; 91].

Фізичні основи ОІМП стосовно інструмента зі швидкорізальних сталей сформульовані С. М. Постніковим і представниками його наукової школи у роботах [56, 84–87]. Базою теорії процесів ОІМП є фундаментальні положення фізики магнетизму.

Зміна властивостей феромагнетиків після ОІМП досягається за рахунок спрямованої орієнтації вільних електронів речовини зовнішнім полем, внаслідок чого виникають фізичні передумови змін у структурі й напруженому стані матеріалу. На підставі робіт [98; 102] можна затверджувати, що при ОІМП реалізується комплексний вплив на матеріал магнітострикційних процесів і зумовлених ними механічних деформацій, теплових і електромагнітних вихрових потоків, локалізованих у місцях концентрації магнітного потоку й процесів, що направлено орієнтують, спінові характеристики зовнішніх електронів атомів прикордонної зони контакту зерен. ОІМП представляє сполучення електромагнітного й термодинамічного способів керування нерівновагою структурою речовини. Зміни в структурі матеріалу в результаті ОІМП можуть здійснюватися за рахунок силового (магнітострикційного) або теплового фактору. Як показано в роботі [56], структурні зміни у матеріалі відбуваються у результаті активації дислокаційних або дифузійних процесів.

Згідно С. М. Постнікову [84], при ОІМП швидкорізальних сталей відбувається взаємодія пружного поля, обумовленого магнітострикційною деформацією, із пружним полем власної реальної дислокаційної структури матеріалу. Ця взаємодія приводить до появи локальних перенапруг, у місцях розташування яких різко зростає ймовірність термофлуктуаційного розриву міжатомних напружених зв'язків. У тих місцях, де локальні перенапруги перевищують межі пружності матеріалу, формуються вогнища пластичної деформації й інтенсифікуються процеси розмноження й переміщення дислокацій. Зі збільшенням щільності дислокацій сталь здобуває своєрідний наклеп, що виражається у зміні параметра кристалічних решіток мартенситу. Підвищення механічних характеристик швидкорізальної сталі у результаті ОІМП обумовлено виділенням з металевої матриці мілкодисперсних карбідних часток у результаті магнітодисперсійного твердіння, обумовленого протіканням вищезгаданих структурних процесів. Саме концепція С. М. Постнікова про магнітострикційне зміцнення й магнітодисперсійне твердіння швидкорізальних сталей є єдиною цілісною науковою теорією ОІМП різального інструменту.

Результати досліджень впливу ОІМП на стійкість різального інструменту й фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів представлені в роботах [24; 40; 50; 52; 74; 97 та ін.].

Величина ефекту підвищення механічних властивостей інструментального матеріалу, як і величина ефекту підвищення стійкості різального інструменту, залежать від режимів ОІМП (напруженості імпульсного магнітного поля, тривалості ОІМП, часу витримки після ОІМП), при цьому визначальний вплив має напруженість магнітного поля.

Вплив напруженості магнітного поля на стійкість різального інструменту й фізико-механічні характеристики інструментальних матеріалів після ОІМП відзначено в роботах [40; 52]. Існує досить вузький інтервал значень напруженості імпульсного магнітного поля, оброблення в якому поліпшує різальні властивості інструмента. Відзначався екстремальний характер залежності фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу, зношування швидкорізальних сталей і стійкості різального інструменту від напруженості магнітного поля з наявністю певного оптимуму напруженості магнітного поля, що забезпечує максимум твердості сталі, періоду стійкості інструмента й мінімум зношування сталі. Це підтверджує теоретичне затвердження Б. В. Малигіна [69; 70] про існування для кожного матеріалу певної величини напруженості магнітного поля (а отже, і величини магнітної енергії), що поглинається матеріалом протягом часу магнітного оброблення й максимально поліпшує його механічні властивості.

З підвищенням тривалості ОІМП до певної межі підвищуються стійкість інструмента й фізико-механічні властивості сталі [7; 83]. Для завершення перетворення електромагнітної енергії в енергію внутрішніх перетворень у матеріалі й стабілізації нової структури й властивостей, придбаних матеріалом після ОІМП, необхідна витримка інструмента протягом певного часу не менше часу стабілізації $t_{ст}$, за яке відбувається зміна фізико-механічних властивостей матеріалу, що має характер загасальних коливань, що є проявом загальної природи довгострокових релаксацій

фізичних параметрів конденсованих середовищ після впливу магнітного поля [38; 129; 131; 146]. Вплив магнітного стану й полярності робочої частини інструмента на його стійкість не є істотним [34].

Питання впливу режимів різання на стійкість інструмента, підданого ОІМП або який знаходиться у зовнішньому магнітному полі, щонайкраще розглянуті в дослідженнях представників наукової школи А. Д. Макарова [67]. У них, крім підвищення довжини шляху різання, відзначається й підвищення оптимальної швидкості різання в результаті ОІМП, а також наведення на зону різання зовнішнього магнітного поля.

Певний інтерес представляють роботи, присвячені застосуванню ОІМП і різанню в магнітному полі для підвищення стійкості інструмента при обробленні важкооброблюваних матеріалів [13; 97; 98; 137; 154] і створенню комбінованих технологій на основі ОІМП. Одержуваний ефект підвищення якості від магнітно-імпульсного оброблення пояснюється метастабільним станом системи й резонансним відгуком її компонентів на динамічний електромагнітний вплив.

Для комплексного дослідження ОІМП також важливо вивчити механізм зміни експлуатаційних властивостей інструментів після оброблення, пов'язаного з ефектом післядії. ОІМП переводить систему в стан з більше низькою вільною енергією через стан з підвищеною вільною енергією. Зміна щільності енергії речовини при внесенні його в однорідне магнітне поле (якимось можна вважати поле в соленоїді з певними допущеннями):

$$dW = TdS - IdH - pdV . \quad (1.1)$$

Зміна вільної енергії при цьому:

$$dG = -SdT - IdH + Vdp . \quad (1.2)$$

При обробленні твердих сплавів вивчався вплив ОІМП на структуру й властивості складових компонентів. Відомо, що міцність твердих сплавів багато в чому визначається сполучною фазою. Спостереження за поширенням руйнівальної тріщини показали, що у сплавах ВК і ТТК руйнівальна тріщина поширюється в основному по кобальтовій фазі, а у сплавах ТК, де руйнівальна тріщина поширюється в основному по фазі $(Ti,W)C$, кобальтова складова може гальмувати руйнівальну тріщину. Кобальтова фаза твердих сплавів являє собою твердий розчин W і C у кубічному C_0 .

Упорядковане розташування атомів відрізняється більш низькою внутрішньою енергією у порівнянні з неупорядкованим, особливо, якщо розподіл атомів по певних вузлах кристалічних решіток відбувається при порівняно низькій температурі, коли ентропія, пов'язана з неупорядкованістю, відіграє менш істотну роль.

Зміна властивостей кобальтової фази після ОІМП зводиться до перебудови атомів під впливом магнітного поля. Енергія, необхідна для рекристалізації або виділення дисперсної фази, вище енергії магнітного поля, що створює ефект ОІМП. Отже, ОІМП не може впливати на фазовий склад або текстуру матеріалу. Однак виділення фази, кристалізація або напруги можуть розвиватися уздовж таких кристалографічних напрямків, що енергія кристалізації або виділення буде мінімальна у певному напрямку, що залежить від напрямку магнітного поля.

У будь-якому неоднорідному матеріалі концентрація буде мінятися приблизно періодично щодо якогось середнього значення (одномірний випадок):

$$C(x) = C_0 + C_m \cos(\pi x/l). \quad (1.3)$$

Це відповідає зміні концентрації на відстані l уздовж осі x від максимального значення $C_0 + C_m$ до мінімального $C_0 - C_m$. Ці градієнти

будуть поступово зменшуватися за рахунок переміщення розчиненого елемента із зон з більш високою концентрацією в зони з більш низькою концентрацією. Якщо коефіцієнт дифузії не залежить від складу, то

$$C(x, t) = C_0 + C_m \cos(\pi x/l) \exp(-\pi^2 D t/l^2). \quad (1.4)$$

Це означає, що перехід від концентрації C к кінцевої концентрації C_0 у будь-якій точці зразка

$$C - C_0 \approx \exp(-t/\tau), \quad (1.5)$$

де τ – час релаксації.

Зменшенню τ сприяє збільшення коефіцієнта дифузії D і зменшення відстані l максимумами й мінімумами концентрації.

Для кубічних решіток коефіцієнт дифузії:

$$D = 1/6 \Gamma \alpha^2, \quad (1.6)$$

де Γ – частота перескоків атомів;

α – період решітки.

Частота перескоків згідно [2]:

$$\Gamma = z \nu \exp(-\Delta G/RT), \quad (1.7)$$

де z – кількість сусідніх атомів;

ν – частка коливань у певному напрямку, що приведе до перескоків атомів;

ΔG – зміна вільної енергії решітки.

Збільшення стабільності різальних властивостей твердого сплаву, про яке свідчить зменшення коефіцієнта варіації стійкості й підвищення гамма-процентної стійкості інструмента, пов'язане з гомогенізацією кобальтової фази під впливом імпульсного магнітного поля. Застосування віброобразивного оброблення [249] перед впливом магнітного поля підсилює інтенсивність переходу напруг у кобальтовій фазі від розтягувальних до стискальних і, отже, до підвищення міцності й стабільності різальних властивостей інструмента.

На кафедрі комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів і технологій (КМСІТ) Донбаської державної машинобудівної академії оброблення імпульсним магнітним полем (ОІМП) твёрдосплавних різальних пластин проводиться на установці, яка складається з генератора імпульсів, блока живлення та індуктора. Генератор імпульсів і блок живлення виконані у вигляді окремої стійки електроустаткування. Індуктор з'єднується з генератором кабелем.

Для оброблення невеликих виробів індуктор встановлюється на горизонтальній діелектричній діамагнітній поверхні (пластик, дерево, гума й т. п.), вісь індуктора має бути вертикальна. Вироби розміщуються у середину індуктора й проводиться сеанс оброблення, який триває 120 с.

Технічна характеристика генератора й індукторів наведена у табл. 1.1–1.2. Технологічним параметром керування блоком є робоча напруга установки (розрядна напруга конденсатора, ланцюги генерації імпульсів магнітного поля), відображено на передній панелі блоку генератора (рис. 1.8, а). Регулювання робочої напруги здійснюється обертанням рукоятки.

Для реалізації оброблення розроблені різні конструкції магнітного індуктора (рис. 1.8, б). Проведений аналіз геометрії соленоїдів для магнітних індукторів з погляду їх оптимальності й можливості забезпечити необхідні значення напруженості магнітного поля і частоти імпульсів. При збільшенні довжини соленоїда спостерігається ослаблення магнітного поля у робочому зазорі.

Таблиця 1.1 – Коротка технічна характеристика комплексу для ОІМПІ

Параметр комплексу	Величина параметра
Діапазон напруженості магнітного поля H , А/м	$0,2 \cdot 10^5 - 2,2 \cdot 10^5$
Робоча напруга	100–900 В
Індуктивність індуктора	225 мкГн
Частота проходження імпульсів f , Гц	1–10
Тривалість імпульсу τ , мс	60



а)



б)



в)

а – блок генератора б, в – конструкції магнітного індуктора

Рисунок 1.8 – Комплекс для генерації імпульсного магнітного поля

Напруженість магнітного поля у центрі індуктора визначена за формулою:

$$H = \mu_0 I_0 \frac{W}{l}, \quad (1.8)$$

де I – умовний струм у витку, А;

L – індуктивність, Гн;

W – кількість витків;

l – довжина обмотки, мм;

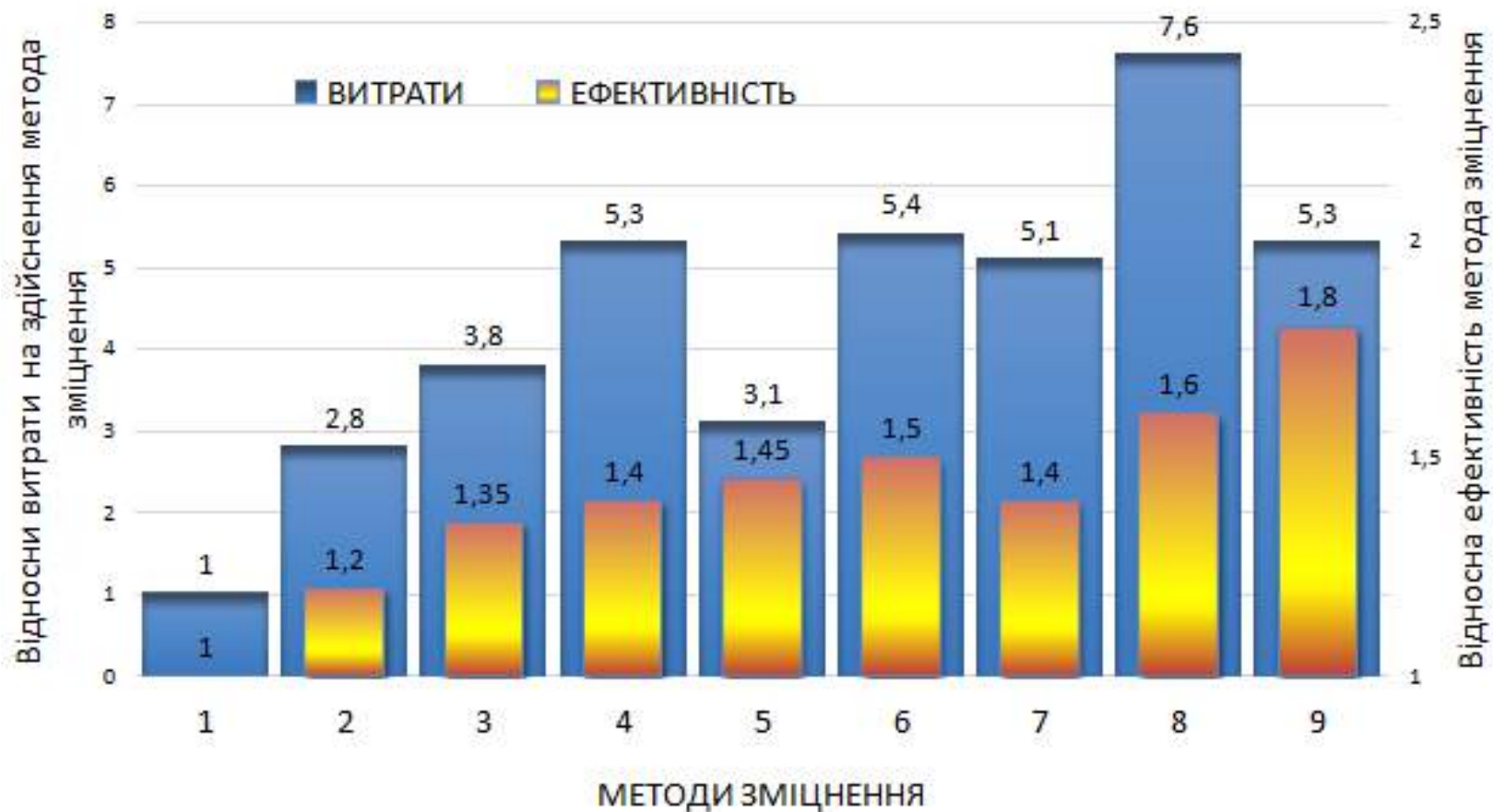
μ_0 – магнітна постійна (для вакууму $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Таблиця 1.2 – Коротка технічна характеристика індукторів

Параметри	Величина параметра	
	Індуктор 1	Індуктор 2
Індуктивність, мкГн	220	220
Довжина, мм	90	70
Кількість витків, мм	90	103
Діаметр проведення, мм	3	3
Внутрішній діаметр індуктора, мм	40	32

Відповідно до методики розрахунку виробничих витрат і ефективності виробництва, яка представлена у роботі, була побудована гістограма (рисунок 1.9).

Вхідними даними для побудови рисунка 1.6 є результати виробничих випробувань (додаток А), зміцнених ОІМП твердосплавних різців, на ПрАТ «НКМЗ».



1 – конструктивні методи; 2 – зміцнення механічним наклепом; 3 – нанесення зносостійких покриттів;
 4 – імпульсне лазерне оброблення; 5 – плазмено-дугове зміцнення; 6 – радіаційне зміцнення; 7 – іонне легування;
 8 – поверхневе лазерне зміцнення; 9 – оброблення імпульсним магнітним полем.

Рисунок 1.9 – Залежність витрат й ефективності виробництва від методів зміцнення різальних інструментів з твердого сплаву ВК6

Як видно з рисунка 1.9, найкраще поєднання величини витрат і ефективності виробництва спостерігається у методі магнітно-імпульсного оброблення. Висока ефективність пояснюється об'ємним характером зміцнення, внаслідок чого після переточування зберігається підвищення стійкості. Для інших методів після переточування для підвищення стійкості необхідно повторно проводити зміцнення.

1.3 Мета і завдання досліджень

На підставі викладених вище літературних даних і наведених міркувань була сформульована мета цієї роботи.

Для здійснення поставленої мети треба вирішити такі завдання:

- проаналізувати умови роботи різальних інструментів на підприємствах важкого машинобудування;
- дослідити зносостійкість твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, за допомогою форсованих методів випробувань і моделювання процесу різання;
- встановити механізм зміни властивостей твердого сплаву під дією оброблення імпульсним магнітним полем; виділити основні фактори, що впливають на зміну зносостійкості твердого сплаву під дією оброблення імпульсним магнітним полем;
- дослідити вплив оброблення імпульсним магнітним полем на працездатність твердосплавних різальних інструментів у виробничих умовах;
- встановити вплив зміцнення на продуктивність, собівартість операції та інструментальні витрати;
- впровадити результати досліджень на підприємствах важкого машинобудування, дослідити взаємозв'язок параметрів ОІМП і параметрів процесу механічного оброблення деталей на ефективність виробництва.

2 РОЗДІЛ

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОБРОБЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ (ОІМП) НА МІЦНІСТЬ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

2.1 Методика проведення лабораторних досліджень

Для попереднього оцінювання впливу оброблення імпульсним магнітним полем на зносостійкість твердосплавних інструментів були проведені їх форсовані випробування [3]. На відміну від повних стійкісних випробувань, форсовані випробування дозволяють скоротити час випробувань, витрати інструментального і матеріалу, який обробляється.

В основі форсованих методів лежать фізичні принципи теорії надійності, а саме: принцип Седякіна, гіпотеза Майнера, принцип спадковості. Основний фізичний принцип надійності виходить з того, що реальна система втрачає працездатність через різного роду впливи, в той же час кожен елемент системи і система в цілому до початку експлуатації має деякий запас надійності – ресурс. Під час експлуатації цей ресурс витрачається з деякою швидкістю, обумовленою режимами і умовами експлуатації.

Принцип Седякіна має місце при виконанні таких умов:

– з переведенням інструменту з одного режиму роботи в інший не має відбуватися докорінної зміни процесів, що протікають у матеріалі інструменту;

– у різних режимах роботи інструменту мають діяти ті самі руйнівальні фактори, причому може змінюватися лише інтенсивність зазначених факторів.

Також було використано уточнення принципу Седякіна, яке наведене у роботі [76].

Принцип екстраполяції за навантаженням стосовно твердосплавних інструментів може бути реалізований шляхом ступінчастого (поступового) збільшення подачі та методами ступінчастого та безступінчастого (торцевого точіння) збільшення швидкості різання. У першому випадку досліджується вплив поступового збільшення навантаження на характеристики міцності інструментального матеріалу, а в другому – інтенсивність зношування матеріалу при різному діапазоні швидкостей різання.

Під час проведення форсованих випробувань має виконуватися однаковість матеріалу, який обробляється, повне управління процесом різання, забезпечення форсованих режимів різання, чітке дотримання критеріїв заміни інструменту.

2.1.1 Метод ступінчасто-збільшувальних режимів різання

Випробування на зносостійкість за умови використання методу ступінчасто-збільшувальної швидкості різання полягали у визначенні швидкості різання, при якій зношування досягало нормативного критерію затуплення [57;159] за час, менший часу роботи на ступені.

Початкову швидкість різання V_1 встановлювали дорівнюваною нормативному значенню для випробувальної марки інструментального матеріалу і далі підвищували ступенями. Коефіцієнт геометричної прогресії ряду швидкостей різання $\varphi_{ст}$ брали дорівнювальним 1,26 відповідно до конструкції коробки швидкостей верстата 1К62, на якому проводилися випробування.

Швидкість корегували так, щоб кількість ступенів швидкостей різання до зношування дорівнювала 3–5.

Тривалість роботи на ступені приймалася дорівнюваною 60 секундам. Вибір глибини різання, подачі та критерію затуплення інструменту проводився згідно з нормативами.

Була випробувана марка твердого сплаву Т5К10. Випробування проводилися на одній заготовці від заднього центру до кулачків. Запуск різців здійснювався в такій послідовності:

– інструменти партій 1 (вихідні інструменти) та 2 (інструменти, які зміцнені ОІМП) випробували на швидкості різання V_1 протягом часу τ_{cm} кожному;

– потім інструменти партій 1 та 2 випробували на швидкості різання V_2 протягом часу τ_{cm} кожний;

– потім інструменти партій 1 та 2 на швидкості V_3 тощо до зносу.

Мінімальна кількість дослідів $n = 7$ [39].

Після кожного ступеня різання вимірювали знос по головній задній поверхні. Вимірювання зносу проводили поза верстата за допомогою лупи до пресу Бринеля. Після 3 ступенів різання зношення вимірювали через кожні 20 секунд різання на встановленій швидкості різання.

Під час випробувань фіксували швидкість різання, при якій зношування досягає заданого критерію затуплення.

За результатами випробувань розраховували середнє значення швидкості різання, при якій сталося зношення для кожної партії та швидкість зношування, яка визначалася як відношення приросту зношування до часу, за який відбулося це збільшення:

$$V_3 = \frac{\Delta\delta}{\tau_i}, \quad (2.1)$$

де $\Delta\delta$ – приріст зношування за час τ_i .

Постійні значення випробувань наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати лабораторних випробувань інструментів, які зміцнені ОІМП, методом ступінчасто-збільшувальної швидкості різання

Наявність зміцнення	Марка твердого сплаву	Матеріал, що обробляється	Постійна режиму різання		Ступені швидкості різання, м/хв	Швидкість зношування V_z , мм/хв	Коефіцієнт варіації K_{vu}
			глибина різання t , мм	подача S , мм			
без ОІМП	Т5К10	сталь 40Х	2	0,33	68...72	0,15	0,20
					90...94	0,02	
					116...120	0,01	
					156...160	0,02	
ОІМП	Т5К10	сталь 40Х	2	0,33	68...72	0,035	0,15
					90...94	0,05	
					116...120	0,03	
					156...160	0,025	
					258...260	0,04	
Без ОІМП	Т5К10	сталь 40Х	2	0,58	84...88	0,34	0,25
					100...104	0,15	
					126...130	0,12	
ОІМП	Т5К10	сталь 40Х	2	0,58	84...88	0,17	0,18
					100...104	0,33	
					126...130	0,3	

Результати випробувань інструментів методом ступінчасто-збільшувальної швидкості різання представлені на рисунку 2.1 і в таблиці 2.1 (довірчий інтервал: $\Delta V_u = \pm 0,016$ мм/хв). З цих даних видно, що при більш низьких швидкостях різання ($V = 68\text{--}88$ м/хв) швидкість зношування для інструментів, які зміцнені ОІМП, істотно знижується (у 2–2,3 разу) у порівнянні з незміцненими інструментами. При подальшому збільшенні швидкості різання швидкість зношування зміцнених різців вже, навпаки, буде вище у порівнянні з незміцненими різцями в 2–3 рази.

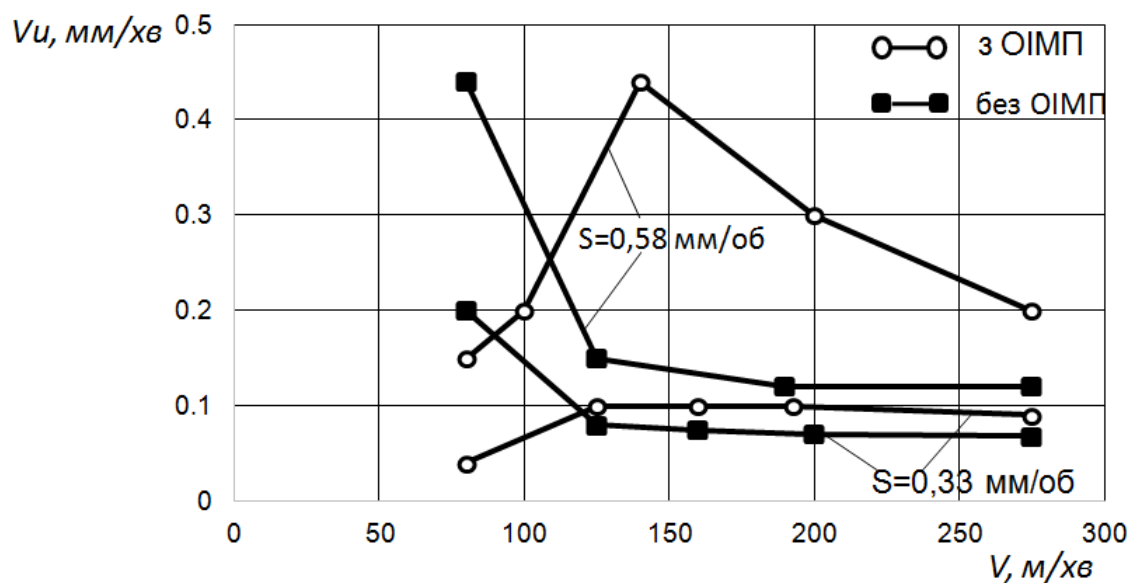


Рисунок 2.1 – Вплив швидкості різання на швидкість зношування інструменту з твердого сплаву Т5К10 при подачі S

З цього зроблено висновок, що ефект зміцнення дійсно проявляється при більш низьких швидкостях різання, тобто при попередньому обробленні, яке відбувається, як правило, при більш високій подачі.

Випробування різців на міцність методом ступінчасто-збільшувальної подачі полягали у визначенні подачі, досягнення якої викликає руйнування різальної частини різця при постійних значеннях швидкості та глибини різання за час, який менше часу роботи на ступені τ_{cm} .

Випробування здійснювалися таким чином. Подачу встановлювали такою, що дорівнює нормативній для попереднього оброблення конструкційної сталі, та далі підвищували ступенями. Коефіцієнт геометричній прогресії ряду подач приймали дорівнювальним 1,21. Виходячи з діаметра заготовки та висоти державки різця, початкова подача бралася дорівнювальною 0,58 мм/об (згідно з паспортом верстата 1К62). Швидкість різання приймалася дорівнювальною 18–24 м/хв.

Вибір глибини різання проводився з урахуванням типорозміру різця (висот державки), типорозміру верстата, максимального і мінімального діаметра заготовки і товщини різального елемента. У нашому випадку глибина різання була прийнята дорівнювальною 2 мм.

Випробування проводилися у тій же послідовності, що і при випробуваннях методом ступінчасто-збільшувальної швидкості різання. Та подача, під час якої відбувалося викришування або поломка різця, приймалася як гранична.

Дані випробувань наведені у таблиці 2.2.

У таблиці 2.2 (довірчий інтервал: $\Delta S_p = \pm 0,224$ мм/об) представлені результати випробувань різців методом ступінчасто-збільшувальної подачі. З таблиці видно, що інструменти, які зміцнені ОІМП, мають граничні значення подачі в 1,5–2,2 разу вище для всіх випробуваних марок твердого сплаву, в тому числі й безвольфрамових.

Таблиця 2.2 – Результати лабораторних випробувань інструментів, які зміцнені ОІМП, методом ступінчасто-збільшувальної подачі

Марка твердого сплаву	Матеріал, що обробляється	Режими різання		Граничні значення подачі				
		швидкість різання V , м/хв	глибина різання t , мм	для незміцнених пластин $Sp_{вих}$, мм/об	для зміцнених пластин, $Sp_{зміц}$, мм/об	коефіцієнт зміни подачі, $\frac{Sp_{зміц}}{Sp_{вих}}$	коефіцієнт варіації $K_{бр}$ для незміцнених різців	коефіцієнт варіації $K_{бр}$ для зміцнених різців
T5K10	сталь 40X	18...24	2,0	1,9	3,6	1,6	0,3	0,2
BK8	сталь 40X	18...24	2,0	1,4	2,1	1,5	0,25	0,2
BK6	сталь 40X	18...24	2,0	1,9	4,2	2,2	0,3	0,2
T15K6	сталь 40X	18...24	2,0	0,9	1,6	1,7	0,25	0,15

2.1.2 Метод безперервного збільшення швидкості різання

До методів безперервного збільшення швидкості різання належить метод торцевого точіння [130;135; 151]. При випробуваннях цим методом вдається скоротити похибку результатів у порівнянні з методом ступінчастого збільшення режиму різання, однак тривалість випробувань при цьому збільшується [91].

Випробування різців проводилися на циліндричних зразках (рисунок 2.2), що закріплюються у патроні токарного верстата.

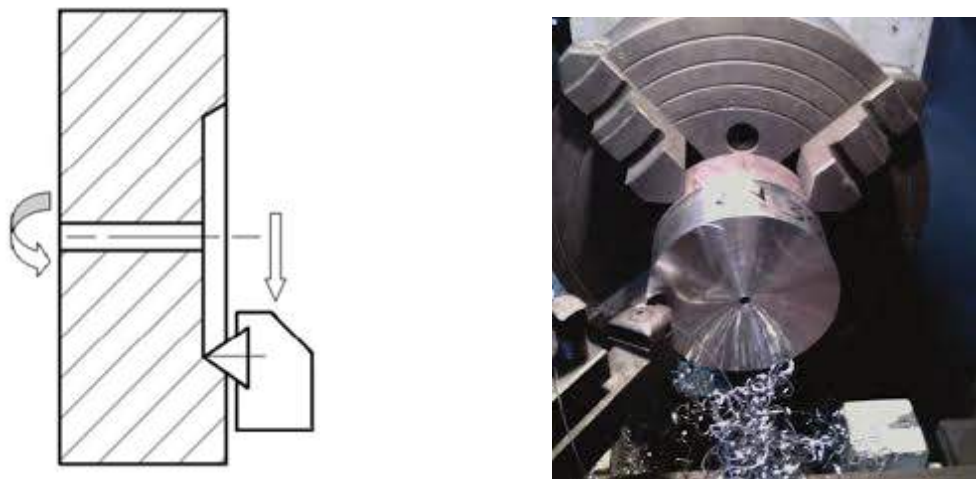


Рисунок 2.2 – Схема випробувань різців при безперервному збільшенні швидкості різання

Торцеву поверхню циліндричного зразка з центральним отвором D_n , було поділено на кільцеві ділянки. Діаметр D_i кожного кільця розраховали за формулою:

$$D_i = D_n \cdot \varphi_i, \quad (2.2)$$

де φ – коефіцієнт пропорційності;

i – порядковий номер.

Кількість кільцевих ділянок і діаметр останнього кільця D_k визначали виходячи з зовнішнього діаметра заготовки. Діаметр D_n визначається таким чином, щоб початкова швидкість V_n співвідносилася з нормативною V , як

$$\frac{V_n}{V} = 0,5 \dots 0,7. \quad (2.3)$$

Випробування різців здійснювали проточуванням торцевої поверхні від центру до периферії кожної кільцевої ділянки. При цьому частоту обертання шпинделя для кожного проходу торцевої поверхні визначали за формулою:

$$n_q = n_{n1} \cdot \varphi_1^{q-1}, \quad (2.4)$$

де q – порядковий номер проходу під час торцевого точіння;

n_{n1} – кількість обертів для першого проходу;

$$\varphi_1 = \frac{D_k}{D_n}. \quad (2.5)$$

При проведенні випробувань спостерігалось монотонне збільшення швидкості різання, тому після проточування кожного кільця або групи кілець вимірювалося зношування різця по головній задній поверхні. Проточування торцевої поверхні здійснювалося до моменту, поки зношування різця на задній поверхні не досягало встановленого критерію затуплення. Якщо зношування досліджуваного різця по головній задній поверхні не досягало встановленого критерію на першому проході, то проточування починали знову від центру до периферії (другий прохід) з частотою обертання шпинделя, яку визначено за формулою (2.4) тощо. Швидкість, при якій різець досягав встановленого критерію затуплення, вважалася граничною швидкістю V_{sp} , яка приймалася за параметр зносостійкості інструменту.

Були випробувані марки твердого сплаву: Т5К10, Т15К6, ВК8, ВК6ОМ, ТТ20К9 з різними формами пластин. Випробування проводилися на різних режимах і умовах зміцнення.

2.1.3 Методика випробувань на стійкість і працездатність різальних пластин, які зміцнені ОІМП і комбінованими технологіями, у лабораторних умовах

Методики призначені для оцінювання міцності й зносостійкості тврдосплавних різців загального призначення, що випускаються інструментальними заводами за ГОСТ, ДСТУ і ТУ. Методики встановлюють загальні положення підготовки й проведення форсованих випробувань, порядок виконання математичного оброблення їх результатів.

Поряд з оцінюванням міцності й зносостійкості відповідно до методик можна проводити окремі випробування для оцінювання ефективності різних заходів: зміні конструкції різця, інструментального матеріалу, технології виготовлення, додаткового оздоблювального оброблення зносостійких покриттів й ін. Ці методики призначені також для проведення випробувань із метою встановлення ступенів впливу різних параметрів експлуатації інструмента на міцність і зносостійкість.

Різці вибирались із партії, прийнятої відділом технічного контролю, у кількості 18–20 штук, іменовані надалі вибіркою.

У вибірку входять різці одного типорозміру й виконання з різальною частиною, виготовленою з однієї марки інструментального матеріалу однієї партії. Кожний інструмент у вибірці маркувався.

Розміри пластин, фасок, викрашувань вимірювались на інструментальному мікроскопі з точністю до 0,01 мм. Відхилення розмірів пластин відповідали ГОСТ 19086-90.

У всіх опорних поверхнях пластин вимірювалось відхилення від площинності. Вимір здійснювався індикатором, закріпленім у спеціальному пристосуванні із ціною розподілу 0,01 мм. Вимірювальну головку приладу

встановлюють на нуль за допомогою кінцевого заходу. Установивши пластину, визначені показання, які не повинні перевищувати граничних відхилень (ГОСТ 19086-90). Параметр шорсткості Ra , оброблених поверхонь різальних пластин, фасок і опорних пластин вимірювався вибірково за допомогою профілографа-профілометра і не перевищував 0,63 мкм. Заготовки для випробувань вибрані з однієї партії.

Перед випробуваннями заготовки необхідно обробити до повного видалення кірки. Відношення довжини заготовки до діаметра від початку до кінця випробувань перебувало в межах 3–8.

Токарні різці були встановлені по лінії центрів із точністю $\pm 0,3$ мм.

Випробування різців на міцність полягало у визначенні подачі, досягнення якої викликає руйнування різальної частини різця при значеннях швидкості й глибини різання за час, який менше часу роботи на ступеню $t_{ст}$.

Подача встановлювалась на рівні нормативної для попереднього оброблення й далі підвищувалась ступенями.

Коефіцієнт геометричної прогресії ряду подач $\phi_{ст}$ прийнятий дорівнювальним 1,21 або найближчим відповідно до конструкції коробки подач верстата. Початкові подачі наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Величини початкових подач при випробуваннях різців на міцність

Висота державки H , мм	40	50	63	80
Мінімальний діаметр заготовки D_{min} , мм	400	500	600	700
Початкова подача, мм/об.	1,1–1,5	1,5–1,8	1,8–2,0	2,0–2,2

Заготовки встановлювались у патроні й задньому центрі для забезпечення максимальної жорсткості технологічної системи механічної обробки. Тривалість роботи на ступеню $t_{ст} = 6$ с.

Відлік часу роботи на ступені починають після врізання різця, а перемикання подач – після зупинки й повного виводу різця із зони різання. При перемиканні подачі випробовуваний різець не відводили від заготовки у радіальному напрямку, а тільки виводили із зони різання. Усі випробування проводились на одній заготовці від заднього центру до кулачків.

Випробування різців проводились на важких верстатах, що відповідають ГОСТ 7035-75. Верстати для випробувань мали безступінчасте регулювання обертів. Установка різців виключала їх зсув у процесі досліджень. Після випробувань вимірювались розміри руйнувань пластин випробуваних різців: уздовж головної різальної крайки, уздовж допоміжної різальної крайки й по висоті пластини штангенциркулем з точністю 0,1 мм.

За поточними значенням швидкості різання, при якій відбулося зношування, й руйнівальної подачі, отриманим при кількості експериментів, дорівнюють 7, розраховують середні значення швидкості різання, при якій відбулося зношування v_u і руйнівальна подача Sp :

$$\bar{v}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{u_i}. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт варіації швидкості різання

$$V_{v_u} = \sigma_{v_u} / \bar{v}_u, \quad (2.7)$$

де σ_{v_u} – середнє квадратичне відхилення швидкості різання.

$$\sigma_{v_u} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{u_i} - \bar{v}_u)^2}{n-1}}. \quad (2.8)$$

Довірчі інтервали для швидкості різання

$$\bar{v}_u \pm \Delta, \quad (2.9)$$

де $\Delta \pm t_k \sigma_{v_u} / \sqrt{n}$, t_k – критерій Ст'юдента, який дорівнює 1,94 для $f = n - 1 = 6$ і $P = 9$.

При порівняльному оцінюванні зносостійкості партій істотність відмінності їх зносостійкості визначена за критерієм Ст'юдента (при кількості досліджень менше 20).

$$t_k = \frac{|\bar{v}_{u_1} - \bar{v}_{u_2}|}{\sqrt{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (2.10)$$

де \bar{v}_{u_1} , \bar{v}_{u_2} – середні значення швидкості різання, при якій відбулося зношування для першої й другої партії., відповідно;

n_1 , n_2 – обсяги вибірок.

2.1.4 Методика оцінювання несівної здатності інструменту методом руйнівальної подачі

Методика встановлює організаційні й методичні принципи збирання й оброблення інформації про надійність різців в умовах експлуатації.

Мінімальний обсяг спостережень N для оцінювання середніх показників надійності з відносною помилкою $\delta < 0,15$ і довірчою ймовірністю $P \leq 0,9$ дорівнює 15.

Обсяг спостережень $N = 18$ для різців відповідає кількості інструментів. Кількість різців з механічним кріпленням пластин рекомендується прийняти дорівнюваним $N_K = 6$. Необхідний обсяг спостережень N забезпечувався перестановкою пластин.

Токарні різці для випробувань відбирались у випадковому порядку із кількості прийнятих ВТК заводу-виготовлювача або інструментального цеху, причому відібрані інструменти мають бути рівномірно розподілені

за часом їх виготовлення: однакова кількість інструментів відбирається на початку, середині, кінці зміни, у різні зміни, на початку, середині, кінці місяця і т. д.

Для порівняння різних конструкторсько-технологічних варіантів усі інструменти виготовляються одночасно однієї партією з поділом лише на тих операціях, де утворюються досліджувані параметри.

Відібрані токарні різці маркувалися із вказівкою номера інструмента й номера варіанта при порівняльних випробуваннях, за всіма параметрами відповідали технічним вимогам.

Для проведення експлуатаційних випробувань обрані операції, технологія оброблення деталі на яких досить відпрацьована. Експлуатаційні випробування інструментів проводилися на верстатах, відповідних до типорозміру випробовуваного інструмента, що й відповідають установленим за ГОСТ 18097-72 технічним вимогам до точності й твердості. Експлуатаційні випробування проводилися на найбільш типових для даного інструменту режимах різання, застосовуваних на конкретних виробничих операціях, відповідно до загальномашинобудівних нормативів.

При експлуатаційних випробуваннях прийняті такі критерії відмови: досягнення гранично припустимої величини зношування, руйнування різальної частини інструмента. Запуск інструмента в експлуатацію проводився у випадковому порядку. При порівнянні різних конструктивно-технологічних варіантів випадковим образом чергувалися інструменти різних варіантів. У випадку випробувань на декількох шпинделях і верстатах, на кожному з них було випробувано однакова кількість інструментів.

Необхідну для оцінювання довговічності інформацію одержують шляхом спостережень за роботою інструмента у виробничих умовах до закінчення його експлуатації й за усуненням відмов і виходу з ладу інструмента, що виникають у процесі експлуатації.

При проведенні спостережень фіксуються стійкість (час безвідмовної роботи або кількість оброблених деталей) між переточуваннями або переустановленням пластин, а також характер відмови інструмента.

Для інструментів з механічним кріпленням багатогранних пластин фіксується фактична кількість періодів стійкості пластини та її сумарна стійкість.

Умови проведення випробувань, стійкість, кількість періодів стійкості, характер відмови різців, заносяться до протоколу.

Основними показниками безвідмовності інструмента є середня стійкість T , коефіцієнт варіації V_T і гама процентна стійкість T_Y .

Середня стійкість інструмента:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (2.11)$$

де T – стійкість інструмента в τ -му випробуванні;

N – обсяг спостережень.

Коефіцієнт варіації стійкості:

$$V_T = S/T, \quad (2.12)$$

де S – середньоквадратичне відхилення

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (T_i - T)^2}. \quad (2.13)$$

Верхня T_v і нижня T_n довірчі границі:

$$T_v = \sqrt[b]{r_1} T, \quad T_n = \sqrt[b]{r_3} T, \quad (2.14)$$

де b – параметр розподілу Вейбула, обумовлений залежно від V_T .

Гама-відсоткова стійкість T_γ – це стійкість, яку має й перевищує обумовлений відсоток інструментів γ :

$$T_\gamma = a(-\ln(\gamma/100))^{1/b}, \quad (2.15)$$

де a – параметр розподілу Вейбула, $a = T/Kb$.

Середня кількість періодів стійкості для інструмента, що переточується:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (2.16)$$

де N – обсяг спостережень;

K_i – фактична кількість переточувань i -го інструмента.

Середня кількість періодів стійкості пластин для збірного інструмента:

$$K_{nl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n K_{nli}, \quad (2.17)$$

де N – обсяг спостережень;

K_{nl} – кількість періодів стійкості пластин для збірного інструмента;

$$K_{nl} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n K_{nli}, \quad (2.18)$$

де K_{nl} – середня витрата пластин на 1 корпус, обумовлений нормами витрати або оцінюваний статистично.

$$K_K = M_{nl} / K_K, \quad (2.19)$$

де K_K – середньомісячний або середньорічна витрата пластин;

M_K – витрата за той самий час корпусів.

Основним показником ремонтпридатності збірного інструмента є середній час відновлення:

$$t_b = \frac{1}{N} \sum_{y=1}^l t_{bi} r_y, \quad (2.20)$$

де l – кількість елементів конструкції різця: пластина різальна, опорна, кріплення, держак;

t_{bi} – час усунення відмови j -го елемента;

r_y – кількість відмов j -го елемента за час випробувань

$$\sum_{y=1}^l r_y = N, \quad (2.21)$$

де N – обсяг спостережень.

Метою експериментальних досліджень було встановлення залежностей руйнувальної подачі й імовірності руйнування інструмента від параметрів умов їх експлуатації.

Зі збільшенням подач зростає ймовірність поломок різців, яка кількісно визначається як відношення кількості поломок до спостережуваних періодів стійкості. При деякій величині подач імовірність поломок буде дорівнювати 1,0; тобто всі різці будуть руйнуватися у перший же період стійкості. Ця подача називається руйнувальною й установлюється випробуванням різанням зі східчасто-збільшеною подачею відповідно до методики випробувань, розробленої у Донбаській державній машинобудівній академії кафедрою «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології» [114].

На кожній подачі різець працює певний час, після чого подача підвищується на наступний ступінь і так, доти не відбудеться поломка. Перед випробуванням відповідно до методики проводиться відбір і діагностика різців.

Дослідження показали залежність руйнівальної подачі як від часу роботи на кожній подачі, так і від кількості ступенів подач, що передують руйнівальній дії. Для більшості випробувань був прийнятий час роботи на кожній подачі, що дорівнює 2 хв., це забезпечувало як достатню надійність, так і продуктивність експериментів. Експлуатаційні випробування проводилися на важких токарних верстатах у механічних цехах № 3 і № 5 ПрАТ «НКМЗ» на верстатах моделей КЖ.16274Ф3, 1А670Ф3 і в лабораторних умовах на верстаті мод. 1А64.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд важкого верстата з $D_C = 1300$ мм

Характеристику використаних верстатів наведено у табл. 2.4–2.5. Твердість верстатів спеціально не визначалася, але були використані виміри, виконані технологічною лабораторією заводу.

Таблиця 2.4 – Технічна характеристика важкого токарного верстата мод. КЖ16274Ф3

Найменування характеристики	Значення
Розміри деталі, що обробляється, мм	
найбільший діаметр	1000
над супортом	1300
Кількість різцетримачів, шт.	2
Переміщення органів супорту, мм	
салазок (вісь X)	650
каретки (вісь Z)	5940
Найбільше переміщення задньої бабки, мм	5625
Частоти обертання шпинделя, об/хв.	2–450
Потужність привода головного руху, кВт	110
Габарити верстату, мм	14872 x 4880 x 2550
Маса верстата, кг	54000

Таблиця 2.5 – Характеристика верстатів, на яких проводилися дослідження міцності різальної частини різців

D_{max} , мм	L , мм	Q , т	$s_{min} - s_{max}$ мм/об.	$n_{min} - n_{max}$, об./хв.	P_{max} , Н	$M_{кр}$, кНм	N , кВт	j , Н/мм
1600	5000	25	0,4-2,5	1,8-80	60500	218,2	44	-
1560	5000	21	0,4-2,5	1,5-60,5	70000	303	44	-
1650	10000	50	0,2-88	2-128	31800	714	100	48000
1980	10000	50	0,2-19	2-128	31800	714	100	46000
1755	15900	25	0,2-5,0	0,695-74	32000	651	40	25000
2340	31500	122	0,32-9,55	0,64-38	39200	315	105	-
2440	25000	80	0,12-48	0,45-5,6	35000	3460	115	-

Характеристика металів, при обробленні яких проводилися дослідження, дана у таблиці 2.6.

Випробування здійснювалися на верстатах з $D_{max} = 1250\text{--}2500$ мм із висотою різця від 40 до 80 мм.

Таблиця 2.6 – Характеристика матеріалів, при обробці яких проводилися дослідження міцності різальної частини різців

Марка матеріалу, що обробляється	Хімічний склад у відсотках (ГОСТ 1050-72)								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Mo	S	P
								Не більш	
40X	0,35-0,45	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	0,4			0,045	0,04
55X	0,5-0,6	0,5-0,2	0,17-0,37	1,0-1,3	0,5			0,04	0,04
50ХН	0,45-0,55	0,5-0,8	0,17-0,37	0,45-0,75	1,0-1,5			0,04	0,04
45ХНМ	0,3-0,4	0,5-0,8	0,17-0,37	1,3-1,7	1,3-1,7		0,2-0,3	0,35	0,03
90ХФ	0,85-0,95	0,2-0,35	0,25-0,45	1,4-1,7	0,3	0,1-0,2		0,04	0,04
3X13	0,25-0,34	0,6	0,6	12-14	0,6			0,03	0,035

Таблиця 2.7 – Механічні властивості матеріалів деталей

Марка матеріалу, що обробляється	Механічні властивості (ГОСТ 2835-52)				
	Гранична плинність, Н/мм ²	Часів. опір розриву, Н/мм ²	Відносне подовження, $\delta_s\%$	Відносне звуження, $\psi\%$	Ударна в'язкість, Нм/см ²
40X	400	600	17	35	60
55X	350	650	10	30	–
40ХН	300–350	650–700	18–20	45–50	–
90ХФ	690	950	1,2	1,0	6

Випробовувалися різальні пластини однієї партії, основні їх характеристики наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Механічні властивості твердих сплавів

Марка твердого сплаву	Фізико-механічні властивості		
	Межа міцності при вигині, МПа	Питома вага, г/см ³	Твердість, HRA не менш
T5K10	1469	12,72	90
TT7K12	1550	13,0	87
BK8	1650	14,8	88

Геометричні параметри різальної частини різців для всіх випробувань приймалися згідно з нормами заводу. Випробування проводилися при глибині різання 5–30 мм зі швидкістю різання приблизно відповідною 0,25–2,0 від економічної швидкості для цих умов.

У межах однієї серії випробувань залишалися незмінними верстат, заготовка, партія різців і партія твёрдосплавних пластин. Ретельно перевірялася величина руйнівальної подачі для одного значення аргументу загального з раніше проведеними випробуваннями з метою можливості приведення результатів дослідів до постійних умов [9; 10; 11; 12; 32].

Досліджувався вплив на руйнівальну подачу таких факторів: розміри таа стан верстата, матеріалу заготовки, наявності кірки й ударів, інструментального матеріалу, конструкції й технології виготовлення різців, глибини різання, швидкості різання й зношування різця. При випробуваннях поряд з умовами роботи й значенням руйнівальної подачі реєструвалася величина й характер поломки різальної частини різців. Найбільш типові поломки фотографувалися.

Кожний експеримент з визначення руйнівальної подачі повторювався не менш трьох разів. Крім установлення руйнівальної подачі при короткочасних випробуваннях, перевірявся її зв'язок із часом роботи і так само вплив подачі на імовірність поломок.

2.1.5 Вплив складу твердого сплаву на зносостійкість

На рисунках 2.4–2.7 (довірчий інтервал $\Delta K_\delta = \pm 0,088$) наведені результати випробувань різців за допомогою метода безперервного збільшення швидкості різання під час торцевого точіння. На цих рисунках наведені графіки зміни відносного зношування K_δ від швидкості різання. Відносне зношування визначається як відношення зношування незміцнених різців $\delta_{вих}$ до зношування різців, які зміцнені ОІМП $\delta_{ОІМП}$, при певній швидкості різання:

$$K_\delta = \frac{\delta_{вих}}{\delta_{ОІМП}}. \quad (2.22)$$

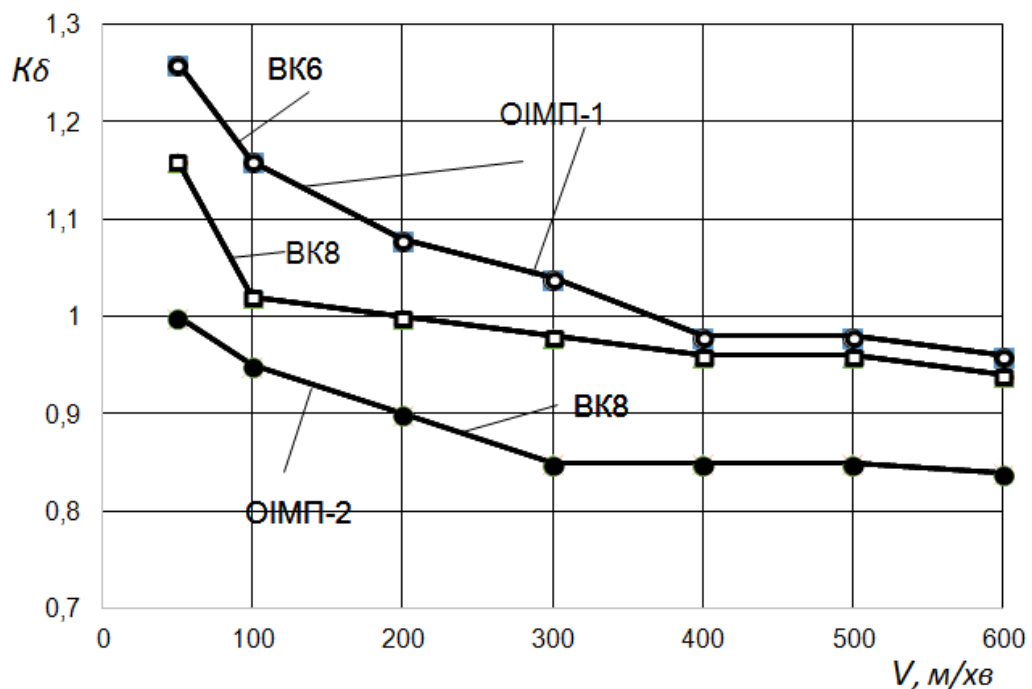


Рисунок 2.4 – Вплив швидкості різання на відносне зношування однокарбідних твердосплавних пластин, які зміцнені ОІМП, при різних видах оброблення

Як видно з рисунка 2.4, ефективність ОІМП у значній мірі залежить від складу твердого сплаву. Спостерігається тенденція збільшення відносного зношування K_δ при збільшенні вмісту карбідів вольфраму. Так, наприклад, при швидкості різання 58 м/хв для сплаву ВК8 $K_\delta = 1,18$, а для сплаву ВК6 $K_\delta = 1,26$.

При порівнянні рисунків 2.4 і 2.5 можна помітити, що для трикарбідного твердого сплаву ТТ20К9, який зміцнений ОІМП, відносне зношування значно вище, ніж у однокарбідних ВК6 і ВК8 (при $V = 58$ м/хв, $K_\delta = 1,48$).

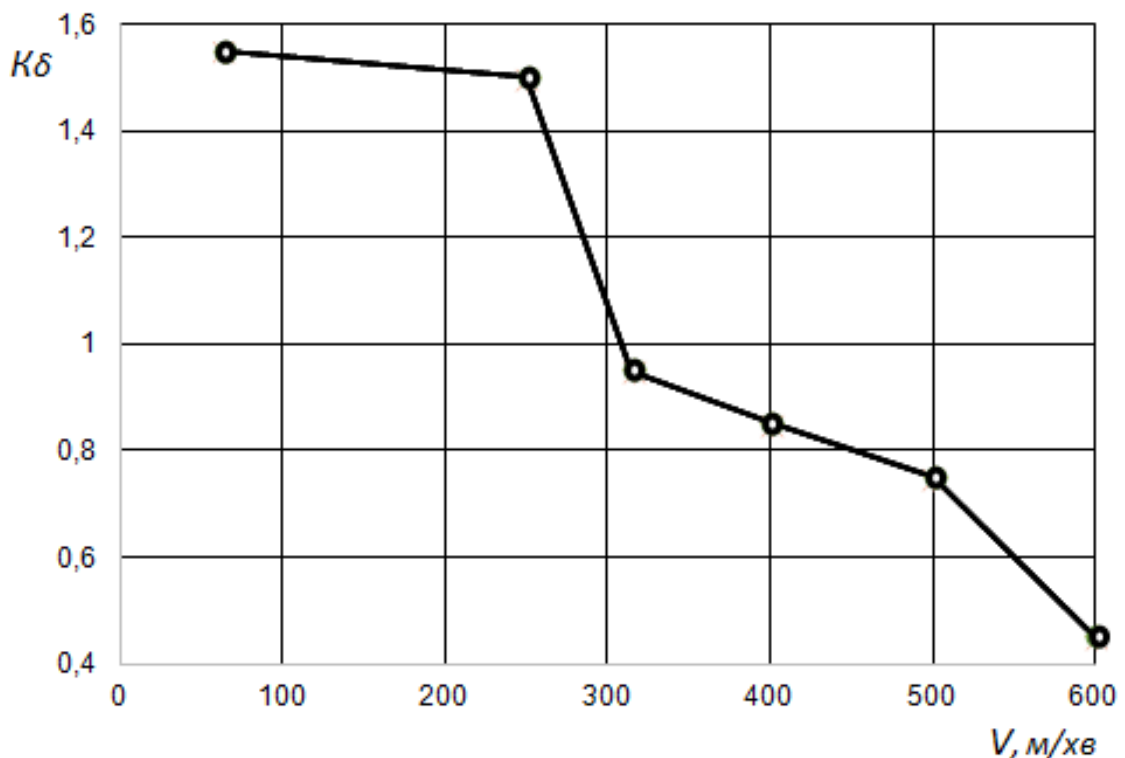


Рисунок 2.5 – Вплив швидкості різання на відносне зношування трикарбідного твердого сплаву ТТ20К9, який зміцнений ОІМП

2.1.6 Вплив форми різальної частини інструменту на зносостійкість

Ефективність ОІМП у значній мірі залежить від форми різальної частини інструмента (рисунок 2.6).

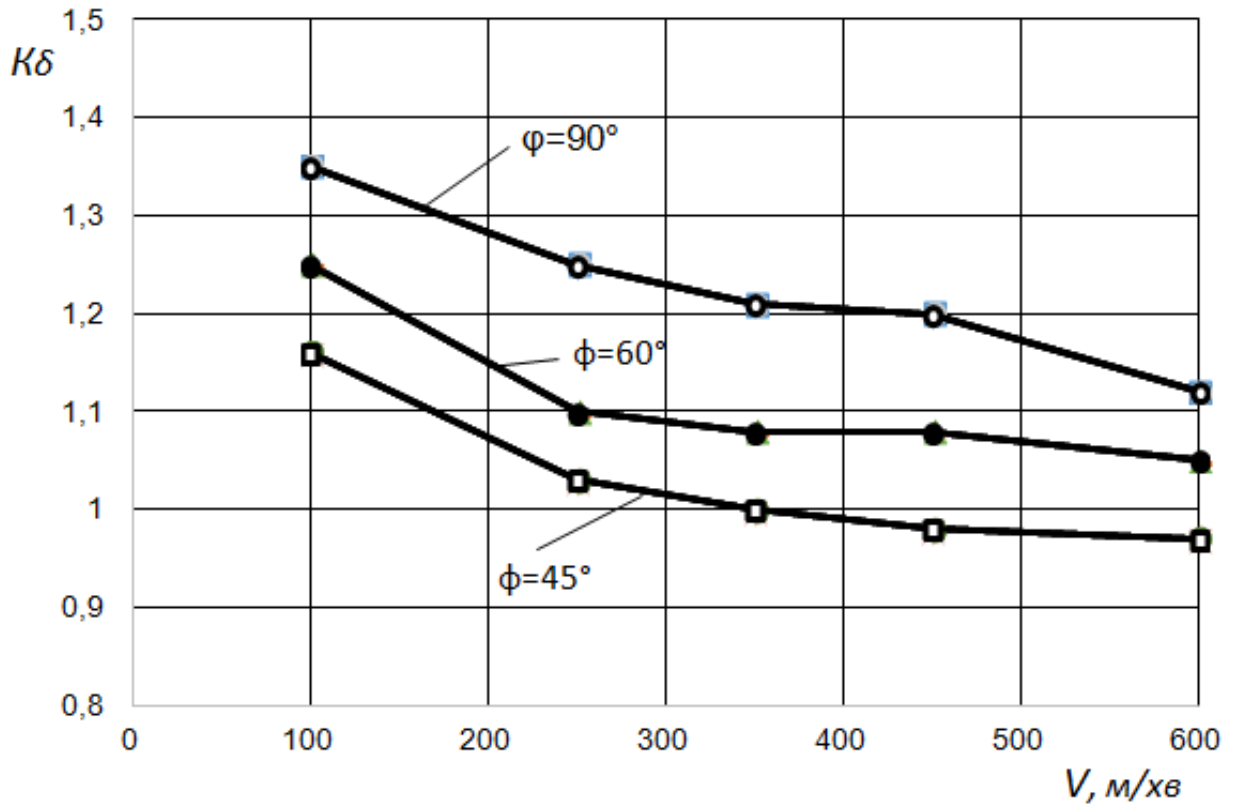


Рисунок 2.6 – Вплив швидкості різання на відносне зношування твердосплавних пластин Т5К10, які зміцнені ОІМП, у залежності від головного кута у плані φ

З рисунка 2.6 видно, що ефективність ОІМП також зростає при збільшенні головного кута у плані інструменту.

Так, наприклад, при головному куті у плані $\varphi = 90^\circ$ відносне зношування більше в 1,18 разу, ніж при ($\varphi = 60^\circ$ і в 1,25 разу, ніж при $\varphi = 45^\circ$.

2.1.7 Вплив режимів ОІМП на зносостійкість інструменту

Також на ефективність оброблення імпульсним магнітним полем значний вплив мають режими ОІМП (рисунок 2.7):

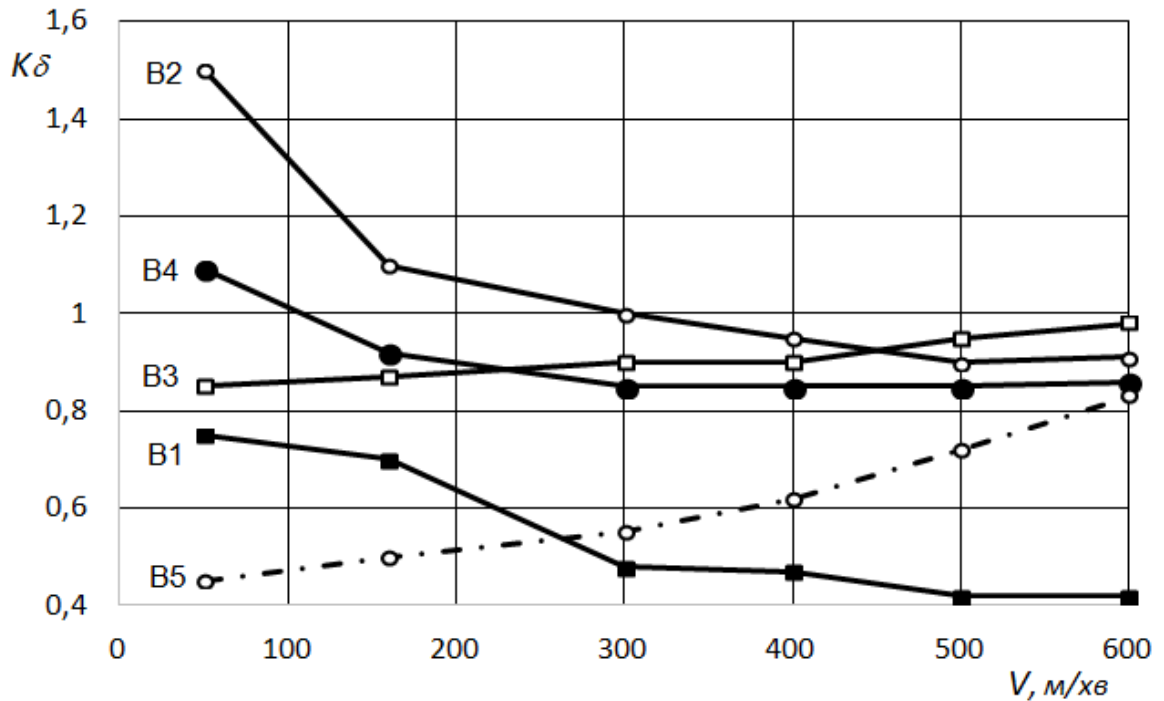


Рисунок 2.7 – Вплив режимів зміцнення на відносне зношування зміцнених твердосплавних пластин Т5К10 (головний кут в плані $\varphi = 90^\circ$) при різних режимах оброблення: 1 – В1, 2 – В2, 3 – В3, 4 – В4, 5 – В5

З рисунка 2.7 видно, що ефективність ОІМП є найбільш високою при використанні режиму зміцнення В2.

Так, при режимі В2 відносне зношування вище у 1,9 рази, ніж при режимі В1, у 1,8 рази, ніж при В3, у 1,4 рази, ніж при В4 і у 3,1 разу, ніж при В5.

Таким чином, результати форсованих випробувань дозволяють зробити важливий висновок про те, що ОІМП підвищує зносостійкість твердосплавного різального інструменту, що працює при попередньому обробленні на важких верстатах. При більш високих швидкостях різання ефективність зміцнення значно нижче, а в деяких випадках навіть відсутня, коли коефіцієнт $K_\delta < 1$.

Підвищення інтенсивності зношування незміцнених твердосплавних пластин при більш низьких швидкостях різання пов'язано з перевагою крихкого зношування. При підвищенні швидкості різання частка крихкого

зносу зменшується, натомість зростає частка дифузійного і окисного видів зносу, й інтенсивність зношування пластин після ОІМП зростає. З таблиць 2.1 і 2.2 також видно, що коефіцієнт варіації подач і швидкостей зміни зношування для зміцнених інструментів менше у порівнянні з незміцненим, що свідчить про підвищення стабільності зношування інструментів, які зміцнені ОІМП.

2.1.8 Порівняльна методика оперативного оцінювання ефективності модифікації різальних пластин з визначення опору руйнуванню та зношуванню при контактному навантаженні

На практиці для оцінювання параметрів зносостійкості традиційно фіксують ширину фаски зношування інструменту по задній поверхні при обробленні на верстаті. Така методика потребує значних витрат часу та матеріалів. Оцінювання параметрів міцності та опору руйнуванню пов'язане із застосуванням спеціальних методик та спеціалізованого лабораторного обладнання. Специфіка відмов інструменту на важких верстатах і застосування методів модифікації, які можуть бути оперативно здійснені й оптимізовані у виробничих умовах, вимагає розроблення порівняльної методики, що дозволяє швидко та з мінімальними витратами отримати комплекс параметрів, які характеризують зносостійкість і опір руйнуванню в умовах інтенсивного навантаження.

Запропонований підхід передбачає випробування різальних пластин в умовах високого контактного тиску з тертям при підвищених температурах з використанням устаткування і оснащення, що застосовується при обробленні різанням. У якості контртіла використовується масивна циліндрична заготовка, встановлена на токарному верстаті. Пластина, що випробовується, закріплюється у спеціальній державці різцетримача верстата таким чином, щоб кут різання мінімізував стружкоутворення (рис. 2.8). Конструкція державки передбачає встановлення силовимірювача, який контролює зусилля P притиснення пластини до контртіла. Внаслідок високого

рівня контактної навантаженні забезпечується утворення відколу фаски по задній поверхні різальної пластини. Параметр зношування визначається як площа фаски S , що утворена за певний час тестування. Як характеристики опору руйнуванню прийнято питомий тиск (відношення зусилля притиснення до площі фаски – P/S) та відношення зусилля до ширини фаски P/b . Параметр P/S характеризує опір розсіяному контактному пошкодженню, а величина P/b – опір відколюванню.

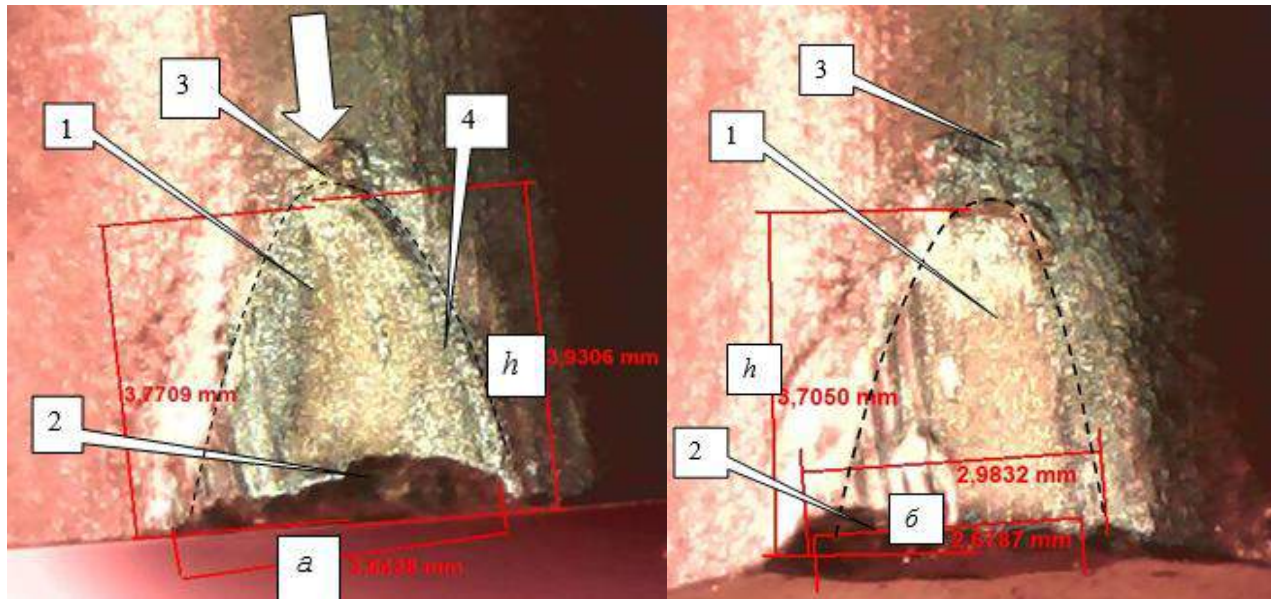


Рисунок 2.8 – Положення пластини відносно вала при визначенні опору руйнуванню і зношуванню при контактному навантаженні на токарних верстатах

Під час оцінювання пошкоджуваності й опору зношування пластин враховуються також наявність мікротріщин на поверхні зносу, зміна геометрії контртіла в зоні контакту.

Методику застосовано при оцінюванні впливу ОІМП на опір руйнуванню пластин з ВК8. На токарному верстаті 1К62 було випробувано неперезагострювальні чотиригранні квадратні пластини у вихідному стані та після ОІМП за двома різними режимами. Контртілом слугував вал діаметром 47,8мм із сталі 40ХН, що обертався з частотою 800об/хв. Режими: подача

супорта 0,07мм/об, лінійна швидкість 120м/хв, зусилля P 150Н, час випробувань становив 6 хвилин. Аналізувались розміри відколів і фасок, що утворилися у результаті випробувань (рис. 2.9).



a)

б)

1 – напівеліптична фаска, 2 – відкол на виході з контакту.

3, 4 – налипання металу контртіла на контурі фаски (розміри дано з калібрувальним коефіцієнтом $k = 3.175$)

Рисунок 2.9 – Напівеліптичні фаски, що утворились при випробуваннях твердосплавних пластин ВК8 у вихідному стані (a) та після ОІМП (б)

Встановлено, що фаска має форму, близьку до напівеліптичної, показану переривчатою лінією. Напрямок дії сили показано стрілкою. Площа фаски приблизно визначалась рівнянням $S = \frac{1}{4} \pi bh$. Середні значення результатів вимірювань, позначені індексом $mean$, фаски та відколу b_{mean} і h_{mean} , а також розрахунків параметрів S_{mean} , P/b_{mean} , P/S_{mean} представлено у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати порівняльних випробувань пластин з ВК8

Стан зразка	Розміри, мм		S_{mean} мм ²	P/b_{mean} Н/мм	P/S_{mean} МПа
	b_{mean}	h_{mean}			
Вихідний	1,23	1,38	1,33	122	113
ОІМП режим 1	0,93	1,21	0,88	161	170
ОІМП режим 2	0,99	1,22	0,95	151	158

Отримано, що фаски на пластинах після ОІМП мають приблизно на 30% меншу площу поверхні, ніж ті, що утворились на пластині у вихідному стані (0,88 мм² і 0,95 мм² порівняно з 1,33 мм²).

Встановлено, що для пластин після ОІМП спостерігається збільшення обох параметрів, які характеризують опір руйнуванню. Для пластин після ОІМП за першим режимом опір розсіяному пошкодженню збільшився на 50%, а опір відколюванню - на 32%. Аналіз пластин, оброблених ІМП за другим режимом, показав зростання параметрів P/S і P/b на 40% та 24%, відповідно.

2.2 Особливості зношування твердосплавних інструментів, які зміцнені ОІМП

2.2.1 Характер руйнування поверхонь різця

Дослідженню закономірностей зношування інструментів, розробленні та призначенню критеріїв затуплення присвячені багаточисленні роботи [3; 62; 66; 108]. Встановлено, що у залежності від умов роботи, властивостей матеріалів інструмента і деталі зміна характеристик зношування відбувається неоднаково. Відомо, що загальноприйнята крива зносу як деталей машин, так і різального інструменту містить три основні стадії: прироботки, нормальне та катастрофічне зношування [3; 66]. Випробування інструментів проводилися на токарно-гвинторізному верстаті моделі 1К62 при попередньому обробленні.

Випробування різців з твердих сплавів показали наявність трьох варіантів початкової стадії зношування: з прироботкою, без прироботки та зі зворотною прироботкою.

Перший варіант характерний для інструменту, який не пройшов зміцнення або при низьких режимах роботи. При обробленні більшості сталей зношувальність твердого сплаву, в залежності від зони температур, має абразивний, дифузний або, частіше, змішаний характер. Прироботочний знос твердого сплаву має крихко-втомний характер, що підтверджено у ряді робіт [62; 108]:

Зв'язок інтенсивності прироботки з якістю виготовлення інструменту встановлено при експлуатаційних випробуваннях. Тому варіант зношування без прироботки мав місце при високих режимах різання та зміцненому різальному інструменті, коли прироботка зникла, тобто лінія усталеного зношування проходила через початок координат.

Зворотна прироботка, випадки якої відомі для деталей машин і оснащення [88; 89], фізично являє собою інкубаційний період процесу зношування і виражається в його прискоренні до переходу в лінійну (сталу) стадію. Випадки зворотної прироботки зустрічалися для інструменту, підданому обробно-зміцнювальним операціям [108].

Так, для інструменту, підданому довібро-абразивному обробленню, спочатку спостерігалися процеси пластичної деформації поверхневого шару, зародження і розвитку субмікротріщини, контактної втоми, а лише потім починалося саме зношування – відокремлення частинок твердого сплаву [6].

При надмірно високих режимах різання кінетика зворотної прироботки іноді імітувалась швидким настанням втомного зношування після нетривалого лінійного періоду.

Подібні закономірності зношування зі зворотною прироботкою спостерігалися і при штучному округленні різальних лез, а також при обробленні безвольфрамовими твердими сплавами, які леговані карбідами перехідних металів.

2.2.2 Особливості кінетики зношування твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП

Проведені дослідження (вихідні дані: інструментальний матеріал – Т5К10; оброблюваний матеріал – сталь 45; оброблювана поверхня – ливарна кірка; швидкість різання – 98 м/хв; подача – 0,58 мм/об; глибина різання – 2,0 мм) зносостійкості твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, показали, що кінетика основної стадії зношування при попередньому обробленні представляється такими випадками: прискореним розвитком зношування, наявністю прискорення з подальшим уповільненням зношування, уповільненим зношуванням.

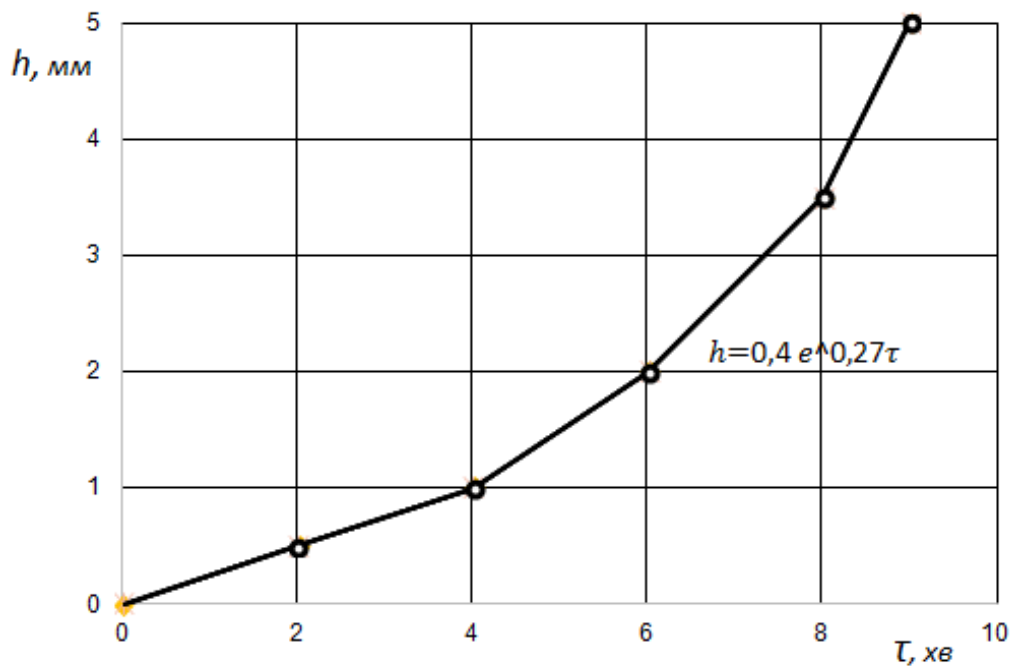


Рисунок 2.10 – Прискорене зношування інструменту без ОІМП

Прискорений розвиток зношування був характерний для різців з твердого сплаву Т5К10 без ОІМП (рис. 2.10). Переважний характер зношування у цьому випадку – крихке руйнування різальної частини інструменту. Це проявляється у відділенні малих частинок різальної кромки, що багато в чому пов'язано з поверхневими дефектами інструментального матеріалу. Відділення частинок матеріалу, в основному, відбувається

на передній поверхні, сумірною з довжиною контакту стружки з передньою поверхнею l_o , а по ширині – сумірною з шириною шару, що зрізується b .

Залежність зношування h від часу роботи інструменту τ у цьому випадку з високою вірогідністю апроксимується рівнянням:

$$h = h_a \cdot e^{a\tau}, \quad (2.23)$$

де h_a – прироботочне зношування,

a – показник, що характеризує швидкість прироботки.

Перевірка рівняння (2.22), а також рівнянь, наведених нижче, на адекватність проводилася за критерієм Вільямса і Клути шляхом розрахункового кутового коефіцієнта [107].

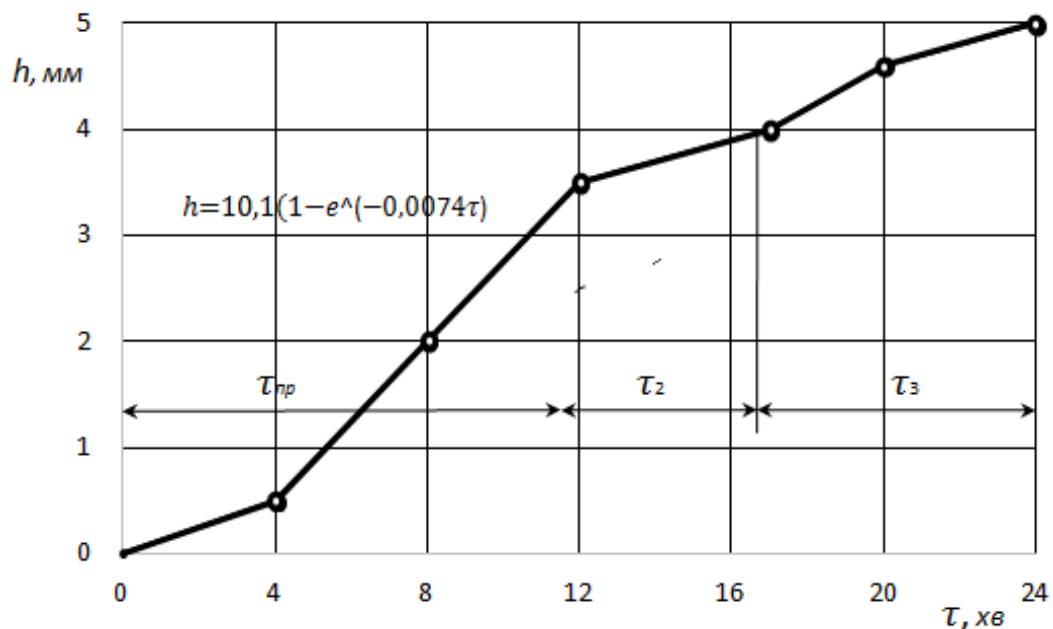


Рисунок 2.11 – Зміна зношування інструменту, який зміцнений ОІМП відповідно до режиму В1

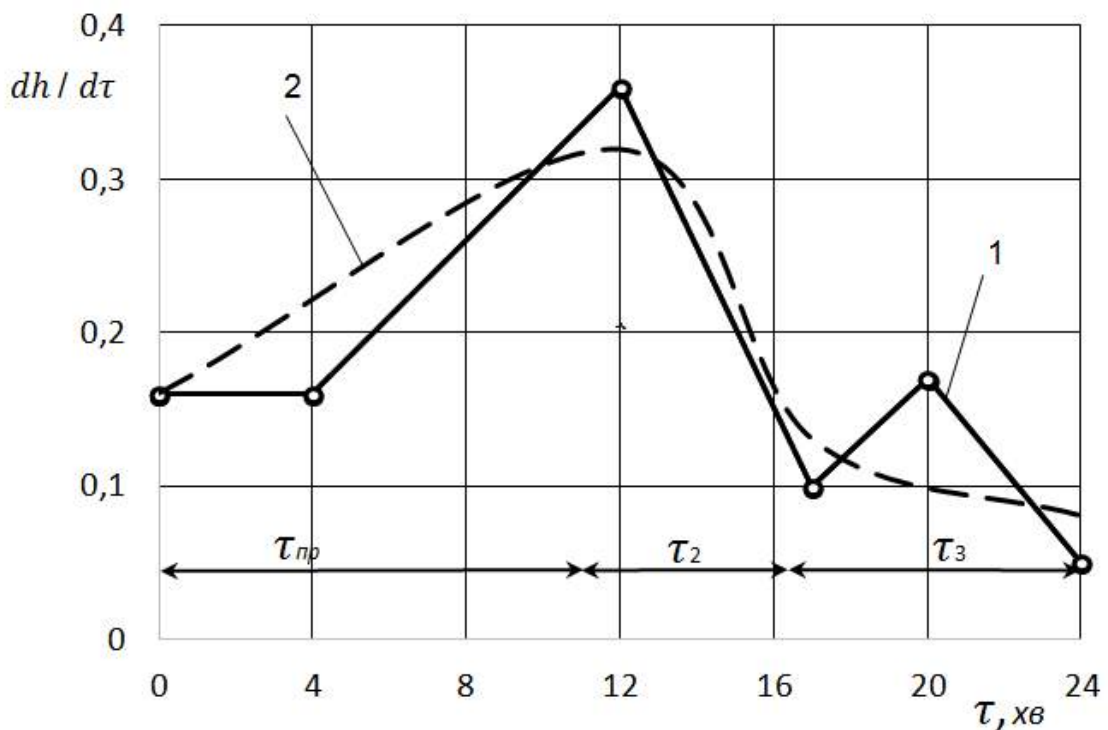
При зміцненні відповідно до режиму В1 на початку t_{np} типове збільшення швидкості зношування, а потім уповільнення з виходом на другу, досить протяжну лінійну ділянку t_2 , потім на t_3 і т. д. (рис. 2.11). Зменшення

часу прироботки інструменту, який зміцнений ОІМП, пояснюється підвищенням його міцності й абразивної зносостійкості.

Більш наочно ця картина буде представлена, якщо перейти до залежності «швидкість зносу – час» (рис. 2.12), яка апроксимується функцією:

$$V_u = A \cdot \tau \cdot e^{-a^2 \tau^2}, \quad (2.24)$$

де A і a – показники, що характеризують швидкість прироботки інструменту, які залежать від умов різання, матеріалу інструменту, деталі, параметрів системи ВПД.



1 – експериментальна крива; 2 – крива, побудована за залежністю 2.7

Рисунок 2.12 – Залежність швидкості зношування інструменту, який зміцнений ОІМП, відповідно до режиму В1, від часу роботи

Час прироботки інструменту можна визначити, якщо продиференцювати функцію (2.23) і, прирівнявши до нуля, вирішити рівняння щодо τ . В результаті отримаємо:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{0,71}{a} . \quad (2.25)$$

З останнього рівняння випливає, що при збільшенні коефіцієнта a час прироботки $\tau_{\text{пр}}$ зменшиться. Розмір коефіцієнта a залежить від геометричних параметрів інструменту та товщини зрізаного шару. Так, при $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ і товщині шару, що зрізується, $a_3 = 0,71$ мм, коефіцієнт $a = 0,086$. Отже, $\tau_{\text{пр}} = 8,3$ хв. При зменшенні переднього кута γ до від'ємних значень коефіцієнт a збільшується у 1,5–1,8 разу. Відповідним чином зменшується і час прироботки інструменту.

Аналогічна закономірність спостерігається при зменшенні товщини шару, який зрізується. Графіки цих залежностей наведені на рисунку 2.13.

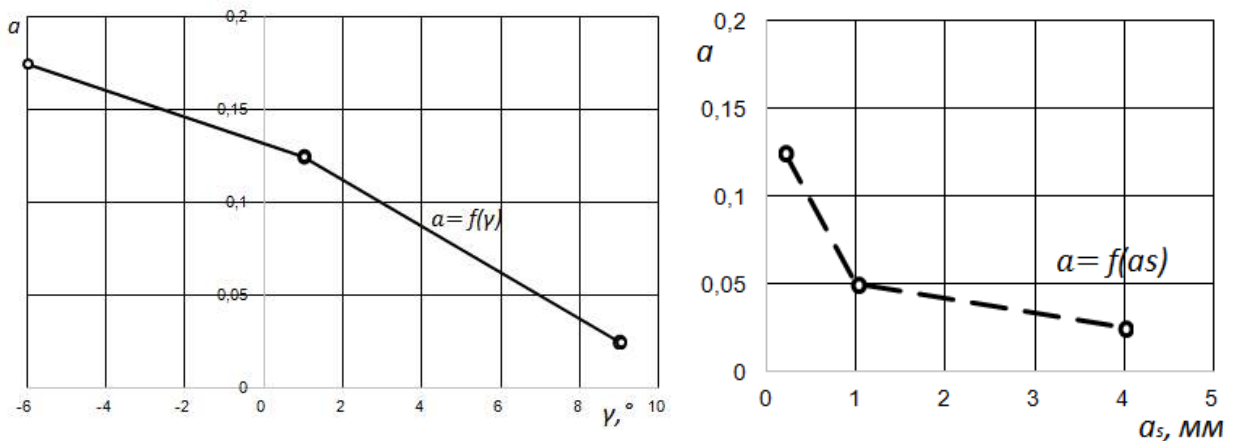


Рисунок 2.13 – Вплив умов різання (переднього кута γ і товщини шару, який зрізується a_3) на розмір підроботки інструменту, який зміцнений ОІМП

Залежність для розрахунку зношування отримаємо, якщо функцію (2.23) проінтегрувати по τ :

$$\int_0^T V_u d\tau = h. \quad (2.26)$$

У результаті отримаємо:

$$h = \frac{A}{2a^2} (1 - e^{-a^2\tau^2}). \quad (2.27)$$

При зміцненні відповідно до режиму В2 спостерігається, в основному, уповільнення зношування інструменту, яке поступово переходить у лінійну стадію (рис. 2.14).

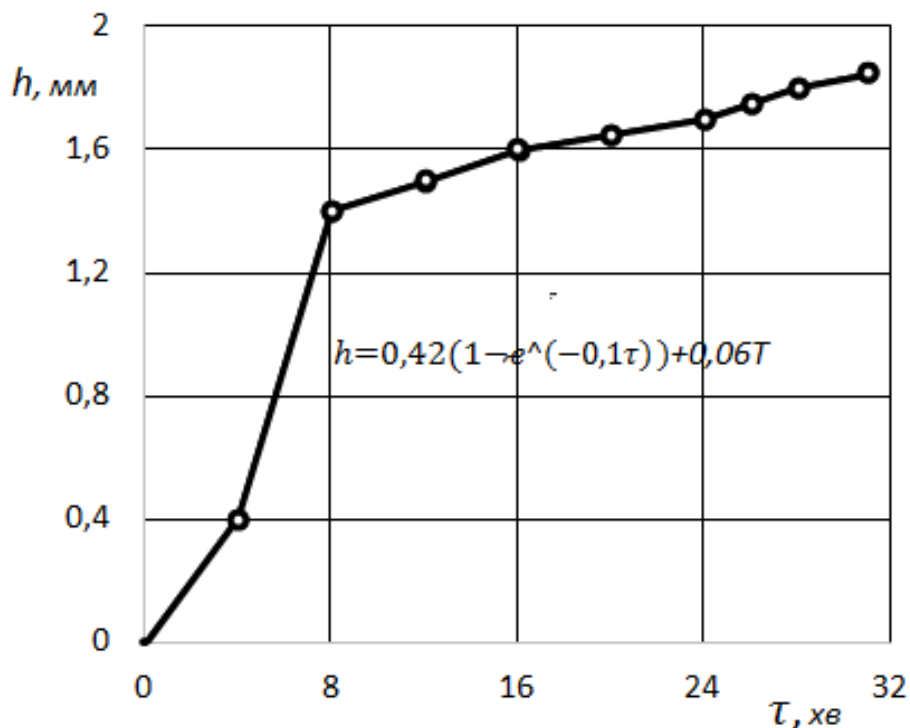


Рисунок 2.14 – Характер зношування інструменту, який зміцнений ОІМП, відповідно до режиму В2, при наявності уповільнення зношування

Найбільш наочно це простежується на графіку залежності швидкості зношування від часу роботи інструменту (рис. 2.15).

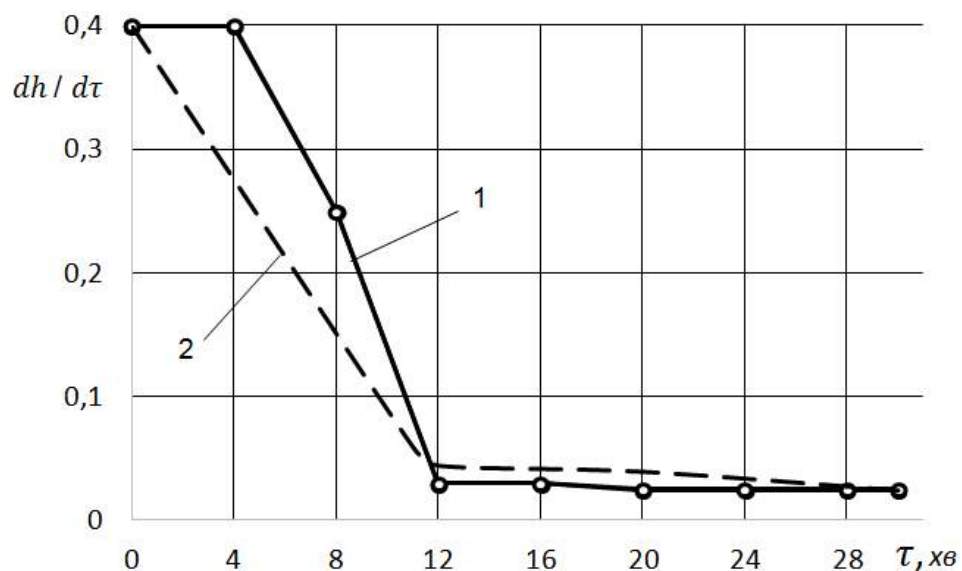
Ця закономірність описується наступною залежністю:

$$V_u = h_a \cdot e^{-b\tau} + B, \quad (2.28)$$

де h_a – прироботочний знос;

B – встановлена швидкість зношування;

b – показник швидкості прироботки, який залежить від умов різання, матеріалу інструменту, деталі, параметрів системи ВПД.



1 – експериментальна крива; 2 – крива, побудована за залежністю 2.11

Рисунок 2.15 – Характер послідовного уповільнення зношування інструменту, який зміцнений ОІМП

Підставивши залежність 2.11 у формулу 2.25, одержимо рівняння, яке описує залежність зношування від часу роботи для інструментів, які зміцнені ОІМП:

$$h = h_a (1 - e^{-b\tau}) + B\tau. \quad (2.12)$$

Остання залежність є експотенційною, що відповідає фізичній сутності процесу. Аналіз рельєфу поверхні зносу з глибокими ризиками та кінетика зношення вказують на абразивний характер зношування.

2.2.3 Характер зношування твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП

Встановлено, що у більшості випадків для твердосплавних інструментів, які зміцнені ОІМП, відповідно до режиму В2, при низьких швидкостях різання, великій товщині шару, який зрізається, позитивному передньому куті крива зношуваності складається з ряду ступенів з неодноразовим прискоренням і уповільненням зношування (рис. 2.16, довірчий інтервал: $\Delta h_3 = \pm 0.114$ мм). Механізм цього процесу буде розглянуто нижче.

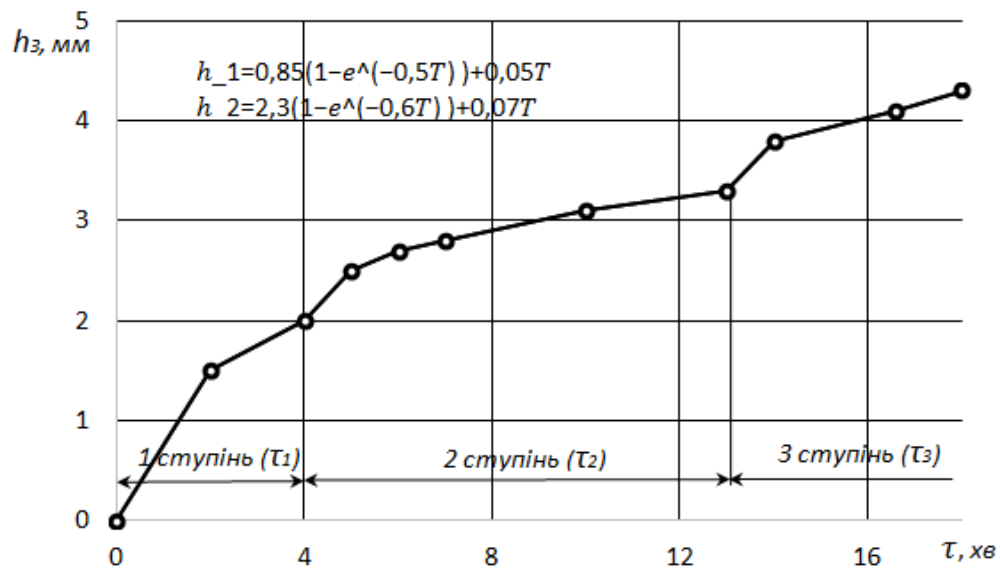
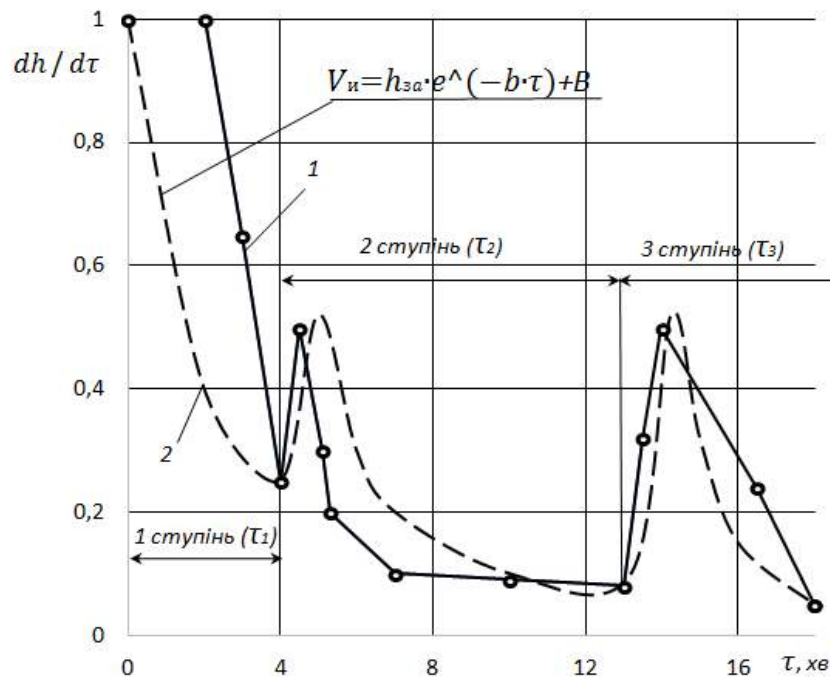


Рисунок 2.16 – Характер зношування інструменту, який зміцнений ОІМП, при неодноразовому уповільненні та прискоренні зношування

Як видно на рисунку 2.17, де показаний характер зміни швидкості зносу, на першому ступені швидкість зносу падає до певної стабілізації

процесу, а в подальшому різко зростає і на другому ступені знову відбувається падіння до стабілізації.



1 – експериментальна крива; 2 – крива, побудована за залежностями
Рисунок 2.17 – Зміна швидкості зношування інструменту, який зміцнений
ОІМП, за наявності уповільнення і прискорення зношування

Характер зміни зношування у цьому випадку описується рівняннями:

$$h_{31} = h_{3a}(1 - e^{-b_1 r}) + B_1 \tau \quad 0 \leq h_{31} \leq h_{32}; \quad (2.29)$$

$$h_{32} = h_{3a}(1 - e^{-b_2 r}) + B_2 \tau \quad h_{32} \leq h_{31}, \quad (2.30)$$

де h_{31} , h_{32} – зношування інструменту по задній поверхні, відповідно, на першому і другому ступенях зношування;

h_{3a} – прироботочне зношування задньої поверхні на першому ступені;

B_1 , B_2 – встановлена швидкість зношування на первинній і вторинній лінійних ділянках;

b_1 , b_2 – показники швидкості первинної і вторинної прироботок.

Іноді при певному поєднанні умов роботи крива зношування зміцнених інструментів складається з ряду ступенів з неодноразовим прискоренням і уповільненням процесу зношування.

Як відомо, зношування інструменту відбувається одночасно по задній поверхні (внаслідок тертя об поверхню деталі) і по передній поверхні (внаслідок тертя стружки, яка сходить), причому спостерігається це в основному при швидкості різання до 100 м/хв.

Особливістю зношування передньої поверхні є утворення лунки на відстані f_0 від різальної кромки (рис. 2.17), що відповідає початку першого ступеня на рисунку 2.18.

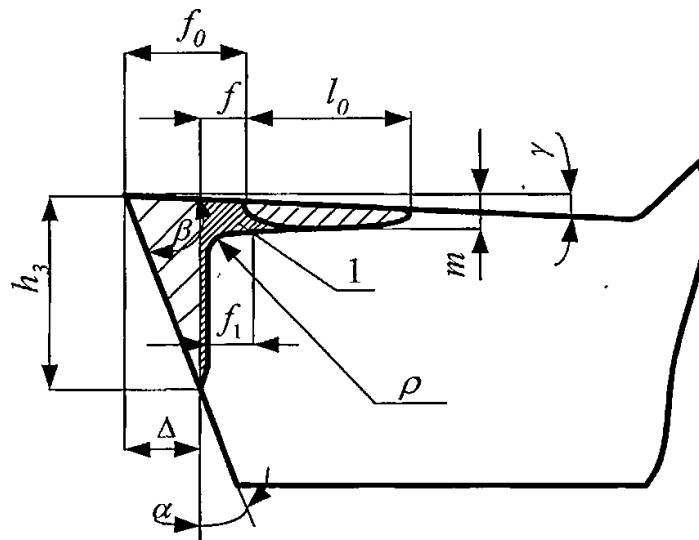


Рисунок 2.18 – Кінетика зношування різального інструменту, який зміцнений ОІМП

По мірі зношування довжина l_0 і глибина лунки m збільшуються. При одночасному зношуванні передньої та задньої поверхонь інструменту ділянку передньої поверхні f , яка знаходиться між лункою зносу та різальною кромкою, поступово зменшується, зменшується також кут загострення β , у результаті чого міцність різальної частини знижується. Оскільки міцність твердого сплаву низька, то це спричиняє руйнування різальної частини. Як було встановлено [12; 14; 51] міцність твердого сплаву після зміцнення ОІМП підвищується. Тому ймовірність руйнування

знижується, але зношувальність задньої і передньої поверхонь продовжує зростати з постійною швидкістю. У певний період часу, відповідний завершенню ступеня 1 на рисунку 2.16, відбувається з'єднання ділянок зношування на передній і задній поверхнях, що спричиняє різке зменшення переднього кута γ від невеликих позитивних до значних негативних величин і зростання радіуса заокруглень різальних кромок. У той момент, коли відбувається «прорив» лунки, починається прискорене зношування (початок ступеню 2, рис. 2.17). Після швидкоплинного «прориву» лунки, показаної на рис. 2.17, протягом 1 хвилини подальші процеси можна розглядати як вторинну прироботку інструменту в нових умовах зношування (початок ступенів 2 і 3, рис. 2.17). Зменшення переднього кута до негативних значень, збільшення радіуса округлення ρ і утворення фаски f_1 (зона 1 на рис. 2.17) сприяють підвищенню зносостійкості інструменту проти абразивного зношування і крихкого руйнування [108].

У рідкісних випадках можлива і багаторазова прироботка інструменту з повторенням циклу: виникнення лунки і фаски зносу – їх зростання – їх прорив і злиття – міграція плями зносу – виникнення лунки і фаски на новому місці тощо. Міграція плями зносу може переходити і на допоміжну задню поверхню.

Існувальна концепція, згідно з якою після прискореного зношування починається стадія катастрофічного зношування з прогресувальною втратою різальних властивостей для твердосплавного інструменту, який зміцнений ОІМП, не завжди знаходить експериментальне підтвердження внаслідок можливих дефектів твердих сплавів. Для більшості різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, зносостійкість у процесі прироботки підвищується.

Слід внести також корективи (табл. 2.3) у величину критерію затуплення твердосплавного інструменту, який зміцнений ОІМП. Так, результати дослідних даних показали, що критерій затуплення збільшується у 4–5 разів у порівнянні з нормативним (табл. 2.3). Завдяки цьому значно збільшується тривалість роботи інструменту, в основному за рахунок підвищення міцності твердого сплаву.

Таблиця 2.10 – Вплив режимів ОІМП на величину зношення інструменту

Режим зміцнення інструменту, умови оброблення	Закономірність зношування	Зношення інструменту по задній поверхні (мм) за часом роботи (хв)				
		5	10	15	20	30
Без зміцнення $V = 60, S = 0,3$	$h_3 = h_a \cdot e^{ar}$	2,08	5,95	-	-	-
B1 $V = 60, S = 0,3$	$h_3 = \frac{A}{2a^2} (1 - e^{-a^2 t^2})$	1,72	3,3	4,2	4,8	-
B2 $V = 60, S = 0,3$	$h_3 = h_{3a} (1 - e^{-br}) + B\tau$	0,46	0,86	1,23	1,56	2,2
B2 $V = 30, S = 1$	$h_{31} = h_{3a} (1 - e^{-b_1 r}) + B_1 \tau$ $h_{31} = h_{3a} (1 - e^{-b_2 r}) + B_2 \tau$	1,03	1,34	3,35	3,7	4,4

2.3 Висновки до розділу 2

1. Для твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, при швидкостях різання, які відповідають попередньому обробленню, характерне зниження швидкості зносу в 2–2,3 разу.

2. Граничне значення подачі для твердосплавних інструментів, які зміцнені ОІМП, збільшується в 1,5–2 рази.

3. При попередньому обробленні матеріалів твердосплавними різальними інструментами, які зміцнені ОІМП, відбувається багаторазова прироботка інструменту з декількома ступенями уповільнення і прискорення процесу зношування, що обґрунтовує підвищення зносостійкості твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ ОІМП НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ФАКТОРИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РІЗАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

3.1 Дослідження зміни міцності при консольному вигинанні твердих сплавів

При дослідженні впливу ОІМП на фізико-механічні фактори, що визначають різальну здатність твердих сплавів, було використано методи моделювання. Як відомо [76; 110], моделі – це є спрощені системи, які відображають окремі обмежені у потрібному напрямку боки явищ певного процесу.

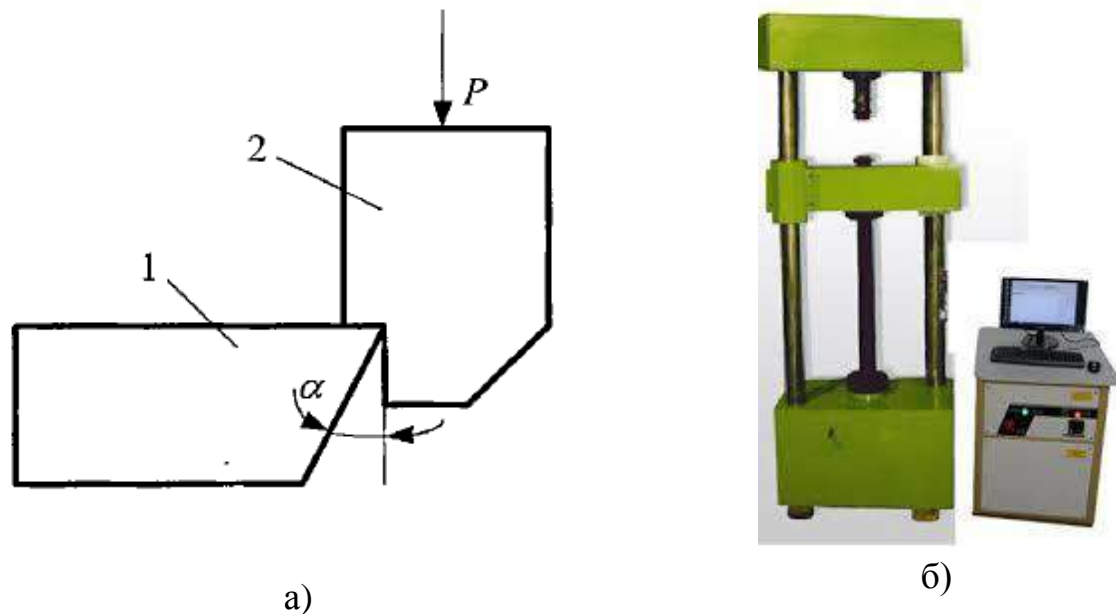
Оскільки попереднє точіння, з одного боку, пов'язано з дією великих навантажень, які внаслідок недостатньої міцності твердого сплаву призводять до руйнування різального клину інструмента [32; 108], з іншого боку, поверхні інструмента піддаються впливу різних абразивних включень заготовки, а отже, піддаються абразивному зношуванню. Ці два боки процесу різання й були прийняті для моделювання.

Випробування зразків при консольному вигинанні проводяться з метою оцінювання міцності матеріалу робочої частини.

Схему навантаження зразка під час проведення випробувань зразків при консольному вигині наведено на рисунку 3.1.

Зразки виготовлялися за формою, близькою до геометричної форми робочої частини інструменту.

Навантажування зразка вироблялося на випробувальній машині УМЕ-10М за напрямком дії головною складовою сили різання P_i . Відповідно до прийнятої моделі випробувань граничне значення руйнівного навантаження P_p фіксували за допомогою приладу у випробувальній машині.



а – схема навантаження зразка при консольному згинанні:

1 – зразок; 2 – пуансон;

б – установка для випробування зразків при консольному вигинанні

Рисунок 3.1 – Випробування зразків при консольному згинанні

Для більш рівномірного розподілу додаткового навантаження на контактному майданчику використовували прокладки зі сталі 20 товщиною 0,1 мм. Як відомо, при попередньому обробленні ймовірність крихкого руйнування інструменту безпосередньо залежить від товщини зрізаного шару, тому за критерій міцності брали відношення руйнівного навантаження P_p до площі контакту F при постійній швидкості навантаження пуансона до 0,01 м/хв.

Обраний метод випробувань дозволяє:

- виявити вплив структурних чинників (структурні дефекти, поверхневі мікромеханічні дефекти тощо) на міцність зразка;
- створити напружений стан, що приводить до руйнування в умовах близьких до тих, що виникають під час роботи різального інструменту, коли відбувається крихке руйнування різальної частини.

У ряді робіт [79] експериментально доведено доцільність застосування статистичної теорії крихкої міцності при різних видах напруженого стану.

Статистична теорія крихкої міцності дозволяє досить достовірно пояснити вплив обсягу тіла на механічні характеристики, ґрунтуючись на положенні про переважальний вплив на міцність найбільш небезпечного дефекту в матеріалі. Тендітні матеріали дуже чутливі до зміни розмірів, тому що для них характерна наявність дефектів. Теорія побудована на припущенні про існування в матеріалі дефектів незалежно від природи і причин, які обумовлюють їх появу.

Найбільш обґрунтованою теорією крихкої міцності слід вважати теорію, яка побудована на асимптотичному розподілі експериментальних значень досить великих сукупностей. Для інженерної практики частіше використовується розподіл Вейбулла [17; 18]. Формула Вейбулла визначає ймовірність крихкого руйнування матеріалу $P(\delta)$ при напруженнях, до дорівнюють або більше δ :

$$P(\delta) = \left\{ 1 - \exp \left[- \int_V \left(\frac{\delta - \delta_n}{\delta_0} \right)^m \cdot dV \right] \right\} \text{ при } \delta \geq \delta_n, \quad (3.1)$$

де δ_n – напруга, нижче якої вірогідність руйнування зразку дорівнює нулю незалежно від розмірів тіла;

δ_0 – параметр, який для одиничного об'єму дає вірогідність руйнування, яка дорівнює 0,632;

m – параметр, який характеризує однорідність матеріалу, ступінь рівномірного розподілу дефектів за обсягом тіла;

V – робочий об'єм.

Параметри δ_n , δ_0 , m неможна розглядати як фізичні константи матеріалу, тому що вони характеризують тільки певний підбір зразків, виготовлених за певною технологією і мають певну геометрію. Залежно від стану поверхні та термічного оброблення, розподіл варіюється у широких межах.

При $V = 1$ і $\delta - \delta_n = \delta_0$: $P(\delta) = 0,632$.

Отже, δ_0 є таким напруженням, яке для одиничного обсягу дає ймовірність руйнування $P(\delta) = 0,632$. Розмір δ залежить від робочого об'єму.

Після перетворення рівняння (3.1) маємо:

$$\lg \ln \frac{1}{1-P(\delta)} = \ln n(\delta') + \lg V. \quad (3.2)$$

При цьому видно, що у прямокутній системі координат з осями $\lg n(\delta')$ і $\lg \ln \frac{1}{1-P(\delta)}$ зміна обсягу випробувальних зразків призводить лише до паралельного переміщення, але не до зміни функції розподілу.

Якщо функції розподілу задати рівнянням:

$$n(\delta') = \left(\frac{\delta - \delta_n}{\delta_0} \right)^m, \quad (3.3)$$

а віссю абсцис є $\lg(\delta - \delta_0)$, то у цих координатах функція розподілу буде лінійною:

$$\lg \ln \frac{1}{1-P(\delta)} = m \cdot \lg(\delta - \delta_n) - m \cdot \lg \delta_n + \lg V. \quad (3.4)$$

Аналіз рівняння (3.4) дозволяє зробити висновок про те, що показник однорідності m не змінюється при однакових умовах виготовлення зразків, у той же час його чисельне значення змінюється при зміні робочого об'єму.

При відомих значеннях міцності двох партій зразків, випробуваних в умовах різних робочих обсягів, значення показника m може бути визначено з рівняння:

$$\frac{\bar{\delta}_1}{\bar{\delta}_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^m, \quad (3.5)$$

де $\bar{\delta}_1, V_1$ – середня міцність і робочий об'єм однієї серії зразків;
 $\bar{\delta}_2, V_2$ – середня міцність і робочий об'єм іншої серії зразків.

Після перетворення рівняння (3.5.) отримаємо:

$$m = \frac{\lg V_2 - \lg V_1}{\lg \delta_1 - \lg \delta_2}. \quad (3.6)$$

У загальному випадку при збільшенні значень δ_0, δ_n, m слід вважати, що середня міцність матеріалу зростає, а розкид значень міцності знижується.

Значення показника m зручніше визначати за формулою, виведеною при розкладанні j -функції у статичний ряд, виходячи з пропозицій про зневажливо малому значенні другого члена рівняння (3.3):

$$m = \frac{127.5}{K_\delta} - 0,5, \quad (3.7)$$

де $K_\delta = \frac{S}{\delta_{cp}}$ – коефіцієнт варіації міцності;

$S = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n}}$, $\varepsilon = \delta_1 - \bar{\delta}$ середньоквадратичне відхилення;

δ_{cp} – середнє арифметичне значення міцності.

Формула (3.7) дає найбільш задовільні результати у порівнянні з результатами, отриманими за формулою (3.6) у діапазоні значення m від 3 до 20 і кількості дослідів більше 30. При $n < 30$ використовують оцінювання S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n-1}}. \quad (3.8)$$

Таким чином, показник m , що характеризує однорідність інструментального матеріалу, може бути оцінений за допомогою коефіцієнта варіації, обчисленому при математичному обробленні достатньої кількості

результатів випробувань однієї серії зразків, кількості експериментів з достовірністю 95,4% може бути визначено за методикою роботи [79].

Результати випробувань показали (рис. 3.2, табл. 3.1, довірчий інтервал: $\Delta\sigma_{изг} = \pm 4,056$ МПа), що оброблення імпульсним магнітним полем дозволяє підвищити характеристики міцності матеріалу, що працює в умовах крихкого руйнування. Як видно з таблиці 3.1, має місце підвищення міцності матеріалу після ОІМП в 1,12 разу, а при обробленні на індукторі № 2 (з підвищеною потужністю) – 1,14–1,22 разу. Магнітне імпульсне оброблення сприяє підвищенню однорідності та ступеню рівномірного розподілу дефектів за обсягом тіла, про що свідчить зниження коефіцієнта варіації міцності в 1,2 разу, а також підвищення показника однорідності в 1,3 разу.

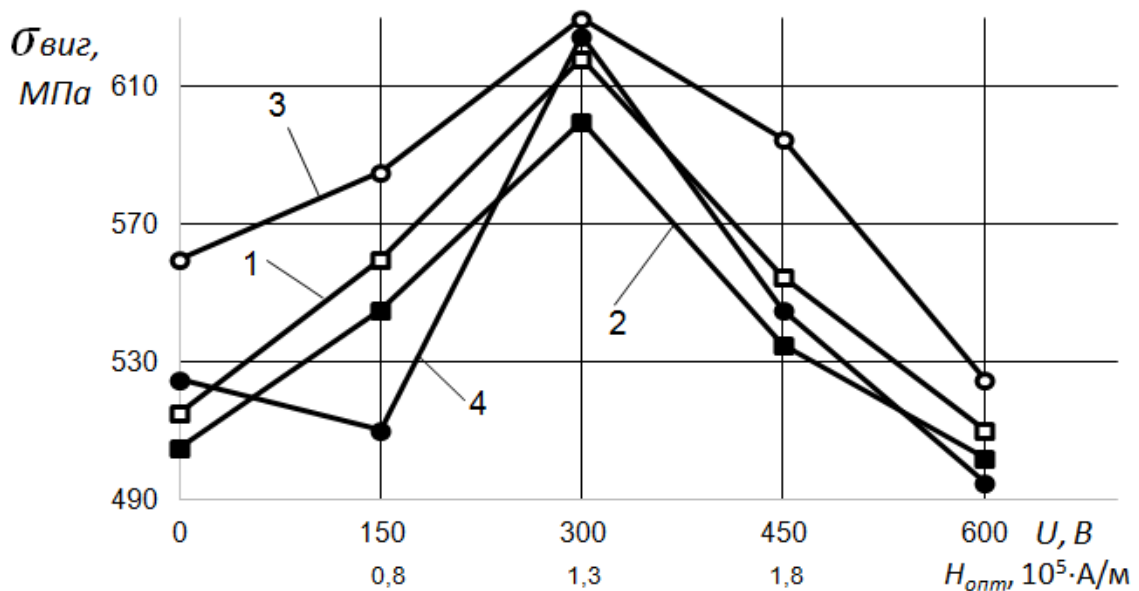


Рисунок 3.2 – Залежність міцності на консольне згинання після ОІМП на індукторі №2: 1 – Т5К10; 2 – Т15К6; 3 – ВК8; 4 – ВК6

Найкращі показники отримані при використанні режиму В2, що підтверджує результати, отримані при форсованих методах випробувань.

Таблиця 3.1 – Вплив ОІМП на міцність твердого сплаву при консольному згинанні

Марка твердого сплаву	Наявність зміцнення		Напруга, при якому відбувається руйнування	Коефіцієнт зміни напруги $\frac{\delta_{ОІМП}}{\delta_{вих}}$	Коефіцієнт варіації міцності K_δ	Показник однорідності m
Т5К10	без зміцнення		515	--	0,68	1,375
	ОІМП		618	1,2	0,52	1,95
Т15К6	без зміцнення		495	-	0,72	1,27
	ОІМП		604,5	1,22	0,6	1,625
ВК8	без зміцнення		558,4	-	0,68	1,375
	ОІМП		625,3	1,14	0,56	1,78
ВК6	без зміцнення		522,25	-	0,71	1,3
	ОІМП (індуктор №2)	В 1	501,3	0,96	0,87	0,97
		В 2	624	1,2	0,58	1,7
		В 3	548	1,05	0,6	1,625
		В 4	491,1	0,92	0,87	0,97
	ОІМП (індуктор №1)	В 2	588	1,12	0,66	1,43

3.2 Дослідження зміни міцності твердих сплавів при дії зосередженого навантаження на зразок, що лежить на двох опорах

Для порівняння були проведені випробування зосередженого навантаження на зразок, який лежить на двох опорах (рис. 3.3)

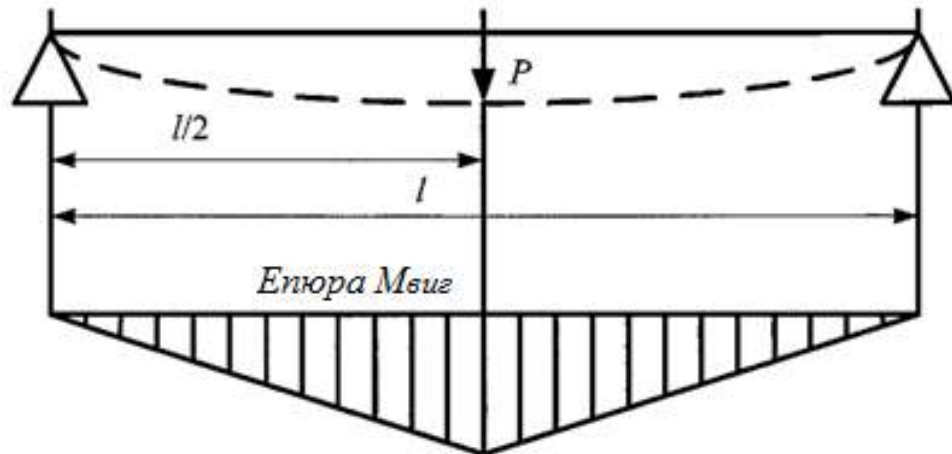


Рисунок 3.3 – Схема випробувань зразків на вигинання при дії зосередженого навантаження

Навантаження в опорах і в місцях докладання зусиль створюються через роликотідшипники для зменшення сил тертя при деформації вигину.

Випробування зразків проводилися на випробувальній машині Р-10. При цьому експерименті моделювався сумарний вплив сил різання P_z і P_y . Межу міцності підраховували за формулою:

$$\delta_{\text{виг}} = \frac{M}{W}, \quad (3.9)$$

де M – вигинальний момент;

W – момент опору перерізуванню.

У разі навантаження зосередженою силою:

$$M = \frac{P \cdot l}{4}, \quad (3.10)$$

де l – довжина прольоту між опорами.

Для прямокутного зразка:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \quad (3.11)$$

де b – висота зразка;

h – ширина зразка.

Отже, робочої формулою для розрахунку пружних напружень при вигинанні зразків прямокутного перерізу є

$$\delta_{виг} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h}, \quad (3.12)$$

де P – навантаження, що фіксується приладом випробувальної машини.

Вимірювання величини δ_{32} здійснювалось на заготовках для прямого прохідного різця розміром 8 x 8 x 40.

У таблиці 3.2 і на рисунку 3.4 (довірчий інтервал: $\Delta\delta_{32} = \pm 1,114$ МПа) наведені результати випробувань зразків при дії зосередженого навантаження на зразок, що лежить на двох опорах. Результати випробувань показали, що ОІМП дозволяє підвищити характеристики міцності матеріалу, що працює в умовах крихкого руйнування.

Як видно з таблиці 3.2 і рисунка 3.4, має місце підвищення міцності матеріалу 1,2–1,22 разу (режим В2). ОІМП сприяє підвищенню однорідності та ступеню рівномірного розподілу дефектів за обсягом тіла, про що свідчить зниження коефіцієнта варіації міцності в 1,8–2,3 разу.

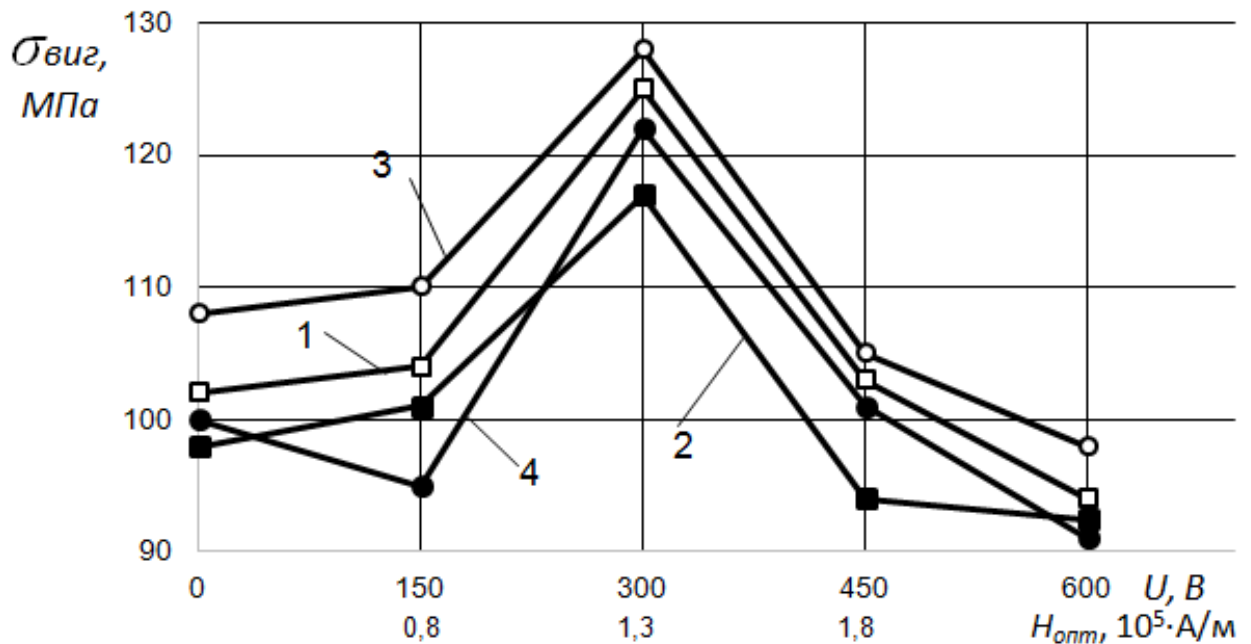


Рисунок 3.4 – Залежність міцності на вигин при дії зосередженого навантаження: 1 – Т5К10; 2 – Т15К6; 3 – ВК8; 4 – ВК6

Найкращі результати отримані на індукторі № 2 при режимі В2, коли міцність підвищилася в 1,2 разу, а показник однорідності властивостей матеріалу у 4,3 разу. Таким чином, якщо різальний інструмент працює в умовах крихкого руйнування, а це при попередньому обробленні по ливарній кірці, робота з ударами, доцільно здійснювати зміцнення ОІМП на індукторі № 2 з режимом В2.

Слід зауважити також, що в однаковій мірі змінюється міцність матеріалу після зміцнення ОІМП при двох різних видах випробувань. Тому при проведенні такого виду експериментів можна обмежитися випробуваннями при дії зосередженого навантаження на зразок як більш простий і дешевий спосіб.

Таблиця 3.2 – Вплив ОІМП на міцність твердого сплаву при дії зосередженого навантаження

Марка твердого сплаву	Наявність зміцнення		Напруга при вигинанні δ_v , МПа	Коефіцієнт зміни міцності $\frac{\delta_{ОІМП}}{\delta_{вих}}$	Коефіцієнт варіації міцності K_δ	Зміна коефіцієнта варіації $\frac{K_{\delta_{вих}}}{K_{\delta_{ОІМП}}}$
Т5К10	без зміцнення		101,3		0,2	
	ОІМП		124	1,22	0,1	2
Т15К6	без зміцнення		98,7		0,16	
	ОІМП		118	1,2	0,17	2,3
ВК8	без зміцнення		107		0,22	
	ОІМП		131	1,22	0,12	1,9
ВК6	без зміцнення		99,6		0,18	
	ОІМП	В 1	95,4	0,96	0,15	1,2
		В 2	121	1,21	0,1	1,8
		В 3	102,7	1,03	0,1	1,8
		В 4	89,8	0,9	0,15	1,2

3.3 Дослідження зміни конструкційної міцності різальних пластин на триточкове згинання

Ефективне застосування ОІМП у заводській практиці стримується відсутністю даних щодо впливу цього оброблення, а також різних режимів ОІМП на зміни комплексу властивостей, що визначають експлуатаційні характеристики твердосплавної пластини. Відповідно до [45] в умовах різання на важких верстатах, коли, як зазначалось вище, значна зона передньої поверхні знаходиться в умовах дії напружень розтягу, важливим показником роботоздатності є міцність в умовах розтягування або згинання.

Стандартні методи випробувань твердих сплавів на згинання й інші види тестування з використанням спеціальних зразків не відображають реальних властивостей інструменту внаслідок великої різниці у технології їх виготовлення, конструкції, фактичного напруженого стану та геометрії робочої частини по відношенню до відповідальних ділянок інструменту у зоні різання. Але вони визначають важливі тенденції механічної поведінки, які можуть бути базовими для орієнтовного оцінювання роботоздатності нових інструментальних матеріалів та контролю якості інструменту за відсутності можливості виконання відповідних складних експериментів. Важливість розвитку методів контролю або прогнозування міцності та довговічності зростає внаслідок запровадження нових технологій зміцнення твердих сплавів за рахунок об'ємної та поверхневої модифікації. На жаль, конкретні результати модифікації та дані щодо фактичного рівня підвищення міцності та ресурсу інструменту не надаються виробниками.

У таблиці 3.2 показані результати випробувань конструкційної міцності на згинання квадратних змінних різальних пластин із твердого сплаву Т5К10 з розмірами 15,875 x 15,875 x 4,76 мм, що використовуються для токарних прохідних і розточувальних різців, а також торцевих фрез. На різальні поверхні пластин було нанесено PVD-покриття завтовшки 5 мкм. Пластини було оброблено імпульсним магнітним полем. Застосовували

експериментальні режими оброблення, що відрізнялися потужністю випромінювання, напруженістю магнітного поля та частотою імпульсів.

Пластини випробували на триточкове згинання. Поверхню з різальною кромкою та покриттям розташовували у зоні дії напружень розтягу. Тестування проведено на гідравлічній машині ZD-40 зі швидкістю навантаження 6,5–10 МПа/с (рис. 3.5). Випробували три партії пластин кількістю по 5 шт. Для порівняння міцності на згинання традиційних зразків $\sigma_{зг зр}$ з цього сплаву з реальним рівнем міцності у різальних пластинах $\sigma_{зг пл}$ у таблиці 3.3 дано відношення $\sigma_{зг пл}/\sigma_{зг зр}$ з урахуванням діапазону зміни літературних даних за різними джерелами щодо границі міцності сплаву Т5К10 (1150-1700 МПа).

Випробування на міцність при триточковому згинанні проведено також змінних різальних пластин у формі неправильного шестикутника (ламаний трикутник) з твердого сплаву Т15К6 без покриття з розмірами товщиною 4,76мм. Дві партії пластин кількістю по 6 шт. тестувались на гідравлічній машині ZD-40 з швидкістю навантаження 20–22 МПа/с.



Рисунок 3.5 – Тестування на гідравлічній машині ZD-40

Таблиця 3.3 – Конструкційна міцність на поперечне згинання різальних пластин зі сплаву Т5К10

Стан пластин	Границя міцності на згинання $\sigma_{зг\text{ пл}}$, МПа	Розкид $\sigma_{зг\text{ мін}} \dots \sigma_{зг\text{ макс}}$, МПа	Відношення $\sigma_{зг\text{ пл}}/\sigma_{зг\text{ зр}}$	Ступінь зміцнення, %
Вихідний	892	711/1046	0,5...0,75	-
Зміцнений ОІМП за режимом В1	1037	762/1280	0,6...0,9	16
Зміцнений ОІМП за режимом В2	1130	884/1295	0,66...0,98	27

Досліджувались пластини у вихідному стані та зміцнені обробленням імпульсним магнітним полем за режимом В2. Поверхню з різальною кромкою розташовували у зоні дії напружень розтягу. Результати випробувань наведено у таблиці 3.4.

Аналіз отриманих результатів випробування різальних пластин зі сплавів Т5К10 та Т15К6 (рис. 3.6–3.7), які зміцнені ОІМП показує, що внаслідок впливу комплексу технологічних і конструкційних факторів конструкційна міцність на згинання різальної пластини з твердого сплаву є значно меншою, ніж міцність традиційних стандартних призматичних зразків. Залежно від технології оброблення та умов випробувань зразків міцність реальних різальних пластин може зменшуватися на 10–50% відносно результатів традиційних механічних випробувань твердих сплавів на згинання, що безпосередньо впливає на роботоздатність інструменту, достовірність оцінювання його довговічності та на ефективність його застосування у важких умовах різання.

Для пластин з Т15К6 для зразків у вихідному стані отримано також, що значення $\sigma_{зг\text{ пл}}$ значною мірою залежить від того, яка поверхня знаходиться в зоні розтягування: при розташуванні плоскої поверхні в зоні розтягування середнє значення $\sigma_{зг\text{ пл}}$ становить 799 МПа ($\sigma_{зг\text{ пл}}$ при розташуванні в зоні розтягування поверхні з різальною кромкою – 642 МПа).

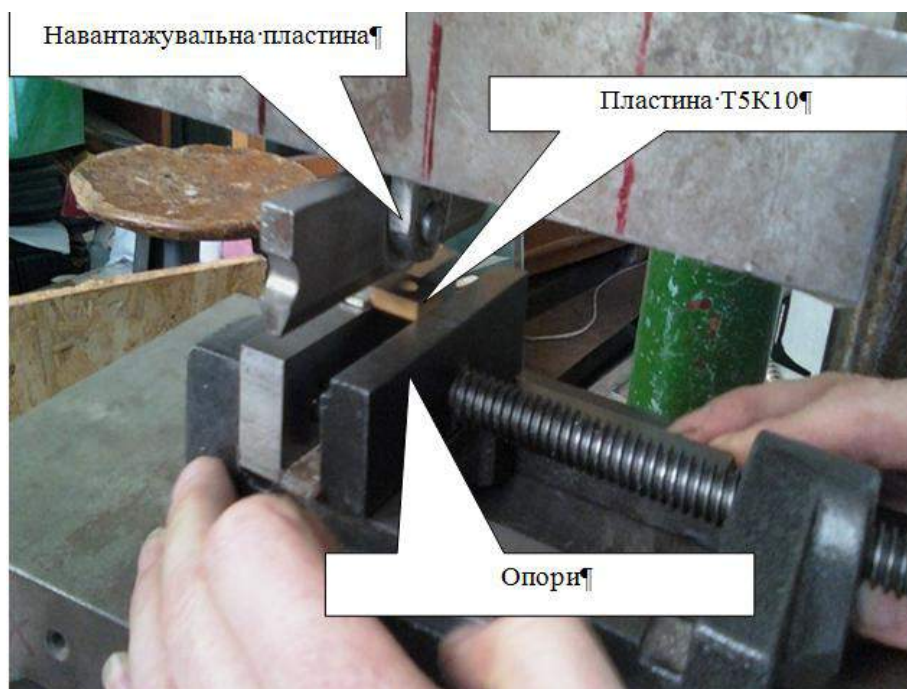


Рисунок 3.6 – Тестування на згинання змінної різальної пластини з Т5К10 на устаткуванні ZD-4



Рис. 3.7 – Тестування на згинання змінної різальної пластини з Т15К6 на устаткуванні ZD-40

Таблиця 3.4 – Конструкційна міцність на поперечне згинання різальних пластин із сплаву Т15К6

Стан пластин	Граничне навантаження (середнє значення) P , кг	Границя міцності на згинання (середнє значення) $\sigma_{zg\text{ пл.}}$, МПа	Розкид $\sigma_{zg\text{ мін.}} \dots \sigma_{zg\text{ макс.}}$, МПа	Відношення $\sigma_{zg\text{ пл.}}/\sigma_{zg\text{ зр}}$	Ступінь зміцнення, %
Вихідний	655	642	549/804	0,61...0,80	-
Зміцнений ОІМП за режимом В2	750	735	608/804	0,67...0,80	14%

Встановлено також, що застосований спосіб модифікації твердого сплаву Т5К10 дозволяє підвищити його міцність на згинання пластини з цього сплаву на 16–27 % залежно від режиму оброблення, а оброблення ОІМП за другим режимом підвищило міцність на згинання пластини із Т15К6 на 14%. Встановлено також, що після ОІМП зменшується розкид значень міцності на згинання. Можна припустити, що підвищення міцності твердого сплаву в результаті зміцнення ОІМП пов'язано із зменшенням напружень розтягу в кобальтовій фазі, що перешкоджає розвитку тріщин.

3.5 Вплив ОІМП на характеристики конструкційної міцності зразків, які виготовлені з напайних пластин

Особливо екстремальною з точки зору навантаження на різальні пластини є поперечне оброблення, яке відбувається із значними величинами глибин різання (15–20 мм) та подач (до 3 мм), а також супроводжується коливаннями фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. За таких надважких умов на ПрАТ «НКМЗ» використовуються напайні титанокобальтові і вольфрамокобальтові сплави.

Опір руйнуванню інструменту під час оброблення на важких верстатах значною мірою визначається величиною границі міцності твердосплавної пластини. При застосуванні напайних пластин важливим є продовження як сумарного строку їх експлуатації, так і часу роботи без руйнування різальної частини при кожному акті точіння. Це обумовлює необхідність визначення вихідного значення границі міцності та її розкиду у межах вибірки пластин, вияв причин значного розкиду із застосуванням методів, що є доступними в умовах інструментального цеху, визначення величини необхідного поверхневого шару при перезагострюванні, а також вибір простого дешевого та доступного у виробничих умовах методу модифікації твердого сплаву.

Спільно з ІПМіц ім. Г. С. Писаренка була розроблена методика оцінювання конструкційної міцності напайних твердосплавних пластин і встановлення її зв'язку з показниками, що можуть бути визначені при дослідженнях і в умовах виробництва сервісною службою підприємства. (рис. 3.8)

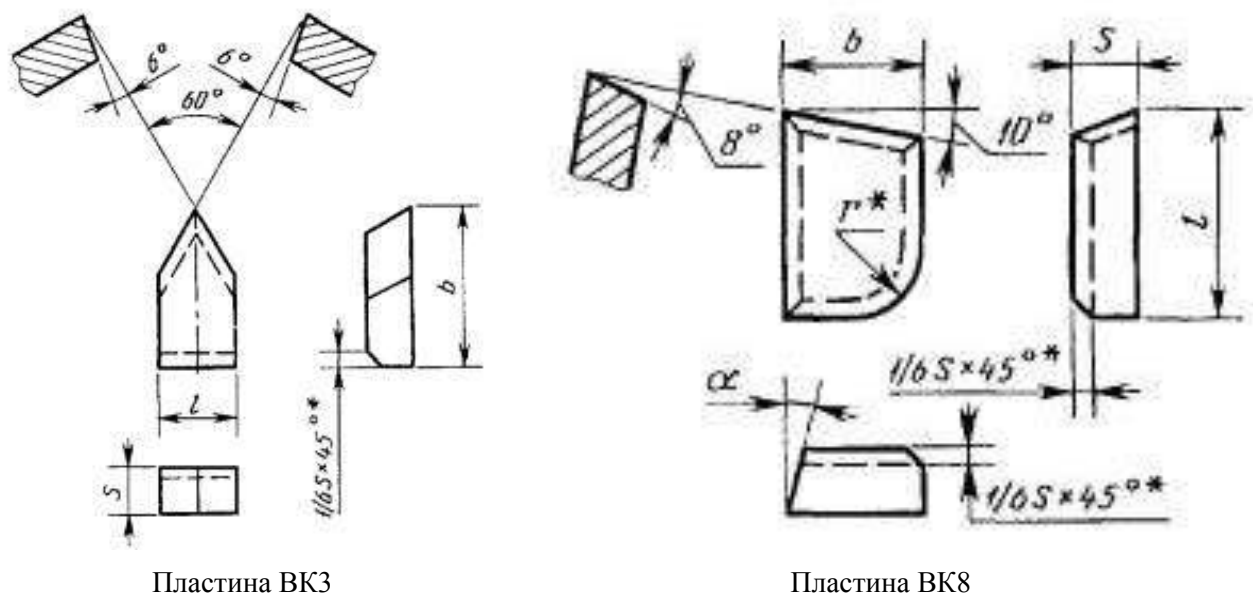


Рисунок 3.8 – Геометрія напайних пластин

Для дослідження міцності напайних пластин з них було виготовлено зразки шляхом розрізання вздовж пластини, що дозволило задовольнити вимозі щодо зменшення зусилля навантаження, виявлення впливу дефектності на характеристики міцності, а також отримати данні про міцність і дефектність різних частин пластини (рис. 3.9).



а)



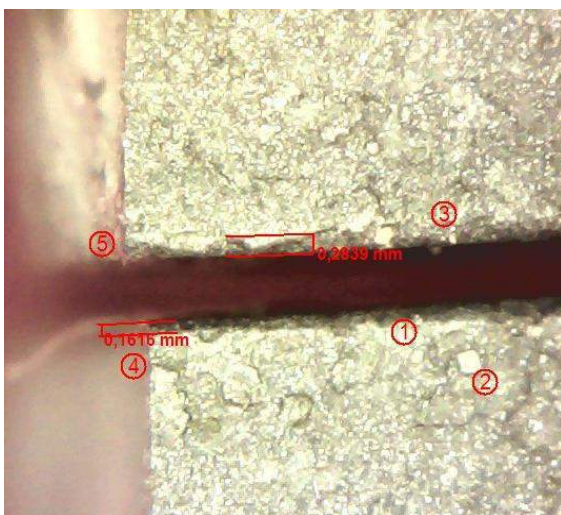
б)

Рисунок 3.9 – Напайні різальні пластини зі сплаву ВК3 і ВК8 (а); зразки з пластин ВК3 та ВК8, виготовлені шляхом ерозійного різання (б)

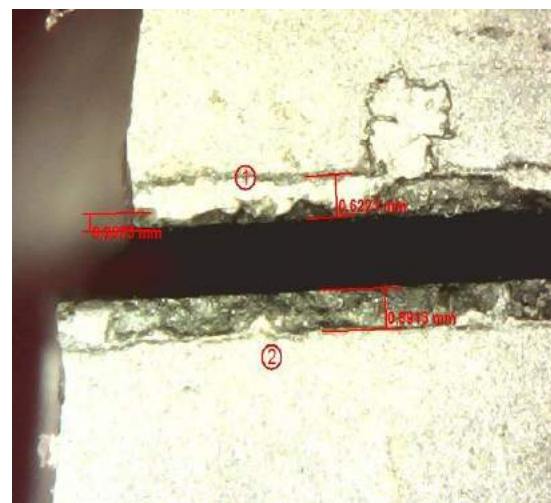
Досліджувану поверхню розташовували в зоні розтягу при триточковому згинанні. Зменшення товщини виготовлених зразків дозволяє зменшити накопичену енергію у системі зразок – навантажувальний пристрій і створити умови для більш повільного росту тріщин на стадії докритичного розвитку. Рекомендовано проведення фрактографічних досліджень

з використанням цифрового мікроскопу BW-400X, що дозволяє визначити джерела руйнування, які обумовлені мікро- та макродефектами структури, характером формування тріщин. Фрактографічні дослідження виявили, що низький рівень міцності ($\sigma_{зг} = 900$ МПа) обумовлений підвищеним рівнем дефектності (рис. 3.10, розміри дано з масштабним коефіцієнтом $k \times 2,86$), у той час як для високоміцних зразків ($\sigma_{зг} = 1477$ МПа) відсутні особливо великі дефекти поверхні. Значення границі міцності на згин зразка з ВК8 з низьким рівнем дефектності наближається до такого, що міститься у довідковій літературі. Так, відповідно до ГОСТ 3882-74 границя міцності на згинання ВК8 має становити не менше ніж 1666 МПа. Таким чином, фактичний рівень конструкційної міцності тврдосплавних пластин значно відрізняється і є значно меншим від такого, що визначається при випробуванні стандартних зразків.

Показано, що руйнування зразків відбувається у результаті утворення та просування магістральної тріщини. Для зразка з низьким рівнем вихідної дефектності спостерігається декілька поверхневих тріщин, які одночасно просуваються поряд з магістральною, що є ознакою високої якості матеріалу та повної реалізації його міцності (рис. 3.11, $k \times 2,86$).



Вихідний зразок $\sigma = 1477$ МПа



Вихідний зразок $\sigma = 900$ МПа

Рисунок 3.10 – Кромочні дефекти вихідних зразків з високим та низьким рівнем міцності

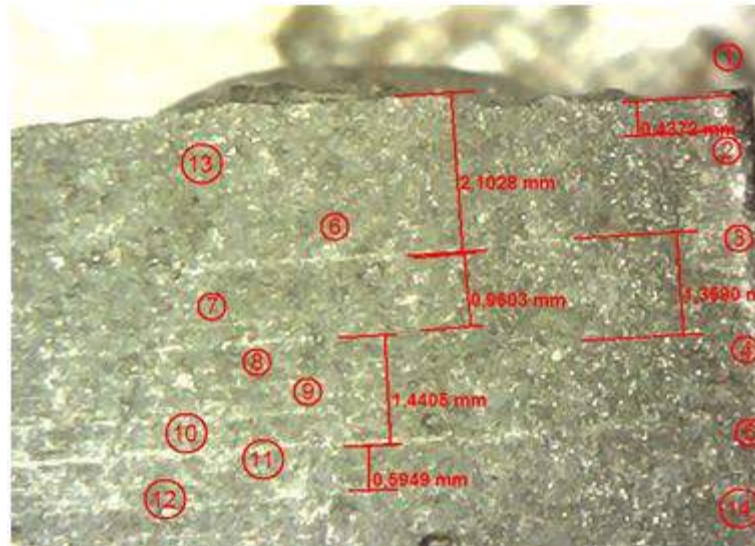


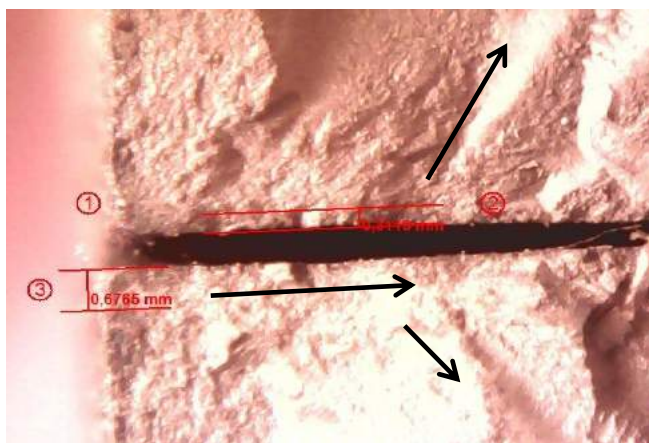
Рисунок 3.11 – Поверхневі тріщин, які одночасно просуваються поряд з магістральною

Таким чином доведено, що для оцінювання впливу методів модифікації твердого сплаву слід порівнювати зразки, які зруйновані від одного типу та розміру дефектів, тобто порівнювати зразки, що мають сумірні дефекти у фокусі руйнування.

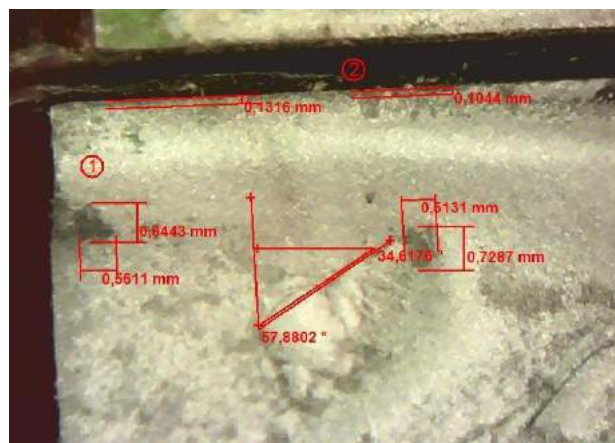
Такі фрактографічні дослідження можна рекомендувати як прийомочні, що проводяться для певної виборки з кожної партії зразків.

Досліджено вплив ерозійного різання на характеристики міцності. Ерозійне різання створило на поверхні середини твердосплавної пластини грубі, однорідні дефекти, вплив яких на характеристики об'ємної міцності привів до зменшення границі міцності при згинанні на 15–26 % як для зразків у вихідному стані (на 15 %), так і для зразків, оброблених імпульсним магнітним полем (26 %).

Показано, що при відкиданні зразків, зруйнованих від значних технологічних дефектів, порівняння зразків до та після ОІМП показує підвищення однорідності сплаву та меншу рельєфність зламу (рис. 3.12).



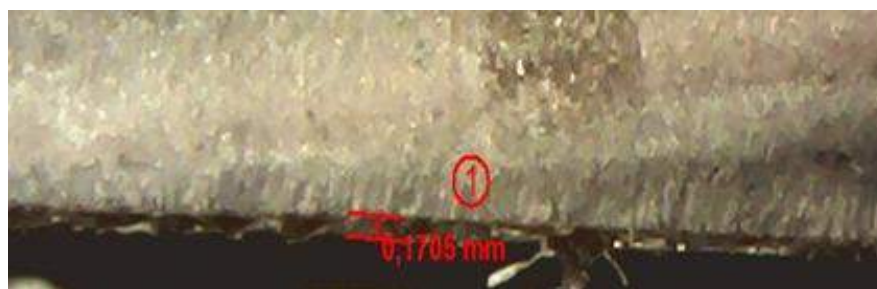
Зразок без оброблення з низькою дефектністю
 $\sigma_{зг}$ 1477МПа



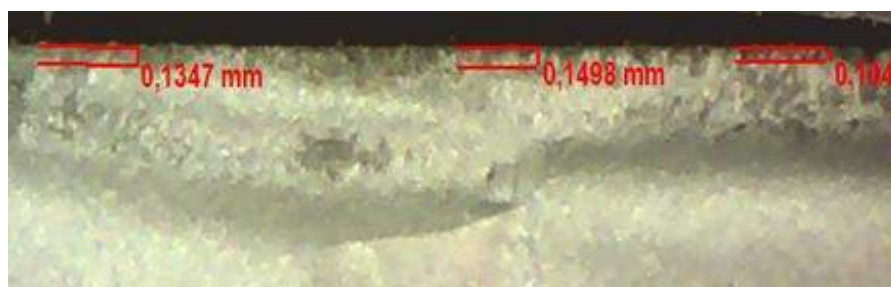
Зразок після ОІМП $\sigma_{зг}$ – 1653МПа
 підвищена однорідність,
 менша рельєфність зламу

Рисунок 3.12 – Фокус зламу та початкові ділянки зростання
 магістральної тріщини

Отримано також, що ОІМП спричиняє зменшення товщини тріщинуватого шару (рис.3.13).



Вихідний зразок



Зразок після ОІМП

Рисунок 3.13 – Тріщинуватий шар вихідного зразка
 та зразка, який зміцнений ОІМП

Порівняльні випробування зразків, виготовлених методом електроерозійного різання з напайних пластин із сплаву ВК8 (товщина зразка h – 3,25–3,85мм; відстань між опорами 20 мм, співвідношення товщини до відстані між опорами 0,1625–0,1925 різальна поверхня в зоні розтягу, опорна поверхня в зоні розтягу, поверхня після ерозійного різання в зоні розтягу) та сплаву ВК3 (товщина зразка h – 2,85–3 мм; відстань між опорами 20 мм, співвідношення товщини до відстані між опорами 0,1425–0,1500 різальна поверхня в зоні розтягу, опорна поверхня в зоні розтягу), у вихідному стані та після ОІМП дозволили виявити вплив модифікації імпульсним магнітним полем на границю міцності зразків. Результати випробувань представлено в таблицях 3.5–3.6.

Таблиця 3.5 – Результати випробування зразків, отриманих розрізанням пластини ВК3

Зразки з ВК3 розрізані на 2 частини вздовж	№	Розмір, мм	$\sigma_{зг}$, МПа	$\bar{\sigma}$, МПа
		$b = 10\text{мм}$		
		h		
Вихідні (передня поверхня)	1	2,9	1070	960
	2	3,0	1070	
	3	2,85	739	
Вихідні (опорна поверхня)	1	3,0	1300	1281
	2	2,9	1141	
	3	2,85	1403	
$\bar{\sigma}$, МПа по всім зразкам				1120
σ_{\min}				739
σ_{\max}				1403
ОІМП (передня поверхня)	1-м	2,95	1034	1135
	2-м	2,9	1070	
	3-м	2,9	1302	
ОІМП(опорна поверхня)	1-м	2,9	1060	1267
	2-м	2,9	1396	
	3-м	2,9	1284	
$\bar{\sigma}$, МПа по всім зразкам з ОІМП		Спостерігається стабілізація сплаву, зменшується розкид величини границі міцності, середнє значення підвищується на 8%		1190
σ_{\min}				1034
σ_{\max}				1396

Для зразків ВК8 (серединок) досліджено вплив ерозійного різання на характеристики міцності. Ерозійне різання створило на поверхні серединки твердосплавної пластини грубі, однорідні дефекти, вплив яких на характеристики об'ємної міцності спричинив зменшення границі міцності при згинанні на 15–26% як для зразків у вихідному стані (на 15 %), так і для зразків, оброблених імпульсним магнітним полем (26 %).

Таблиця 3.6 – Результати випробування зразків, отриманих розрізанням пластини ВК8

Зразки з ВК8 Розрізані на три частини вздовж	Розмір, мм	Розмір, мм	$\sigma_{зг}$, МПа	$\bar{\sigma}$, МПа	Зміна $\bar{\sigma}_{вих}/\bar{\sigma}_{ОІМ}$ П%
	<i>b</i>	<i>h</i>			
Різальна поверхня					
Вихідні	13,5	2,85	1477	1225	Збільшен ня 17%
	13,5	2,45	900		
	13,5	2,5	1298		
ОІМП	13,5	2,48	1653	1428	
	13,5	2,50	1404		
	13,5	2,45	1227		
Серединки					
ОІМП	13,0;	2,34	1160	1159 - наслідок обробки зменшення на 15%	Зменшен ня 10%
	13,5;	2,34	1138		
	13,5;	2,34	1180		
	12,5;	2,25	980	1045– наслідок оброблення зменшення на 26%	
	12,5	2,25	985		
	12,5	2,35	1170		
Опорна поверхня					
Вихідні	11,5	2,5	1146	1146	Збільшен ня 5%
	Зразки із значними дефектами				
ОІМП	11,5	2,6	1198	1207	
	11,5	2,35	1086		
	11,5	2,35	1336		

Аналіз результатів випробувань зразків зі сплаву ВК3 показує (табл. 3.7), що внаслідок ОІМП спостерігається стабілізація властивостей матеріалу, зменшується розкид величини границі міцності, значно підвищується мінімальна величина границі міцності $\sigma_{зг \min}$ (на 40 %), середнє $\bar{\sigma}_{зг}$ значення границі міцності збільшуються приблизно на 6 %, максимальне $\sigma_{зг \max}$ практично не змінюється.

Таблиця 3.7 – Результати випробувань при триточковому згинанні зразків, отриманих розрізанням пластин ВК3 та ВК8

Матеріал	Стан	$\sigma_{зг \min}$, МПа	$\sigma_{зг \max}$, МПа	$\bar{\sigma}_{зг}$, МПа	Коефіцієнт варіації v , %
ВК3	вихідний	739	1403	1120	19,0
	після ОІМП	1034	1396	1190	12,0
ВК8	вихідний	900	1477	1205	17,5
	після ОІМП	1086	1653	1317	14,0

Результати випробувань зразків, виготовлених з пластин ВК8, окрім тих, для яких у зоні розтягу поверхня після ерозійного різання, показали, що після ОІМП зменшується розкид величини границі міцності, спостерігається підвищення середніх значень границі міцності на згинання на 9 %, максимальних значень – на 12 %, мінімальних – на 20 %.

Таким чином, розроблено методичні засади оцінювання характеристик конструкційної міцності твердосплавних різальних пластин з використанням вирізаних з них спеціальних зразків, їх випробувань в умовах поперечного згинання. За результатами оцінювання конструкційної міцності напайних пластин зі сплавів ВК3 і ВК8 показано, що їх реальні характеристики міцності значно відрізняються від результатів випробувань стандартних зразків і дозволяють підвищити достовірність контролю якості різального інструменту та вдосконалювати технологію його оброблення та модифікації за параметрами міцності. Встановлено, що модифікація твердих сплавів ВК3

та ВК8 обробленням імпульсним магнітним полем має наслідком стабілізацію механічних характеристик, зростання границі міцності на згинання.

3.6 Прогнозування втомної міцності твердого сплаву після ОІМП

Надійне оцінювання границі витривалості при циклічному навантаженні в умовах гармонічного та динамічного режимів зміни напружень у циклі для модифікованих твердих сплавів, що враховують особливості роботи важких верстатів, відсутнє. Проведення відповідних експериментальних досліджень потребує розроблення спеціальних методик, багато часу і значних матеріальних витрат. Тому для оперативного попереднього оцінювання ефективності режимів оброблення за характеристиками втомної міцності корисними можуть бути непрямі розрахункові методи прогнозування, що базуються на узагальненні відомих експериментальних результатів цього напрямку.

Тому важливо оцінити можливості прогнозування характеристик циклічної міцності твердих сплавів на основі експериментальних значень статичної міцності, у тому числі для сплавів, які зміцнені ОІМП.

Найбільш детально досліджено міцність і довговічність основних типів вітчизняних твердих сплавів у роботі [63]. Серед важливих характеристик міцності твердих сплавів для важких умов експлуатації, окрім твердості, визначальними вважаються міцність на згинання при статичному та циклічному навантаженні. У таблиці 3.11 наведено характеристики міцності деяких вольфрамокобальтових і титановольфрамкових твердих сплавів [54; 58; 63], які можуть бути використані для визначення базових закономірностей зміни їх співвідношення з рівнем короткочасної міцності на згинання.

Для порівняння механічних характеристик сплавів групи ВК приймали однакові міцності на згинання за результатами випробувань [63] партії

твердих сплавів, які відрізнялися від наведених даних за ГОСТ 3882-74 та іншим джерелам (дано у дужках). За відсутності цих результатів (ВК 10) порівняння здійснювали на основі даних ГОСТ 3882-74.

Міцність на згинання $\sigma_{зг}$ сплавів ВК і ударна в'язкість a підвищуються із збільшенням процентного вмісту кобальту. По відношенню до сплаву ВК8 міцність на згинання сплаву ВК20 збільшується у 1,5 рази, а ударна в'язкість більше ніж удвічі. Така важлива закономірність є справедливою і для границі витривалості сплавів при гармонічному та ударному циклічному навантаженні при пульсувальному циклі. При цьому зменшується твердість по Вікерсу (для сплаву ВК20 у 1,5 разу). Важливою тенденцією є також зменшення міцності на стискання при циклічному ударному навантаженні (у 2,37 разу) табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Міцність на згинання і механічні характеристики твердих сплавів

Марка сплаву	Кобальт	Границя міцності на згинання $\sigma_{зг}$ дані випробувань [3], (інші дані), МПа	Границя витривалості при пульсувальному циклі, МПа та співвідношення з $\sigma_{зг}$			Твердість $HV, 10^{-3}$ МПа	Ударна в'язкість $a, \times 10^{-3}$ Дж/м ²
			$\sigma_{0зг} / \sigma_{зг}$ (10^5 цикл)	$\sigma_{0уд} / \sigma_{зг}$ (10^5 цикл)	$\sigma_{0ст} / \sigma_{зг}^*$ (2×10^6 цикл)		
ВК 6	6	1450 (1300–1900)	~820/ 0,56 (1250/0,69)	900/ 0,61	5600/3,8	15,0	16,7
ВК 8	8	1480 (1480–2000)	1030/ 0,62	1100/0,66	5300/3,2	14,0	20,6
ВК10	10	1764 (1764–2000)	1120 0,63	1230/0,70	5100/2,9	-	-
ВК 15	15	1900 (1862–2200)	1350/ 0,71	1480/0,79	4800/2,6	11,5	31,39
ВК 20	20	2160 (2000–2580)	1445/ 0,67	1590/0,62	4200/1,6	9,8	37,28
T15K6	6	1100 (1100–1300)	900/ 0,75 (1150/0,88)	-	-	-	18,0
T14K8	8	1270 (1150–1300)	~800/ 0,63 (1250/0,85)	-	-	-	17,0
T5K10	10	1550 (1150–1700)	930/ 0,6 (1250/0,80)	-	-	-	22,0

Примітка: *для зерна 1 мкм

За наведеними результатами були розраховані середні значення співвідношення границь витривалості сплавів до міцності на згинання при

статичному навантаженні. Для сплавів ВК при гармонічних циклічних випробуваннях $\sigma_{0зг}/\sigma$ було у діапазоні 0,55–0,72, при динамічних $\sigma_{0уд}/\sigma_{зг}$ знаходилось у діапазоні 0,6–0,8. Дещо більшим це співвідношення є для сплавів групи ТК. Діапазон експериментального співвідношення $\sigma_{0зг}/\sigma_{зг}$ при гармонічних циклічних випробуваннях сплавів ТК склав 0,6–0,8.

На рівень границі витривалості твердих сплавів значно впливає метод оброблення інструменту. Залежно від нього границя витривалості для сплаву ВК8 знаходиться у межах від 420 МПа після електроіскрового оброблення до 1050 МПа при якісному алмазному обробленні кругом АСМ 40Б. Відповідний діапазон зміни границі витривалості для сплаву Т5К10 складає 420–930 МПа [54].

Встановлено, що модифікація ОІМП твердого сплаву Т5К10 дозволяє підвищити його міцність на згинання на 16–27 % залежно від режиму оброблення імпульсним магнітним полем [90]. Отримано зростання середнього значення границі міцності на 8 % і на 12 % після ОІМП для вольфрамокобальтових сплавів ВК3 та ВК8, відповідно.

Для визначення впливу такої модифікації на втомні характеристики було виконано попереднє оцінювання можливого підвищення границі витривалості пластин при циклічному навантаженні з використанням закономірностей втомного руйнування твердих сплавів і експериментально встановлених співвідношень їх міцності на згинання при статичному і циклічному навантаженнях.

Внаслідок довготривалості та високої вартості випробувань на втому металевих конструкційних матеріалів широке застосування для оцінювання границі їх витривалості отримали непрямі методи, що базуються на результатах статичних випробувань зразків та елементів і результатах кореляційного й регресійного аналізу відомих експериментальних результатів при циклічному навантаженні.

Під час перших таких оцінюваннях границю витривалості сталей приймали як певну частку границі міцності в умовах розтягування:

$$\sigma_{-1} = K \sigma_B, \quad (3.13)$$

де для багатьох сталей приймали $K = 0,4-0,6$ [104; 111].

Залежно від властивостей матеріалу, технології, конструкції та напруженого стану елементів, режимів і умов циклічного навантаження було встановлено чисельні емпіричні залежності між границею витривалості та характеристиками механічних властивостей металів – границею текучості, твердістю та іншими [104].

Для орієнтовного оцінювання границі витривалості при розтягуванні σ_{-1} , згинанні $\sigma_{-1зг}$ і крутінні τ_{-1} рекомендуються такі співвідношення: для сталей $\sigma_{-1} = 0,8\sigma_B$, для крихких матеріалів типу чавуну $\sigma_{-1} = 0,65\sigma_{зг}$, $\tau_{-1} = 0,8\sigma_{зг}$, для сталей і легких сплавів $\tau_{-1} = 0,55\sigma_{зг}$. Ці співвідношення відображають важливі загальні тенденції але потребують обов'язкового уточнення для оцінювання реальної працездатності конструкцій.

Експериментальні результати різних джерел, наведені у таблиці 3.8, та виконане їх узагальнення вказують на те, що залежно від хімічного складу, структури та технологій, застосованих для виготовлення і оброблення інструменту характеристики твердих сплавів можуть визначатися закономірностями, що є характерними для крихких або пружно-пластичних міцних металевих сплавів. Так, для сплавів ВК6, ВК8 і ВК10 з меншим вмістом пластичного кобальту параметр $\sigma_{0зг}/\sigma_{зг}$ коливається від 0,55 до 0,65, як і для чавуну при симетричному циклі навантаження. Для більш пластичного сплаву ВК15 і титановольфрамкових твердих сплавів співвідношення $\sigma_{0зг}/\sigma_{зг}$ може бути більш високим – від 0,6 до 0,8.

На основі великого обсягу статистично достовірних результатів у роботі [100] було показано можливість надійного оцінювання границі втомної міцності при симетричному згинанні σ_{-1} широкого кола конструкційних металевих сплавів на основі значень їх границі міцності при статичному розтягуванні σ_g . Діапазон значень границі міцності був від 100–

650 МПа для сплавів алюмінію до 1700–2150 МПа для вуглецевих і легованих сталей. Для розрахунків використовувалися лінійне та степеневе рівняння лінії регресії:

$$\sigma_{-1} = a + b \sigma_B, \quad (3.14)$$

$$\sigma_{-1} = c \sigma_B^a, \quad (3.15)$$

яке при логарифмуванні зводиться до лінійного

$$\lg \sigma_{-1} = \lg c + \lg \sigma_B \quad (3.16)$$

На рисунку 3.14 показано експериментальні залежності границь витривалості для твердих сплавів ВК (крива 1) та титановольфрамкових сплавів (крива 2), побудовані нами за узагальненими результатами, наведеними у таблиці 3.8. Значення границь міцності та витривалості на згинання приймали за результатами випробувань і даними [63] (без дужок). Ці значення границі витривалості відповідають меншим величинам співвідношення $\sigma_{0и}/\sigma_{зг}$ у порівнянні з показаними у дужках. Такий підхід забезпечує збільшення запасу міцності і довговічності при прогнозуванні втомної міцності твердих сплавів.

Нелінійна форма кривої 1 для сплавів групи ВК не відповідає рівнянням (3.14) і (3.15) і при $\sigma_{зг} \geq d$ краще може бути апроксимована емпіричним рівнянням

$$\sigma_{0зг} = b + c (\sigma_{зг} - d)^a, \quad (3.17)$$

де параметри $b = 500$, $c = 1,55$, $d = 1000$, $a = 0,9$.

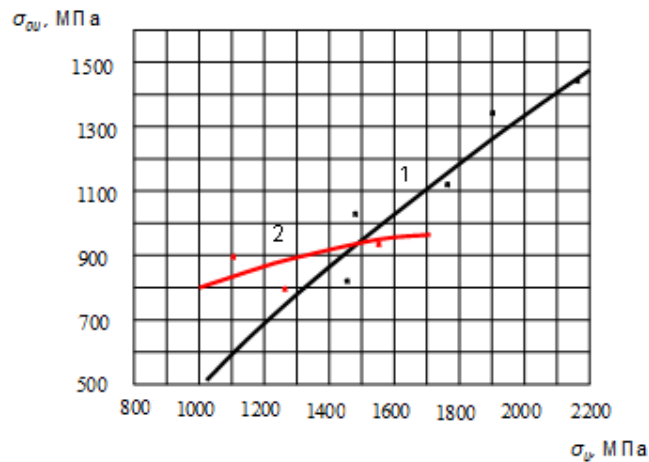


Рисунок 3.14 – Узагальнені залежності границь витривалості від статичної міцності на згинання для твердих сплавів ВК (1) та ТК(2)

Таким чином, використання графіка (рис. 3.14) та залежності (3.17) дозволяє зробити прогноз щодо приросту $\sigma_{0зг}$, виходячи з експериментально отриманого значення $\sigma_{зг}$ модифікованого сплаву. Так, очікуємо, що зразку з Т5К10, модифікованому ОІМП за режимом 1 ($\sigma_{зг} = 1037$ МПа) відповідає $\sigma_{0зг} = 830$ МПа, а за режимом 2 ($\sigma_{зг} = 1130$ МПа) – $\sigma_{0зг} = 860$ МПа.

З рисунка 3.14 видно, що залежність границі витривалості при гармонічному циклічному навантаженні від статичної міцності на згинання для сплавів ВК характеризується більш значним підвищенням значень із збільшенням $\sigma_{зг}$. Для ВК8 у вихідному стані $\sigma_{зг} = 1480$ МПа, що відповідає $\sigma_{0зг} = 920$ МПа, а після ОІМП $\sigma_{зг} = 1653$ МПа, і $\sigma_{0зг} = 1060$ МПа. Очікуване підвищення $\sigma_{0зг}$ у результаті ОІМП становить 15 %.

На рисунку 3.15 показані загальні тенденції механічної поведінки сплавів ВК при циклічному гармонійному (крива 2) та динамічному навантаженні (крива 1) при згинанні та динамічному навантаженні в умовах стискування (крива 3), встановлені за результатами аналізу даних таблиці 3.8. Слід зазначити, що для сплавів групи ВК залежності співвідношення $\sigma_{0зг}$ та $\sigma_{зг}$ від $\sigma_{зг}$ як при гармонійному, так і при динамічному навантаженні мають явно виражений екстремум, а залежність співвідношення границі

витривалості при динамічному навантаженні в умовах дії напружень стискання за пульсуювальним циклом σ_{0cm} та $\sigma_{зг}$ монотонно та лінійно спадає із зростанням $\sigma_{зг}$.

Більшість розглянутих сплавів належить до крихких і квазікрихких матеріалів зі значною різницею опору руйнуванню при розриванні в умовах розтягування, згинання та стискання. Тому встановлена принципова різниця кривих 1, 2 та 3 може мати важливе значення при оцінюванні конструкційної міцності розглянутих матеріалів в умовах складного напруженого стану, який є характерним для різального інструменту. Вона дозволяє враховувати визначені особливості втомної міцності твердих сплавів при різних видах напруженого стану на стадії попереднього оцінювання ефективності застосованих методів модифікації матеріалу та можливого підвищення роботоздатності різальних інструментів.

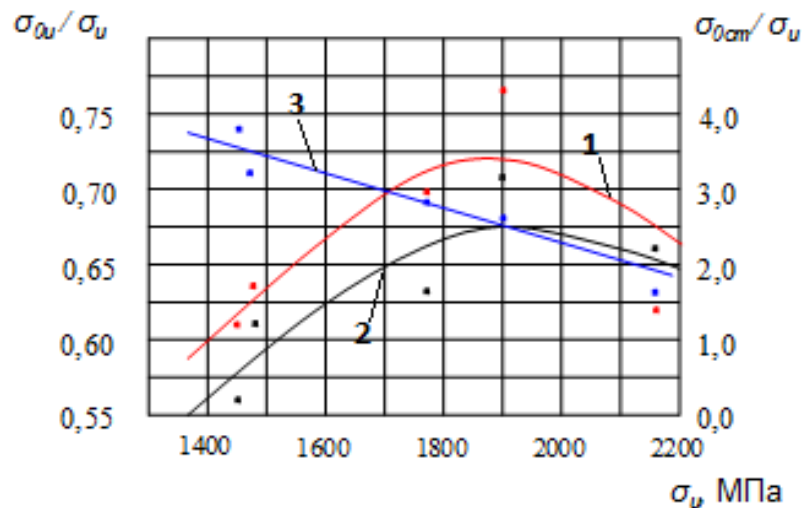


Рисунок 3.15 – Закономірності механічної поведінки сплавів ВК при циклічному гармонійному та динамічному навантаженні при згинанні та стисканні

Слід підкреслити необхідність експериментального уточнення отриманих таким чином оцінок обраних режимів оброблення з використанням результатів спеціальних механічних випробувань

й експериментів з визначення стійкості та міцності модифікованого інструменту у лабораторних і реальних умовах різання, характерних для виробів важкого машинобудування.

Літературні дані щодо довговічності сплавів групи ВК [63] при ударному згинанні дозволили також оцінити довговічність модифікованих сплавів.

Зміна структури сплаву, наприклад ВК8 (криві 2,3) і ВК15 (криві 4,5) спричиняє зміну кута нахилу, що дозволяє стверджувати, що оброблення, пов'язане зі зміною структури призведе до зміни довговічності.

3.7 Спосіб контролю міцності та якості різальної поверхні лезвійного твёрдосплавного інструменту

Запропонована корисна модель належить до способів контролю і може бути використана для контролю міцності та якості лезвійного твёрдосплавного інструменту при виробництві деталей машинобудування на металорізальних верстатах [75]. Стан поверхневих шарів, внутрішньої будови та рівень пошкодженості різальної поверхні лезвійного твёрдосплавного інструменту визначається дефектами типу пор, агломератів і границь зерен, мікротріщин і абразивних пошкоджень. Ці дефекти безпосередньо впливають на міцність і якість найбільш навантаженої різальної частини поверхні та стійкість при зношенні, викришуванні та руйнуванні інструменту у цілому. Ступінь дефектності матеріалу принципово залежить від конструкції, розмірів і технології виготовлення різальних елементів. В умовах різання деградація матеріалу призводить до втрати його стійкості та різання. Тому контроль якості та міцності різальної поверхні при виготовленні й експлуатації інструменту є важливим для забезпечення його працездатності та вдосконалення технології його виробництва.

Відомі способи контролю міцності та якості інструментальних твердих сплавів з використанням механічних випробувань на три-, чотириточковий і консольний згин спеціально виготовлених призматичних й іншої форми макро- та мікрозразків [132; 148; 149; 150]. Вимірювані показники міцності, джерел руйнування (дефектів і мікротріщин) та характер зламування дозволяють оцінювати міцність, якість і працездатність інструментальних твердих сплавів.

Загальним недоліком відомих способів є те, що зразки для випробувань виготовляються з окремих заготовок за спеціальними технологіями, які відрізняються від технології виробництва самого інструменту. Тому стан поверхневих шарів і внутрішня будова цих зразків принципово відрізняються від стану різальної поверхні лезвійного інструменту внаслідок невідповідності технології, режимів зміцнення і рівня пошкодженості зразків та інструменту. На зразках відсутні зносостійкі покриття, не відтворюється належним чином способи поверхневої та об'ємної модифікації, які застосовуються для підвищення стійкості лезвійного інструменту. Тому результати контролю недостатньо характеризують його фактичну якість і міцність і стан пошкодження при експлуатації.

Найбільш близьким технічним рішенням, прийнятим за прототип, є спосіб випробування на консольне згинання твердого сплаву [132], в якому використовується виготовлений зі спеціальних заготовок мікрозразок з консольною балкою, утвореною шляхом виконання відповідного надрізу. За рахунок цього при навантаженні балка вигинається відносно основної частини зразка і руйнування реалізується по найбільш навантаженому кореневому перерізу балки. За показниками міцності та параметрами дефектів, визначеними на поверхні зламу з використанням фрактографічних методів, оцінюють якість твердого сплаву.

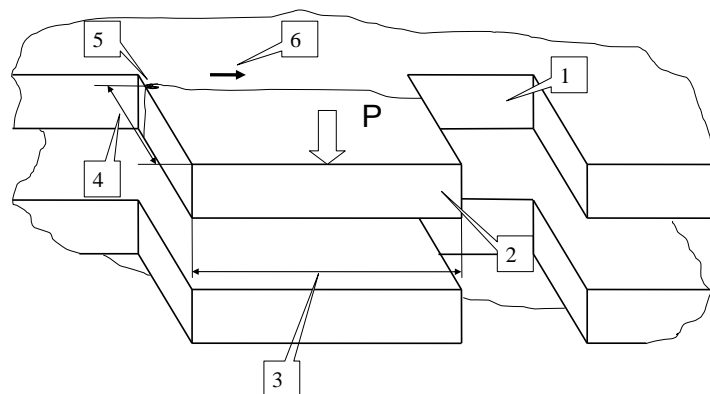
Недоліком найближчого аналогу є неможливість оцінювання реальної конструкційної міцності та якості інструментального матеріалу внаслідок застосування спеціальної технології виготовлення заготовки та зразка, яка

принципово відрізняється від технології виготовлення різальної поверхні лезвійного інструменту. Тому результати можуть бути використані тільки для співставлення якості та міцності твердого сплаву без урахування особливостей технології реального інструменту, впливу сучасних методів його поверхневої та об'ємної модифікації, що застосовуються для підвищення працездатності. Спосіб не може бути використаний для оцінювання характеру та ступеню пошкодження інструменту внаслідок його експлуатації. Іншими недоліками аналогу є можливість отримання одного результату при випробуванні зразка та неможливість оцінювання розподілу параметрів дефектності та міцності по різальній поверхні інструменту.

Завданням запропонованої корисної моделі є спосіб контролю міцності та якості різальної поверхні лезвійного твёрдосплавного інструменту, який дозволяє шляхом випробування реальних елементів інструменту, у тому числі напайних і змінних пластин, враховувати вплив визначальних технологічних, конструкційних, експлуатаційних і масштабного факторів.

Поставлена задача досягається тим, що спосіб контролю передбачає використання в якості об'єкта випробувань реального твёрдосплавного інструменту, пластин, у лезвійній частині яких шляхом виконання повздовжніх і поперечних надрізів утворюється належна одно- або багатоярусна система консольних міні-балочок, які одна за одною навантажуються поперечною силою до руйнування, і отримані за рахунок цього локальні значення міцності та характеру руйнування використовуються для достовірного оцінювання якості та дефектності матеріалу в окремих ділянках леза інструменту. Враховуючи обмежені розміри міні-балочок і характерного для крихких матеріалів випадкового положення джерела руйнування у межах робочої частини балки, для визначення фактичного рівня напружень при руйнуванні довжина кожної балочки (стрілка 4 рис. 3.16) оцінюється як відстань від джерела руйнування (стрілка 5) до краю балки, що показано на рис. 3.16. Для забезпечення точності вимірювань застосовується оптична мікроскопія поверхонь зламу та контуру макротріщини, утвореному при її просуванні від джерела руйнування по напрямку, вказаному стрілкою 6.

Позитивний ефект полягає у тому, що за рахунок випробування балочок, розташованих у відповідних місцях контролю на лезвійній частині інструменту, спосіб дозволяє локально контролювати механічний стан, ступінь дефектності та зміцнення інструменту методами поверхневої та об'ємної модифікації у разі використання в якості об'єкта випробувань твердосплавного інструменту, пластин на різних стадіях їх експлуатації та інструменту модифікованого відповідними технологіями. За даними випробувань визначається розподіл показників міцності та дефектності по різних ділянках робочої частини лезвійного інструменту, параметри однорідності максимальне і мінімальне значення, які дозволяють оптимізувати конструкцію, технологію виготовлення та зміцнення робочої частини інструменту, а також оцінити ефективність застосованих технологій поверхневої та об'ємної модифікації інструменту або ступінь деградації стану лезвійного інструменту під час випробувальних або експлуатаційних робіт. Запропонована схема об'єкта випробувань з міні-балочками та способу їх випробування на консольний згин показана на рис.3.16.



- 1 – прорізи, 2 – консольна балочка під час випробування силою P , 3 – ширина балки, 4 – довжина балки, 5 – джерело руйнування крайова мікротріщина,
6 – напрямок просування макротріщини при руйнуванні балки

Рисунок 3.16 – Фрагмент робочої частини лезвійного інструменту з двома ярусами консольних балочок

Новизна запропонованої корисної моделі полягає в тому, що запропонований спосіб за рахунок випробування кількох консольних балочок у різних ділянках лезвійної частини інструменту, точного вимірювання довжини, ширини та товщини виламаного уламку балочки дозволяє достовірно контролювати механічний стан на окремих ділянках робочих передніх і задніх поверхонь й інших частин лезвійного інструменту з урахуванням впливу визначальних конструкційних, технологічних й експлуатаційних факторів.

Спосіб передбачає застосування об'єкта випробувань – лезвійного інструменту з міні-балочками та спеціальної методики випробувань, що містить поступове випробування окремих балочок до руйнування, визначення параметрів руйнування – джерела руйнування та його розташування відносно краю балки, довжини, ширини та товщини балки за результатами мікрофрактографічного аналізу з використанням оптичного мікроскопу, розрахунку рівня локальних руйнівних напружень і встановлення розподілу значень міцності та дефектності по різних ділянках робочої частини інструменту.

У напайній пластині твердого сплава ВК3 25 x 10 x 6 мм з використанням електроерозійного різання утворили триярусну систему міні-балочок, як показано на рисунку 3.17.

Для визначення розподілу міцності по ділянках верхньої різальної поверхні пластини верхній ряд консольних балочок завширшки 3–4 мм з товщиною 1–1,17 мм та довжиною 1,32–1.62 мм було випробувано за схемою, вказаною на рис. 3.16. Загальний вид руйнування міні-балочок, зафіксований при випробуваннях, як показано на рисунку 3.18. Розміри показані з масштабним коефіцієнтом $\times 0,3611$.

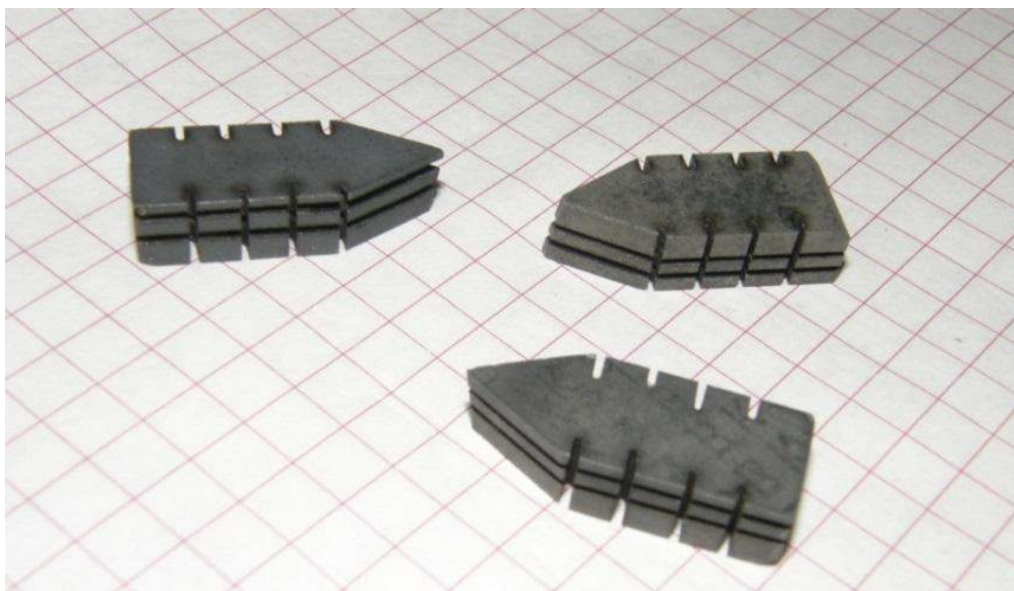


Рисунок 3.17 – Триярусна система міні-балочок у пластини ВКЗ з використанням електроерозійного різання

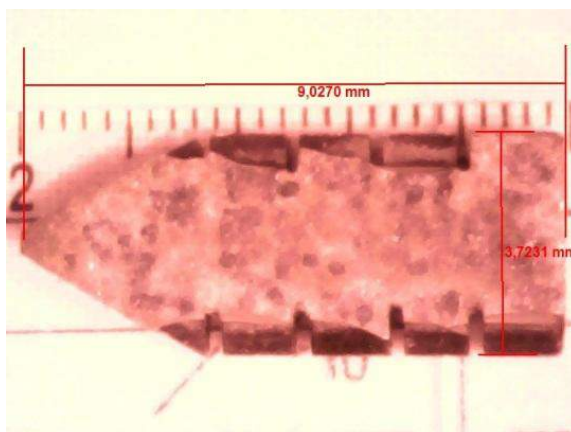


Рисунок 3.18 – Загальний вид руйнування консольних міні-балочок на верхній різальній поверхні твердосплавної пластини ВКЗ

Розрахунок значень локальної міцності на згинання твердого сплаву у цій конструкції пластин виконували за рівнянням:

$$\sigma_{32} = 6 Pl / Bh^2 \quad (3.18)$$

де P – максимальна сила при руйнуванні балочки, Н;

l – довжина балочки, мм, визначена за схемою на рис. 3.18;

B, h – ширина і висота перерізу, мм.

Механічні випробування показали, що фактична міцність окремих ділянок різальної частини пластини не є стабільною і коливається у межах 677–1005 МПа, залежно від ступеню локальної технологічної дефектності поверхні. Це значно відрізняється від рівня міцності 1176 МПа (ГОСТ 3882-74), отриманого для шліфованих призматичних зразків сплаву ВК3 за ГОСТ 20019-74 [150].

Міцність балочок, розташованих на нижній частині пластин виявилася у середньому вище на 15 % у порівнянні з результатами для верхньої поверхні.

Таким чином, запропонований спосіб контролю має підвищену достовірність оцінювання конструкційної міцності твердосплавних інструментальних матеріалів для різального інструменту у порівнянні з відомими аналогами та стандартними зразками і дозволяє оцінювати вплив конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів на механічний стан різних ділянок робочої частини інструменту.

3.8 Дослідження абразивної зносостійкості твердих сплавів

3.8.1 Методика досліджень абразивної зносостійкості твердих сплавів

Суть методу вимірювання опору абразивного зношування полягає у визначенні втрати маси зразків, які зміцнені ОІМП, і вхідних зразків, що піддаються стиранню об абразивне коло, що обертається.

Щоб з'ясувати основні закономірності абразивного зношування різального інструменту, необхідно схематизувати умови тертя на зразку, форма і розміри якого мають бути наближені до форми і, можливо, розмірам різальної частини інструменту.

Наблизити до умов різання необхідно також і швидкість обертання абразивного круга, зусилля навантаження. При цьому необхідно забезпечити якомога більш високу стабільність умов тертя, постійне оновлення абразивних зерен, щоб виключити ймовірність засолювання кола, з огляду на високу твердість зразків. Для віднесення утворених при терті абразивних зерен необхідно, щоб був передбачений постійне поливання мастильно-охолоджувальною рідиною. Зважування зразків здійснювалося на аналітичних вагах з точністю до 0,1 мг.

Для проведення випробувань застосовувалися зразки тієї ж форми, що і при випробуваннях на консольне згинання (рис. 3.1), а також багатогранні твердосплавні пластинки.

Сила тиску зразка на абразивний круг підтримувалася на рівні 40Н. Тривалість випробувань одного зразка (кількість обертів круга) підбиралася таким чином, щоб тривалість абразивного впливу на зразок перебувала у межах 10–12 хвилин. Останній параметр підбирається емпірично, для чого дослідні зразки піддавалися стиранню з різною кількістю обертів. При цьому було встановлено, що для сплавів ВК6ОМ і ВК8 після 600-го обертання настає граничний знос зразка, що стирається, а до цього моменту втрата маси зростає лінійно залежно від часу випробувань.

Для сплавів Т5К10 і Т15К6 вимір зношування проводили після 100 обертів. Відносне зношування визначалося зі співвідношення [55]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta M_0}{M}, \quad (3.19)$$

де ΔM_0 – масове зношення зразка після випробувань;

M – маса зразка до випробувань.

Випробування проводилися чергуванням вихідних і зміцнених зразків. Після кожного опиту здійснювалося зачищення круга алмазним наконечником.

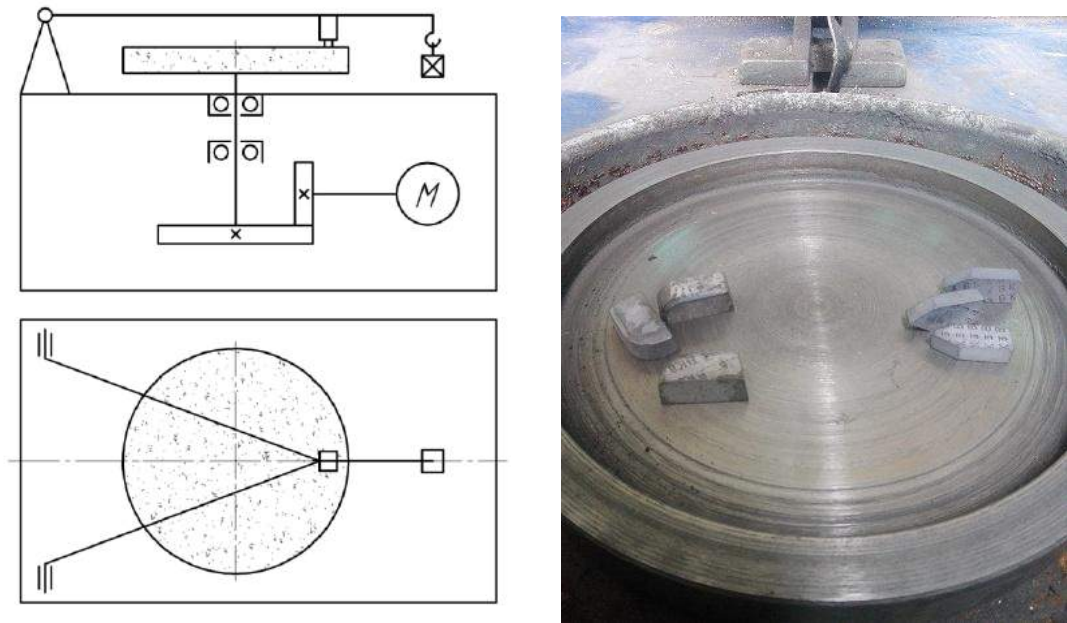


Рисунок 3.19 – Схема пристосування для випробувань зразків на абразивне зношування

Точність результатів випробувань залежить від обсягу вибірки. Скорочення обсягу вибірки дає зменшення обсягу випробувань, проте призводить до зниження точності оцінювання статистичних даних. Це виражається у збільшенні дисперсії оцінювання вихідного параметра. Існує нижня межа для дисперсії незміщеної оцінки, нижче якої дисперсія не може бути отримана при збільшенні обсягу вибірки.

Величина зношування зразків під час випробування підпорядковується нормальному закону розподілу з невідомими значеннями середнього зносу M і дисперсії σ_M^2 . Можна задати граничну абсолютну помилку експерименту ε_{np} і довірчу ймовірність Q . Гранична помилка пов'язана з дисперсією співвідношенням [107]:

$$\varepsilon_{np} = \frac{t_{\alpha} \cdot \sigma_M}{\sqrt{n}}, \quad (3.20)$$

де t_{α} – критерій Стюдента, взятий при довірчому значенні $\alpha = Q$ і кількості ступенів свободи $f = n - 1$.

Вирішуючи це рівняння щодо n , отримаємо:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot \sigma_M^2}{\varepsilon_{np}^2}. \quad (3.21)$$

Однак σ_M у нашому випадку невідомо і може бути визначено тільки на основі аналізу результатів випробувань. Припустимо, що гранична помилка пов'язана із середнім значенням зношування лінійно:

$$\varepsilon_{np} = \delta_M - \bar{M}, \quad (3.22)$$

де δ_M – відносна довірча помилка оцінювання зношування.

Висловлюючи ε_{np} через відносну довірчу помилку, а дисперсію через коефіцієнт варіації зношування:

$$K_M = \frac{\sigma_M}{M}; \quad (3.23)$$

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot K_M^2}{\delta_M^2}. \quad (3.24)$$

Виходячи з того, що критерій Стюдента залежить від кількості випробувань за формулою (3.24), попередньо проводиться мінімальна кількість випробувань ($n = 3-5$), що необхідне для можливого оцінювання коефіцієнта варіації K_M і відносної помилки δ_M .

Після попередніх випробувань отримаємо такі дані:

$$t_{\alpha} = 2,13; \quad K_M = 0,20; \quad \delta_M = 0,1;$$

$$n = \frac{2,13^2 \cdot 0,20^2}{0,1^2} = 18.$$

Таким чином, приймаємо кількість зразків для випробувань $n = 18$.

Результати випробувань твердосплавних зразків на абразивне зношування наведені у таблицях 3.9–3.10, а також на рисунках 3.20–3.23.

Таблиця 3.9 – Результати випробувань зразків однокарбідних твердих сплавів на абразивне зношування

Марка твердого сплаву	Наявність зміцнення	Режими зміцнення	Середня величина зношування $\Delta\bar{M}$, мг	Середнє квадратичний розподіл δ_M	Коефіцієнт варіації зношування K_M	Довірчий інтервал $\pm \delta_M$	Коефіцієнт зміни зношування $\frac{\Delta\bar{M}_{исх}}{\Delta\bar{M}_{упр}}$
BK8	без зміцнення		0,01681	0,00511	0,3	0,0027	1
	зміцнення ОІМП	B1	0,01514	0,00538	0,36	0,0031	1,11
		B2	0,01304	0,0028	0,21	0,0016	1,29
		B3	0,01255	0,00763	0,36	0,0073	0,86
BK60M	без зміцнення		0,0255	0,0054	0,31	0,0031	1
	зміцнення ОІМП	B2	0,0175	0,0044	0,25	0,0023	1,46

Таблиця 3.10 – Результати випробувань зразків двокарбідних твердих сплавів на абразивне зношування

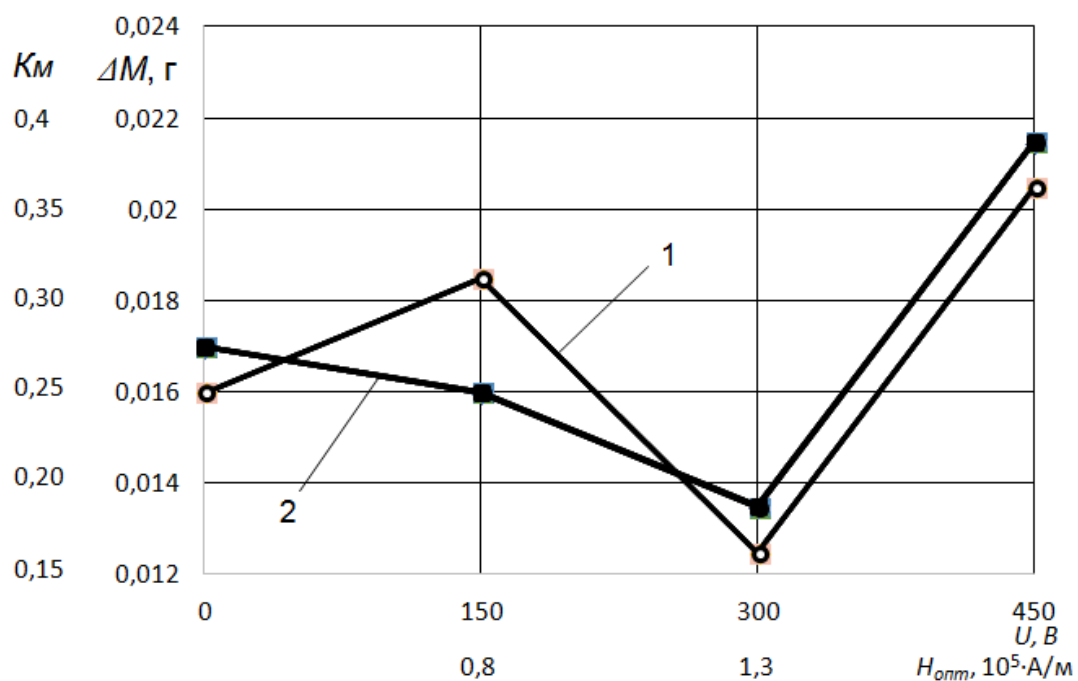
Марка твердого сплаву	Наявність зміцнення	Характерис- тика зміцнення	Середня величина зношування $\Delta\bar{M}$,мг	Середній квадратичний розподіл δ_M	Коефіцієнт варіації зношування K_M	Довірчий інтервал $\pm\delta_M$	Коефіцієнт зміни зношування $\frac{\Delta\bar{M}_{исх}}{\Delta\bar{M}_{упр}}$
Т5К10	без зміцнення		0,0598	0,00686	0,21	0,0066	1,0
	зміцнення ОІМП	індуктор №2 В1	0,0522	0,0047	0,09	0,0055	1,15
		індуктор №2 В2	0,04258	0,00501	0,12	0,0059	1,40
		індуктор №2 В3	0,0542	0,0059	0,11	0,0058	1,1
		індуктор №1	0,04989	0,005	0,1	0,0084	1,2
Т15К6	без зміцнення		0,0692	0,0088	0,13	0,0093	1,0
	зміцнення ОІМП	індуктор №2 В2	0,04982	0,005	0,1	0,0048	1,39
		індуктор №1	0,04976	0,005	0,1	0,0048	1,39

3.8.2 Вплив складу твердого сплаву, який зміцнений ОІМП, на міцність і зносостійкість

З аналізу таблиць 3.1, 3.2 і рисунків 3.2, 3.4 (довірчий інтервал: $\pm 0,0018$ г) можна зробити висновок про те, що склад твердого сплаву значно впливає на міцність твердого сплаву, який зміцнений ОІМП [152]. Наприклад, зміцнені однокарбідні тверді сплави і сплав Т15К6, який призначений для чистового оброблення (при високих швидкостях різання), мають дещо гірші показники, ніж двокарбідний твердий сплав Т5К10 за коефіцієнтом варіації міцності K_σ і за показником однорідності матеріалу m . Так, для Т5К10 коефіцієнт варіації міцності в 1,15–1,7 разу нижче, а показник однорідності в 1,2 разу вище, ніж у сплаву Т15К6. У той же час, коефіцієнт варіації міцності і показник однорідності для двокарбідного сплаву Т5К10 і однокарбідних ВК6 і ВК8 відрізняються незначно.

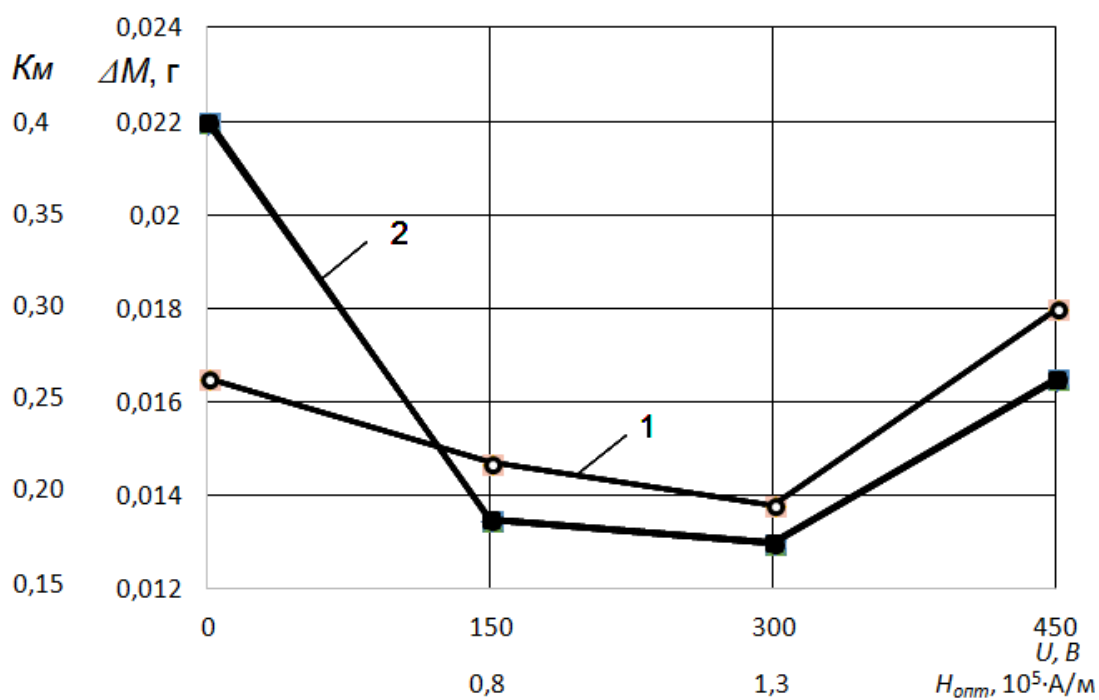
При випробуваннях на абразивне зношування (табл. 3.9–3.10, рис.3.20–3.23) двокарбідні сплави Т5К10 і Т15К6, які мають приблизно однакові результати за коефіцієнтом варіації зношування і коефіцієнтом зміни зношування маси, більш кращі у порівнянні з однокарбідними сплавами ВК6ОМ і ВК8 (за винятком високого коефіцієнта зміни зношування маси у твердого сплаву ВК6ОМ). Так, для сплаву Т15К6 коефіцієнт варіації зношування нижче, ніж у сплавів Т5К10, ВК8 і ВК6ОМ в 1,2; 2,1 і 2,5 разу, відповідно. У той же час коефіцієнт зміни зношування маси для сплаву ВК6ОМ вище, ніж у сплавів ВК8, Т15К6 і Т5К10 в 1,13; 1,05 і 1,04 разу, відповідно.

У той же час однокарбідні сплави, хоча і мають гірші показники відносно стабільності роботи, але перевершують двокарбідні за середнім розміром зношування (рис. 3.20–3.23)]. Так, для сплаву ВК8 середній розмір зношування нижче, ніж у сплавів ВК6, Т5К10 і Т15К6 в 1,3; 3,15 і 4,0 разу, відповідно.



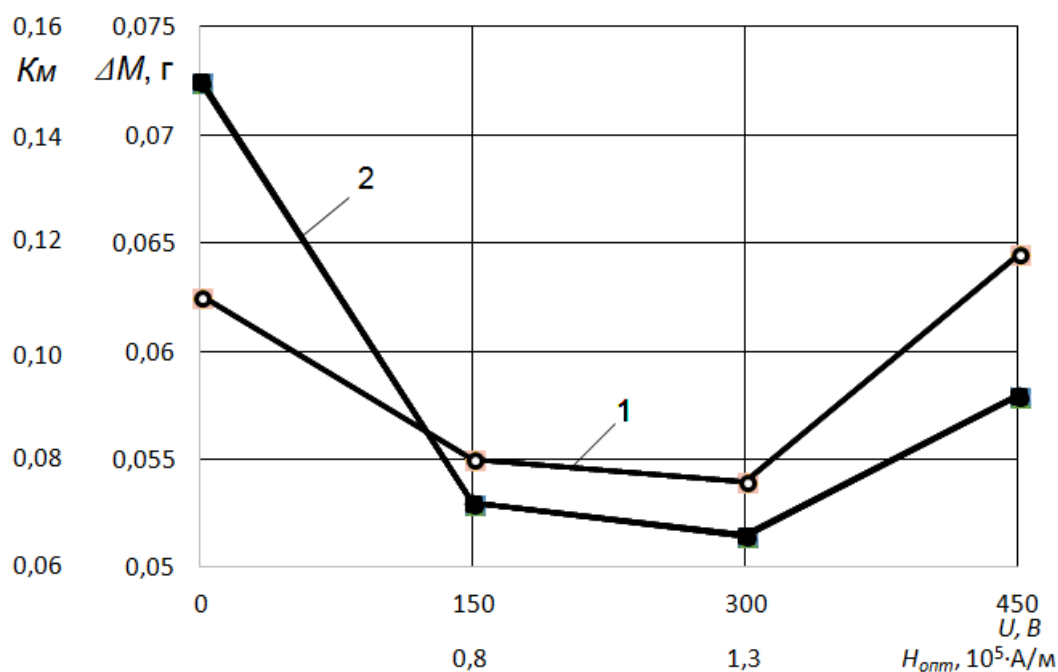
1 – коефіцієнт варіації зношування; 2 – середня величина зношування

Рисунок 3.20 – Вплив ОІМП на абразивне зношування твердого сплаву ВК8



1 – коефіцієнт варіації зношування; 2 – середня величина зношування

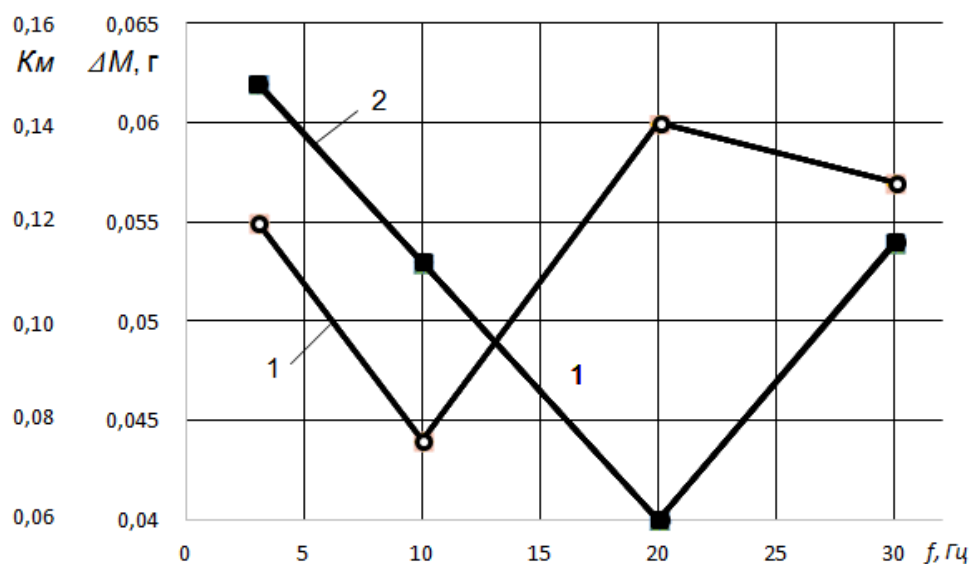
Рисунок 3.21 – Вплив ОІМП на абразивне зношування твердого сплаву ВК6



1 – коефіцієнт варіації зношування; 2 – середня величина зношування

Рисунок 3.22 – Вплив ОІМП на абразивне зношування твердого сплаву

T15K6



1 – коефіцієнт варіації зношування; 2 – середня величина зношування

Рисунок 3.23 – Вплив частоти імпульсів на абразивне зношування

твердосплавних пластин T5K10:

3.8.3 Вплив режиму зміцнення на міцність і зносостійкість твердого сплаву

Випробування на міцність (таблиці 3.1–3.2, рисунки 3.2–3.4) показали, що найвищий ефект досягається при режимі зміцнення В2. Так, для сплаву ВК6 коефіцієнт варіації міцності під час зміцнення відповідно режиму В2 нижче, ніж для режимів В1, В3 і В4 в 1,5; 1,1 і 1,5 разу, відповідно, та в 1,2–1,5 разу нижче, ніж у сплавів, які не зміцнені ОІМП.

Випробування на абразивне зношування (таблиці 3.3–3.4, рисунки 3.20–3.23) показали, що найвищий ефект досягається за умови оптимального режиму зміцнення В2. У той час як при режимі В1 цей ефект нижче в 1,11 разу в порівнянні з режимом В2, а при режимі В3 спостерігається навіть негативний ефект.

3.8.4 Вплив частоти імпульсів на міцність і зносостійкість твердого сплаву

Як видно з таблиць 3.1; 3.4 і рисунка 3.23, на велике значення ефективності зміцнення впливає частота імпульсів f . Так, при $f = 15$ Гц, ефективність зміцнення значно вище (в 1,4 разу), ніж при $f = 5$ Гц та $f = 25$ Гц.

Як відомо, твердість твердих сплавів в умовах абразивного зношування є основним критерієм їх зносостійкості [22]. Нами була виміряна твердість вихідних і зміцнених полірованих зразків на твердомірі ПМТ-3. На рисунку 3.24 показана залежність коефіцієнта зміни твердості від частоти імпульсів. Коефіцієнт зміни твердості визначався за формулою:

$$K_{HV} = \frac{HV_{ОІМП}}{HV_{ВИХ}}, \quad (3.25)$$

де $HV_{ВИХ}$ і $HV_{ОІМП}$ – відповідно, твердість по Віккерсу, які не зміцнені, та зразків, які зміцнені ОІМП.

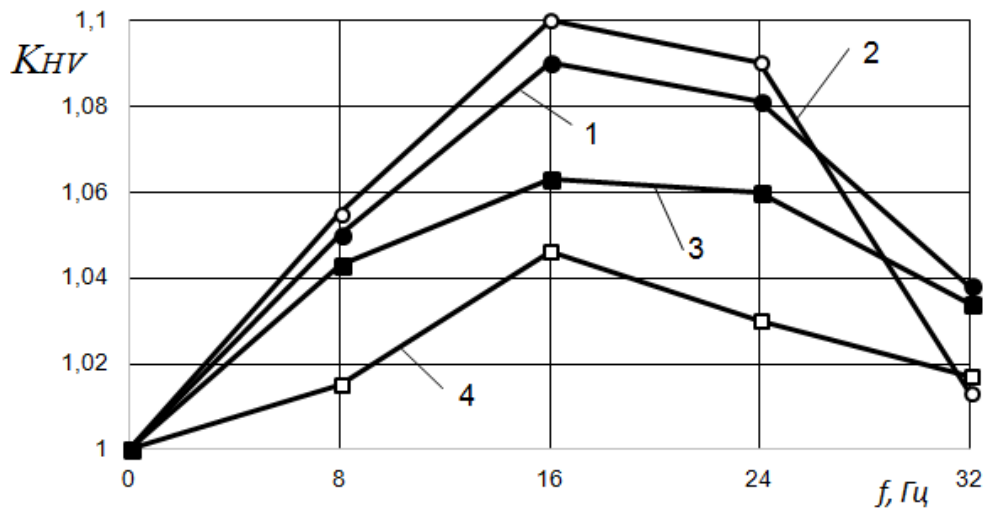


Рисунок 3.24 – Залежність коефіцієнта зміни твердості від частоти імпульсів:
1 – BK6; 2 – BK8; 3 – T5K10; 4 – T15K6

Як видно з рисунка 3.24 (довірчий інтервал: $\Delta K_{HV} = \pm 0,0224$) спостерігається підвищення твердості твердих сплавів, які зміцнені ОІМП. При цьому максимум збільшення твердості (5–10 %) відповідає частоті імпульсів 10 Гц.

Також слід зазначити, що у ряді робіт [56] при постійній твердості абразивна зносостійкість твердих сплавів зростає з підвищенням міцності. Це пов'язано з тим, що при збільшенні міцності підвищується опір матеріалу руйнуванню під дією абразивних частинок. Таким чином, підвищення зносостійкості твердих сплавів, які зміцнені ОІМП, відбувається за рахунок підвищення твердості та міцності.

Статистичний аналіз результатів випробувань на міцність і зносостійкість твердого сплаву показав, що середня квадратична величина розподілу зношування і коефіцієнт варіації зношування для зміцнених зразків менше, ніж для вихідних зразків у 1,8–2,3 разу.

Це говорить про те, що ОІМП сприяє підвищенню стабільності властивостей інструментального матеріалу, незважаючи на те, що абразивне зношування і крихка міцність пов'язані з хаотичним характером протікання процесу різання.

3.9 Висновки до розділу 3

1. Застосування оброблення імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню міцності твёрдосплавного матеріалу в 1,2 разу і зниженню коефіцієнта варіації міцності у 2 рази.

2. Показано, що методом, який базується на результатах статичних випробувань зразків з твёрдих сплавів і результатах кореляційного та регресійного аналізу відомих експериментальних результатів при циклічному навантаженні, можна отримати прогностичні значення границі витривалості.

3. Отримано, що модифікація твёрдого сплаву T5K10 з обробленням імпульсним магнітним полем залежно від застосованих режимів призводить до зростання границі міцності на згинання при статичному навантаженні на 16–27 %, що дозволяє прогнозувати зростання границі витривалості

4. Розроблено методичні засади оцінювання характеристик конструкційної міцності твёрдосплавних різальних пластин з використанням вирізаних з них спеціальних зразків, їх випробувань в умовах поперечного і консольного згинання, фрактографічного аналізу поверхонь зламів для визначення джерел руйнування і особливостей докритичного розвитку мікротріщин. Комплексний технічний підхід дозволяє враховувати вплив на механічну поведінку різальних пластин визначальних конструкційних, технологічних факторів та методів поверхневої й об'ємної модифікації.

5. За результатами оцінювання конструкційної міцності напайних пластин зі сплавів BK3 і BK8 показано, що їх реальні характеристики міцності значно відрізняються від результатів випробувань стандартних зразків і дозволяють підвищити достовірність контролю якості різального інструменту та вдосконалювати технологію його оброблення та модифікації за параметрами міцності.

6. Показано значний вплив на міцність і руйнування досліджених твёрдосплавних пластин дефектів структури поверхневого шару.

Рекомендовано враховувати результати оцінювання параметрів поверхневого дефектного шару при заточуванні інструменту з напаяними різальними пластинами

7. Встановлено, що модифікація твердих сплавів ВК3 і ВК8 з обробленням імпульсним магнітним полем призводить до підвищення їх однорідності, зменшення товщини тріщинуватого шару, стабілізації механічних характеристик, зростання границі міцності на згинання.

8. Для твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, характерне підвищення абразивної зносостійкості в 1,3–1,4 разу і зниження її коефіцієнта варіації в 1,8–2,3 разу.

9. Використання методів моделювання дозволило встановити вплив на зносостійкість твердого сплаву режимів зміцнення, частоти імпульсів, методу зміцнення.

10. Для твердих сплавів, які зміцнені ОІМП, відбувається підвищення твердості в 1,05–1,1 разу.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИРОБНИЧИХ ВИПРОБУВАНЬ ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ПІСЛЯ ОІМП ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

4.1 Методика виробничих випробувань і оброблення результатів

Важливим засобом підвищення ефективності випробувань і розширення обсягу одержуваної інформації є проведення випробувань різальних інструментів у виробничих умовах на конкретній технологічній операції. Виробничі випробування мають такі переваги: не вимагають додаткових матеріальних витрат на обладнання, матеріал, який оброблюється, інструмент; технологічні критерії затуплення інструменту дозволяють більш повно і правильно оцінювати його якість; отримувати залежності в реальних умовах операції шляхом відповідного математичного оброблення результатів випробувань.

Відомо, що саме у виробничих умовах проявляється поєднання багатьох взаємопов'язаних явищ, що спостерігаються при різанні. Про це свідчать роботи [32; 102]. Для цього проводилися спостереження за роботою інструментів в реальних умовах експлуатації.

В основі теорії та практики виробничого експерименту є такі основні принципи: принцип виробництва інформації поряд з виробництвом товарної продукції. Вважалося, що виробництво має на меті випуск товарної продукції. Залежно від її якості та кількості слід робити висновок про процес. Тепер стверджується, що треба ще виробити інформацію, кількість і якість якої враховувалося б аналізуванні процесу як рівноправні показники поряд з показникам продуктивності, рентабельності й т. п. У таблиці 4.1 відображено об'єкти та умови проведення випробувань інструментів, які пройшли оброблення імпульсним магнітним полем. Умови випробувань приймалися такими, які фактично існували на зазначеній операції.

Таблиця 4.1 – Умови проведення виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені оброблення імпульсним магнітним полем

Номер партії інструменту	Підприємство	Вид різального інструменту	Марка твердого сплаву	Обладнання	Матеріал, який оброблюється, міцність	Стан поверхні, яка оброблюється	Режими різання		
							Глибина t , мм	Подача S , мм /об	Швидкість V , м /хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	КЗВВ	Токарний прохідний різець ($\varphi = 60^\circ$)	ВК8	Верстат КЖ16274Ф3	СЧ-20 НВ 170–241	Ливарна кірка	5	3	78,7
2	КЗВВ	Різець з тригранною пластиною	ТТ10К8	Верстат КЖ16274Ф3	Сталь 45 НВ 190–240	Попередньо оброблена поверхня	1	0,25	70
3		Різець з чотиригранною пластиною	Т15К6				1,4	0,05	68
4		Різець з п'ятигранною пластиною	Т5К10				2	0,1	100

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	НКМЗ	Токарний прохідний різець ($\varphi = 60^\circ$)	T5K10	Верстат 1A665	Сталь 9Х2М НВ 201–321	Ливарна кірка	4	1,6	36
6		Різець з чотиригранною пластиною ($\varphi = 60^\circ$)	T15K6	Верстат 164	Сталь 38ХНЗМА НВ 340–360	Додатково оброблена поверхня	0,4	0,8	125
7	НКМЗ	Токарний прохідний різець з напаяною пластиною ($\varphi = 75^\circ$)	T5K10	Верстат 1A670Ф3	Сталь 35ХНЛ НВ 240–260	Ливарна кірка	2,0	1,0	80
8	НКМЗ	Токарний прохідний різець з напаяною пластиною ($\varphi = 60^\circ$)	BK6	Верстат 1A670Ф3	сірий спеціальний чавун К-1 НВ 240–260	Ливарна кірка	1,0	0,15	42

Обрані для випробувань операції відповідали таким умовам:

– для випробувань обиралися такі операції, під час проведення яких спостерігалися в основному такі види відмов різальних інструментів: зношування, викрашування, поламки, тобто відмови, які характерні для попередніх операцій;

– обрані для випробувань операції були масові, стабільні й безперервні;

– заготовками для випробувань була звичайна продукція цеха, яку обробляли на цій операції;

– обрані операції відповідали нормальним умовам експлуатації інструмента (стан системи ВПД, МОР, якість заготовок і стабільність властивостей матеріалу тощо), характерним для обраного рівня виробництва;

– операції були зручні з точки зору спостереження за інструментом під час експлуатації, щоб правильно і своєчасно зафіксувати причину відмови.

Відбір інструментів для випробувань проводився на складах готової продукції інструментальних заводів або інструментальних цехів, яка прийнята відповідним ВТК. Інструмент, відібраний для випробувань, клеймився на кожній партії порядковими номерами, ретельно промивався та піддавався вимірюванню за всіма параметрами, які можуть вплинути на стійкість. Відхилення окремих параметрів від ГОСТ, нормалей і технічних умов, що виявляється за результатами вимірювання, не було підставою для виключення його з випробувань, тому що метою випробувань було також встановлення розсіювання стійкості інструментів, характерного для умов експлуатації, що реально існують. Відбракуванню піддавався тільки явно негідний інструмент (відколи на різальних поверхнях, які з'явилися у результаті транспортування, конструктивні та геометричні розміри, які не зможуть забезпечити необхідну кількість оброблення й ін.).

При визначенні обсягу вибірки використовувалися рекомендації, надані в роботі [39], згідно яким оптимальна кількість випробувань коливається у межах 13–16. Збільшення кількості випробувань сприяє підвищенню достовірності прийняття гіпотези. Тому в тих випадках, коли

збільшення обсягу випробувань не сприяло істотному збільшенню витрат на випробування, обсяг вибірок збільшувався. У деяких випадках кількість випробувань зменшилося до 10, що було також пов'язане з витратами на випробування, коли ці випробування охоплювали великий проміжок часу. Однак зазначене зменшення числа кількості випробувань дає незначне збільшення відхилень від середньої стійкості (20 %).

Випробування проводилися шляхом спостереження за роботою інструменту до моменту вимушеного зняття його, згідно з критерієм, який прийнятий на цій операції, або випадкових відмов інструменту.

Результати випробувань фіксувалися у спеціальному протоколі, в якому відзначалися такі дані:

- умови випробувань (місце, операція, оброблюваний матеріал, режим різання, MOR);
- характеристики випробуваного інструменту (типорозмір, інструментальний матеріал, завод-виготовлювач й інші специфічні характеристики);
- результати випробувань інструменту: стійкість, зношування, причина зняття інструменту.

Було випробувано вісім партій твердосплавних інструментів із загальною кількістю 550 штук. Отримані результати випробувань піддавалися математичному обробленню.

Середня стійкість інструментів визначалася за формулою:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (4.1)$$

де T_i – стійкість інструменту при i -му випробуванні;

n – кількість випробувань.

Коефіцієнт варіації стійкості, який характеризує розсіювання стійкості:

$$K_T = \frac{\sigma}{T}, \quad (4.2)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення.

Якщо використовувати для опису функції розподілу стійкості закон Вейбулла як найбільш універсальний:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}\right)}, \quad (4.3)$$

тоді гамма-відсоткова стійкість буде визначатися з виразу:

$$T_\gamma = \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right)^{\frac{1}{b}} \cdot a, \quad (4.4)$$

де a і b – параметри закону Вейбулла.

Показники безвідмовності роботи інструментів визначалися за результатами випробування за допомогою формул:

– ймовірність безвідмовної роботи, яка означає, що для певних умов експлуатації у межах заданого часу T відмов не виникає;

$$P(T) = \frac{N-m}{N}. \quad (4.5)$$

– щільність розподілу відмов:

$$f(T) = \frac{n_i}{N \cdot \Delta T}. \quad (4.6)$$

– інтенсивність відмов, яка показує ймовірність відмови інструменту в одиницю часу:

$$\lambda (T) = \frac{2 \cdot n_i}{[(n_j + (n_{j+i} + 1))] \cdot \Delta T}, \quad (4.7)$$

де N – обсяг вибірки;

m – кількість інструментів, які відмовили за час T в усіх розглянутих періодах стійкості;

n_1 – кількість інструментів, які відмовили в інтервалі часу від $T - \frac{\Delta T}{2}$ до $T + \frac{\Delta T}{2}$;

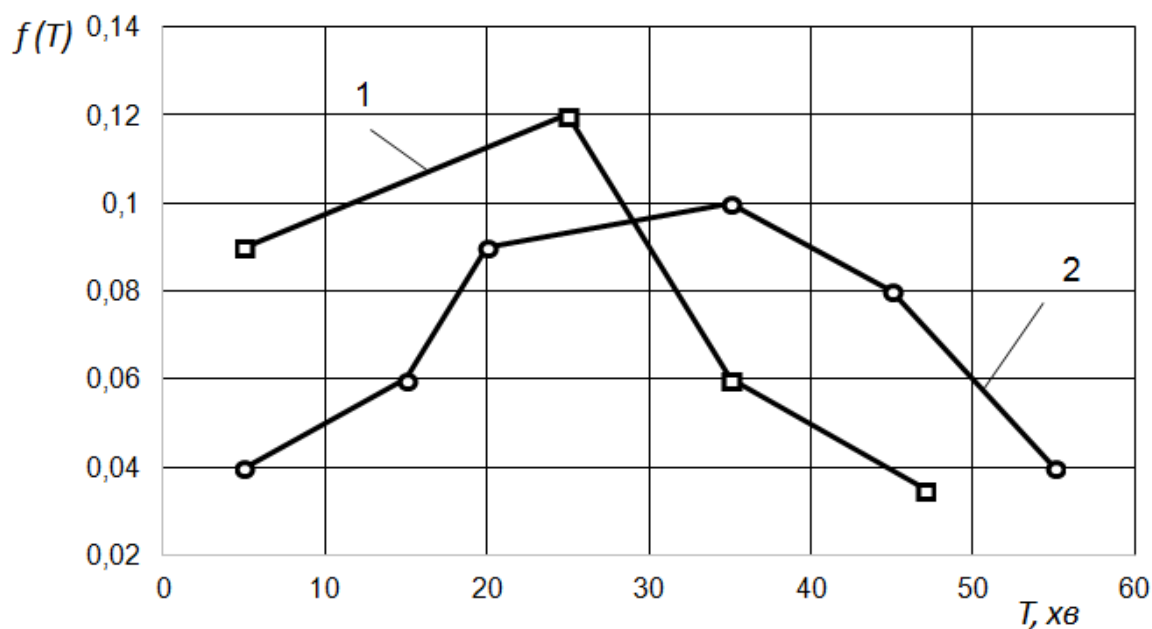
n_j, n_{j+1} – кількість інструментів, працездатних відповідно, на початку та наприкінці j -го інтервалу часу ΔT .

Для оцінювання статистичної значущості отриманих результатів розрахунків застосовувалися статистичні критерії: Колмогорова (для оцінювання параметрів закону розподілу), t -критерій Стюдента, Вілкоксона (для оцінювання середнього значення стійкості) [110;151].

4.2 Вплив ОІМП на показники експлуатаційної стійкості інструменту

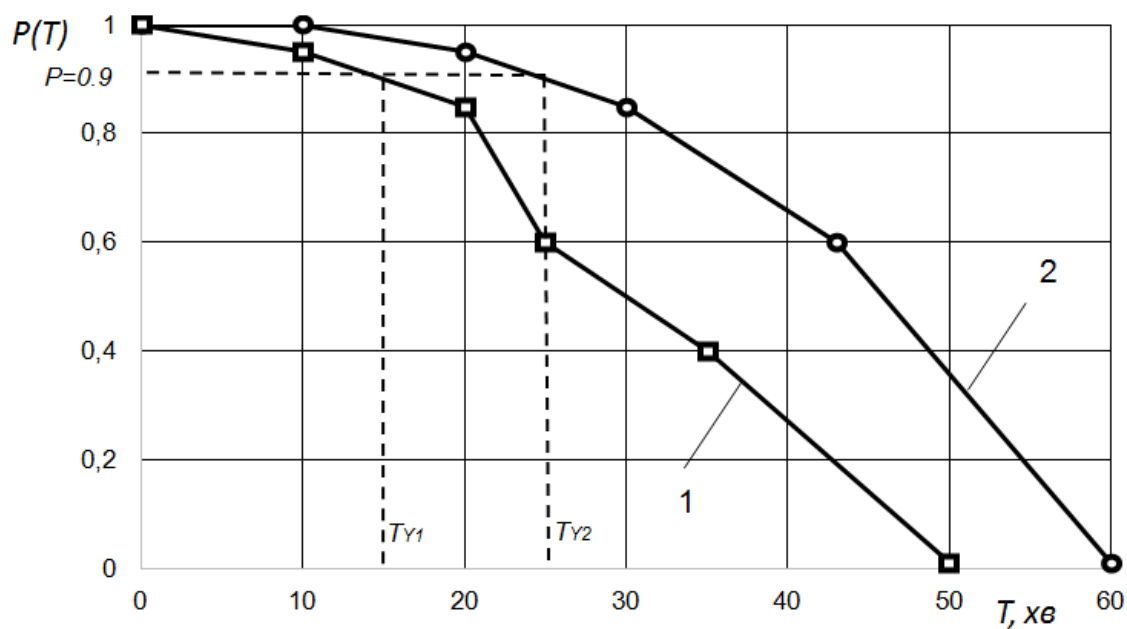
У додатках А1–А4 і на рисунках 4.1–4.6 представлені результати виробничих випробувань різних типів твердосплавних різців. Усі дані говорять про зростання зносостійкості інструментів, які зміцнені ОІМП у 1,2–2 рази.

У всіх випадках (додатки А1–А4, рис. 4.1–4.6) спостерігається також зниження коефіцієнта варіації стійкості (формула 4.2) у 1,3–3,1 разу. Більш суттєва ефективність має місце у підвищенні гамма-відсоткової стійкості (формула 4.4). Так, при ймовірності 0,9 це підвищення відбувається в 1,7–2,8 разу, що говорить про доцільність використання різальних інструментів, які зміцнені ОІМП, на важких верстатах.



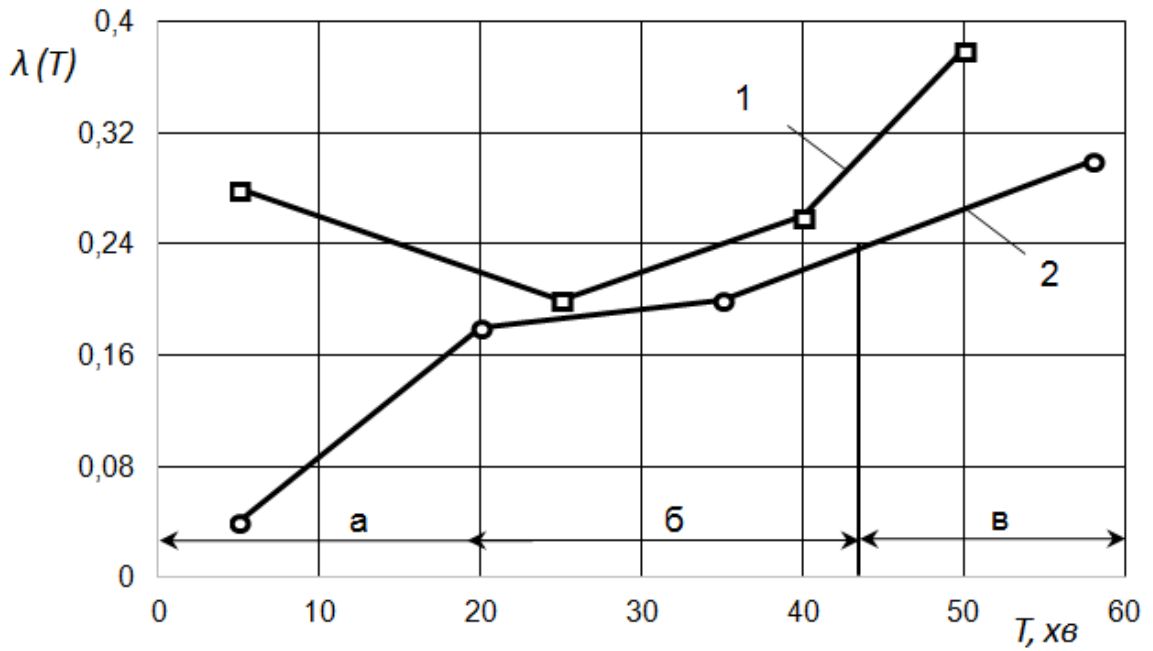
1 – інструменти без зміцнення, 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 4.1 – Щільність розподілу відмов (партия 7)



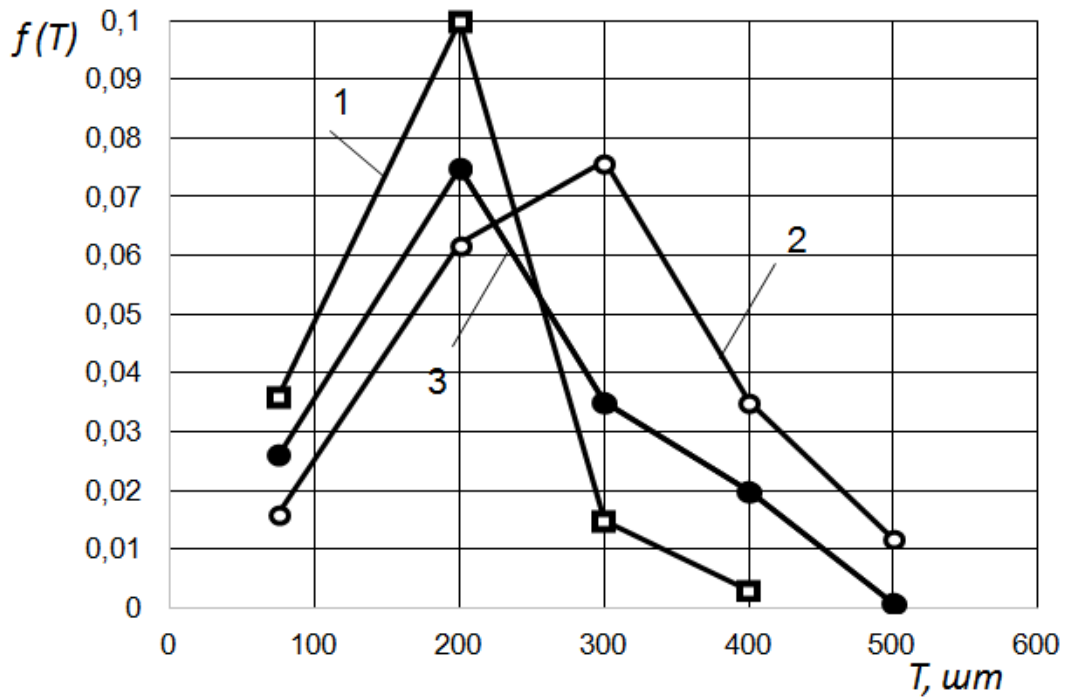
1 – інструменти без зміцнення, 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 4.2 – Імовірність безвідмовної роботи (партия 7)



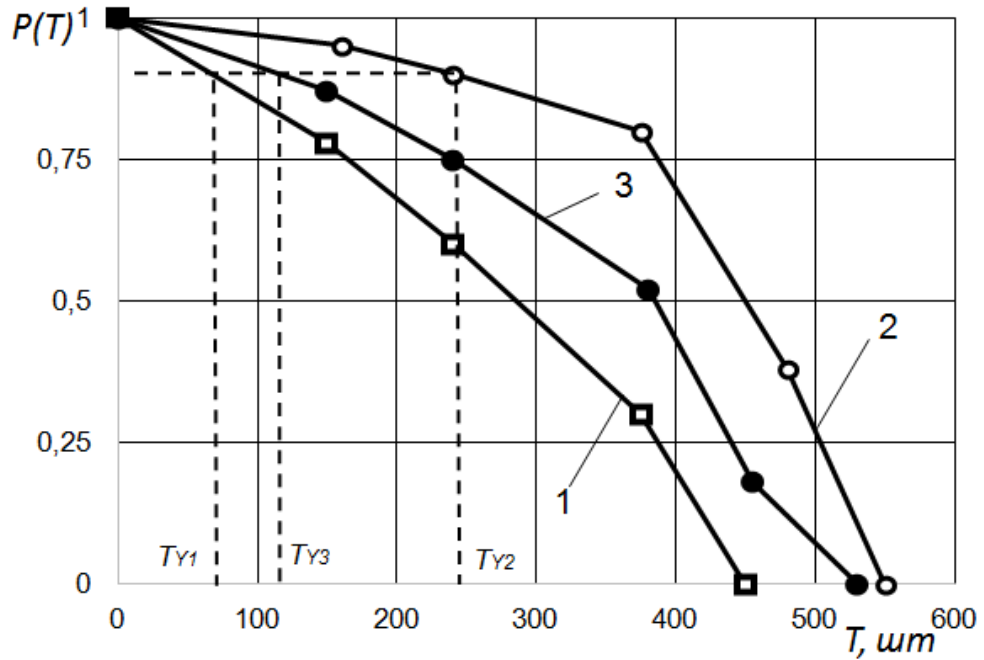
1 – інструменти без зміцнення, 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 4.3 – Інтенсивність відмов (партія 7)



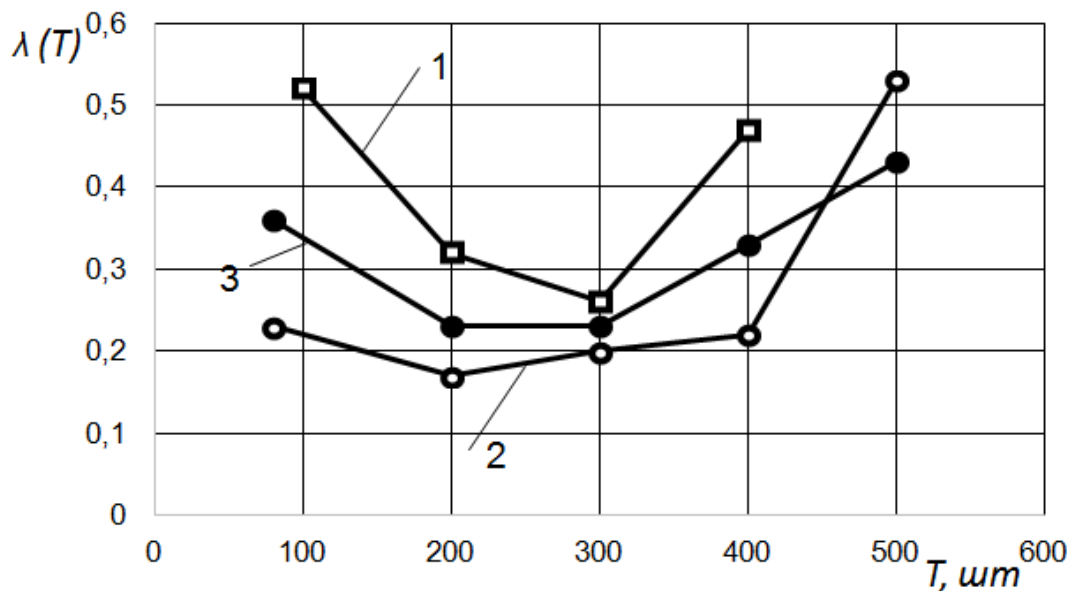
1 – інструменти без зміцнення, 2 – зміцнені інструменти після першого періоду стійкості; 3 – зміцнені інструменти після п'ятого періоду стійкості

Рисунок 4.4 – Щільність розподілу відмов (партія 4)



1 – інструменти без зміцнення, 2 – зміцнені інструменти після першого періоду стійкості; 3 – зміцнені інструменти після п'ятого періоду стійкості

Рисунок 4.5 – Вірогідність безвідмовної роботи (партія 4)



1 – інструменти без зміцнення, 2 – зміцнені інструменти після першого періоду стійкості; 3 – зміцнені інструменти після п'ятого періоду стійкості

Рисунок 4.6 – Інтенсивність відмов (партія 4)

Аналіз графіків ймовірності безвідмовної роботи, щільності розподілу відмов й інтенсивності відмов (рис. 4.1–4.6) показує:

- збільшення зносостійкості інструментів, які зміцнені ОІМП, відповідної найбільшій щільності розподілу стійкості $f(T)$;
- збільшення ймовірності безвідмовної роботи $P(T)$ інструментів, які зміцнені ОІМП, при заданій зносостійкості (довірчий інтервал: $\Delta P(T) = \pm 0,124$)
- відсутність зони прироботки інструментів, які зміцнені ОІМП, на графіках інтенсивності відмов $\lambda(T)$.

Найбільш суттєве підвищення зносостійкості інструментів має місце для сьомої партії (рис. 4.4–4.6 і табл. 4.5). Ця партія характерна наявністю жорстких умов роботи: наявність ливарної кірки, велика глибина різання, порівняно висока подача, значна твердість матеріалу і низька швидкість різання. Все це викликає до 68 % непереборних відмов інструментів, що не зміцнені.

Найбільш цікава картина спостерігається на графіку зміни інтенсивності відмов $\lambda(T)$ (рис. 4.3). Для інструментів, що не зміцнені, на початковій стадії експлуатації характерний період підроботки (зона а), коли матиме місце велика інтенсивність відмов. Для зміцнених інструментів період прироботки відсутній. На початку експлуатації інтенсивність відмов менше в 2,4 разу, і вона є постійною (зона б) до початку зони катастрофічного зношування (зона в) (на графіку до $T = 400$ штук).

Слід також зазначити, що результати випробувань інструментів шостої партії не показали істотного підвищення зносостійкості. Зносостійкість зміцнених інструментів збільшилася всього в 1,08 разу. Не змінювався і коефіцієнт варіації стійкості. Такі результати можна пояснити порівняно легкими умовами роботи (невеликі глибини різання і подача) і порівняно високою швидкістю різання. Крім того, процес різання відбувається на попередньо обробленій поверхні. Мабуть, на цій операції частка абразивного і крихкого зношування невеликі. Тому ефективність ОІМП на цій операції

проглядається слабо. Таким чином, застосування ОІМП сприяє підвищенню стійкості твердосплавних інструментів і зниженню її розсіювання при попередньому обробленні.

4.3 Вплив геометричних параметрів різця на ефективність ОІМП

Для дослідження впливу геометричних параметрів різців на ефективність зміцнення оцінювання працездатності проводилося за зношуванням задньої поверхні інструменту. Для аналізу були виділені такі параметри: головний задній кут α , допоміжний задній кут α_1 , передній кут γ , головний кут у плані φ , допоміжний кут у плані φ_1 , кут нахилу головної різальної кромки λ .

Використання такої кількості показників ускладнює аналіз працездатності інструментів, тому на першому етапі для попереднього відсіювання факторів був проведений кореляційний аналіз. Оскільки між розглянутими факторами і зношуванням інструментів може бути як лінійний, так і нелінійний зв'язок, то для оцінювання тісноти цього зв'язку використовувалося кореляційне відношення, яке визначалося за формулою [25; 112]:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma^2 - \sigma_y^2}{\sigma^2}},$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2; \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2, \quad (4.8)$$

де \bar{y} – середнє арифметичне значення параметра для партії різців;

\bar{y}_i – середнє значення параметра для групи різців, до якої попали інструменти, які характеризуються однаковими значеннями факторів.

За статистику, що характеризує внесок будь-якого фактора у сумарну дисперсію, була прийнята дисперсія нормованого значення цього показника.

Нормування показників здійснювалося шляхом такого перетворення:

$$x_{\text{нр}} = \frac{x_i - \frac{x_{\text{imax}} + x_{\text{imin}}}{2}}{\frac{x_{\text{imax}} - x_{\text{imin}}}{2}}, \quad (4.9)$$

де x_i – поточне значення фактора у натуральному виразі;

$x_{\text{imax}}, x_{\text{imin}}$ – максимальне і мінімальне значення фактора.

Це перетворення дозволяє звести усі властивості до єдиного масштабу та надає можливість порівнювати їх один з одним.

Дисперсія нормованих значень обчислювалася за формулою:

$$\sigma(x_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{нр}} - \overline{x_{\text{нр}}})^2}{n-1}, \quad (4.10)$$

де $\overline{x_{\text{нр}}}$ – середнє значення.

Результати розрахунків кореляційних відносин і дисперсії нормованих значень факторів наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Кореляційні відносини і дисперсії нормованих значень факторів

Фактори, які впливають на зношування інструментів	Кореляційні відношення між факторами та зношування	Дисперсія нормованих значень
Головний кут в плані φ	0,93	0,8
Головний задній кут α	0,90	0,7
Головний передній кут γ	0,2	0,47
Допоміжний задній кут α_1	0,5	0,34
Кут нахилу головної різальної кромки λ	0,32	0,25
Допоміжний кут в плані φ_1	0,75	0,7

Таким чином, проведені дослідження показали, що у межах діапазону розсіювання факторів, що впливають на зношування інструментів, домінуючими є: головний кут у плані φ , головний задній кут α і допоміжний кут у плані φ_1 . Ці фактори і використовувалися у подальших дослідженнях, у яких треба знайти значення частоти імпульсів, при якій зносостійкість інструменту буде максимальною.

Випробування інструментів проводилися методом торцевого точіння, який описаний в п. 3.1.2.

Значення геометричних параметрів α , φ і φ_1 знаходилися у межах, рекомендованих нормативами для попереднього оброблення. Випробуванням піддавалися пластини зі сплаву Т5К10.

При попередньому обробленні конструкційних сталей значення задніх кутів не має широкого коливання і знаходиться у межах $6\text{--}10^\circ$ [99]. Не мають також широкого коливання й значення допоміжного кута у плані (у межах $15\text{--}30^\circ$). У більш широких межах коливаються значення головного кута у плані (у межах $60\text{--}90^\circ$). Тому випробування проводилися трьох партій інструментів (марка твердого сплаву – Т5К10; матеріал, що обробляється, сталь 45; режими різання $t = 2,0$ мм, $S = 0,1$ мм/об):

- 1 партія: $\varphi = 60^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$;
- 2 партія: $\varphi = 75^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$;
- 3 партія: $\varphi = 90^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$.

Для всіх партій значення частоти імпульсів змінювалося у межах від 3 до 12 Гц. За результатами випробувань, які представлені на рисунку 4.7 (довірчий інтервал: $\Delta v_k = \pm 4,624$ м/хв), видно, що залежність критичної швидкості різання від частоти імпульсів f може бути апроксимовано квадратичною функцією, тобто параболою другого порядку.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2. \quad (4.11)$$

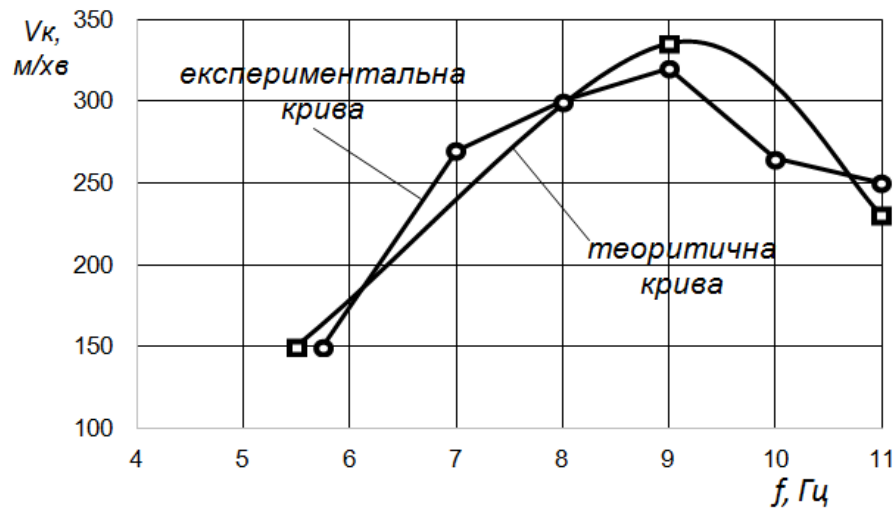


Рис.унок 4.7 – Залежність критичної швидкості різання від частоти імпульсів (партія 1)

Параметри a_0 , a_1 , a_2 визначаються з вимоги найменших квадратів:

$$f = \sum (y - \overline{y_x})^2 = \sum (y - (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2))^2 = \min.$$

Звідки:

$$\frac{\partial f}{\partial a_0} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial a_2} = 0.$$

Це надає після диференціювання систему рівнянь (з урахуванням наявності частот m за факторіальною ознакою):

$$\begin{cases} \sum y \cdot m = n \cdot a_0 + a_1 \cdot \sum x \cdot m + a_2 \cdot \sum x^2 \cdot m \\ x \cdot \sum y \cdot m = a_0 \cdot \sum x \cdot m + a_1 \cdot \sum x^2 \cdot m + a_2 \cdot \sum x^3 \cdot m \\ x^2 \cdot \sum y \cdot m = a_0 \cdot \sum x^2 \cdot m + a_1 \cdot \sum x^3 \cdot m + a_2 \cdot \sum x^4 \cdot m \end{cases} \quad (4.12)$$

Дані випробувань першої партії інструментів занесені у таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати випробувань різців методом торцевого точіння

Частота імпульсів f , Гц	Критична швидкість різання V_k , м/хв	Кількість інструментів m	$\sum um$	y	xm	x^2m	x^3m	x^4m	$x\sum um$	$x^2\sum um$
6	130;102	2	232	116	12	72	432	2592	1392	8352
7	180; 171; 160; 407; 416	5	1366	273	35	245	1715	12005	9562	66934
8	40; 480; 391	3	911	304	24	192	1536	12288	7288	58304
9	620; 390; 104;435; 341; 417; 555; 300; 278; 289; 376; 437; 450; 525; 293; 310; 57;122;183;315; 149; 67; 136; 184; 180; 107; 201	28	8935	319	252	2268	20412	183708	80415	723735
10	271	1	271	271	10	100	1000	10000	2710	27000
11	210; 223; 249;188; 345;315	6	1530	255	66	726	7986	87846	16830	185130
		$\sum=45$	$\sum= 13245$	$y = 294,3$	$\sum= 399$	$\sum= 3603$	$\sum=33081$	$\sum=308434$	$\sum=118197$	$\sum=1009555$

За даними цієї таблиці складаємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} 45a_0 + 399a_1 + 3603a_2 &= 13245 \\ 399a_0 + 3603a_1 + 33081a_2 &= 118200 \\ 3603a_0 + 33081a_1 + 308439a_2 &= 1069555 \end{aligned} \right\}$$

Після поділення всіх рівнянь на коефіцієнти при a_0 отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} a_0 + 8,87a_1 + 80,07a_2 &= 294,3 \\ a_0 + 9,03a_1 + 82,91a_2 &= 296,2 \\ a_0 + 9,18a_1 + 85,61a_2 &= 297 \end{aligned} \right\}$$

Після рішення цієї системи рівнянь знаходимо:

$$a_2 = -30,96; \quad a_1 = 56,4; \quad a_0 = -2206,4.$$

Запишемо рівняння параболи, яка висловлює зв'язок між x та y :

$$\bar{y}_x = -2206,4 + 56,4 \cdot x - 30,96 \cdot x^2. \quad (4.13)$$

Оцінювання тісноти зв'язку здійснювалося за коефіцієнтом кореляції, який визначається за формулою:

$$z = \sqrt{\frac{\sigma_b^2}{\sigma_\phi^2}}, \quad (4.14)$$

де σ_b^2 – дисперсія вирівняних значень функції:

$$\sigma_b^2 = \frac{\sum (y_b - \bar{y})^2 \cdot m}{\sum m},$$

де σ_ϕ – дисперсія фактичних значень функції:

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{\sum (y_{\phi} - \bar{y})^2 \cdot m}{\sum m}.$$

Оцінювання значності коефіцієнта кореляції проводимо за допомогою критерію Стюдента:

$$|r| > \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}}, \quad (4.15)$$

де t – критерій Стюдента;

$n-2$ – кількість ступенів свободи.

Таким чином, у загальному вигляді залежність критичної швидкості різання від частоти імпульсів можна записати у вигляді:

$$V_k = a_0 + a_1 \cdot f + a_2 \cdot f^2. \quad (4.16)$$

Для знаходження оптимального значення частоти імпульсів, необхідно продиференціювати рівняння (4.16) по f та дорівняти його до нуля:

$$a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot f = 0.$$

Отже:

$$f_{\text{опт}} = \frac{a_1}{2 \cdot a_2}. \quad (4.17)$$

Результати розрахунків наведені у таблиці 4.4.

Слід відзначити високу тісноту зв'язку між експериментальними і теоретичними даними, а також достатню узгодженість отриманих результатів з даними лабораторних (глави 2; 3) і виробничих випробувань різців (додатки А1–А4).

Таблиця 4.4 – Результати розрахунків оптимальних значень частоти імпульсів

Номер партії інструментів	Значення геометричних параметрів, град			Залежність $V_k = \int (f)$	Оптимальне значення f_{opt} , мм	Коефіцієнт кореляції Z
	φ	α	φ_1			
1	60	8	20	$V_k = -2206,4 + 561,4 f - 30,96 f^2$	9,3	0,59
2	75	8	20	$V_k = -1200 + 440,8 f - 29,6 f^2$	7,5	0,53
3	90	8	20	$V_k = -120,4 + 334,8 f - 28,6 f^2$	5,8	0,57

4.4 Висновки до розділу 4

1. Результати виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів довели, що застосування оброблення імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню періоду стійкості інструментів у 1,2–2 рази.

2. Встановлено, що використання оброблення імпульсним магнітним полем сприяє зниженню коефіцієнта варіації стійкості у 1,3–3,1 разу.

3. Для інструментів, які працюють в умовах важкого різання, використання оброблення імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню гамма-відсоткової стійкості інструментів у 1,7–2,8 разу.

5 РОЗДІЛ
ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ
ТВЕРДОСПЛАВНОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ
ІМПУЛЬСНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

5.1 Підвищення ефективності технологічного процесу при використанні ОІМП для твердосплавних різальних інструментів

Для оцінювання ефективності оброблення металів різанням використовувалися цільові функції у розгорнутій формі, які наведені в роботі [152]:

– продуктивність механооброблення:

$$Q = \frac{F_g}{\frac{A_0 \cdot T^{\frac{1}{\mu}}}{(T_{\text{пр}} - T)^{\frac{1}{\mu}}} \cdot \left(1 + \frac{\tau \cdot \lambda}{T}\right) + T_B} \quad (5.1)$$

– собівартість операції:

$$C_0 = \frac{A_0 \cdot T^{\frac{1}{\mu}}}{(T_{\text{пр}} - T)^{\frac{1}{\mu}}} \cdot E \cdot \left(1 + \frac{\tau \cdot \lambda}{T}\right) + S_T \cdot A_0 \cdot \frac{T^{\frac{1}{\mu} - 1}}{(T_{\text{пр}} - T)^{\frac{1}{\mu}}} \cdot \lambda + C_{\text{мат}} \quad (5.2)$$

– інструментальні витрати:

$$S = S_T \cdot A_0 \cdot \frac{T^{\frac{1}{\mu} - 1}}{(T_{\text{пр}} - T)^{\frac{1}{\mu}}} \cdot \lambda \quad (5.3)$$

де F_g – річний фонд роботи обладнання, що діє;

λ – коефіцієнт часу різання, визначений як відношення часу різання до машинного часу $\lambda = \frac{T_p}{T_M} \leq 1$;

T_B – допоміжний час;

A_0 – постійна, яка залежить від параметрів процесу різання;

μ – показник відносної зносостійкості інструменту в формулі Тейлора:

$$V = \frac{C_v}{T^\mu}, \quad (5.4)$$

де E – собівартість верстатохвилин роботи верстата;

S_T – витрати відносно інструменту за період його стійкості;

T_{np} – граничне значення стійкості, що за рахунок зміни тільки швидкості різання перевершити не вдається. Для твердосплавних інструментів під час оброблення сталі $T_{np} = 600$ хв. З урахування граничної стійкості формула Тейлора була перетворена до виду:

$$T = \frac{C_T}{V^\mu + \frac{C_T}{T_{np}}}, \quad (5.5)$$

де τ – час простоювання обладнання під час заміни інструменту, що затупився, гострим.

Якщо під час роботи обладнання має місце розсіювання зносостійкості інструментів, а також ймовірність виходу інструменту з ладу внаслідок викрошувань або поломок, то в формулах (5.1–5.3) час на заміну інструменту, що затупився, новим, буде залежати від ймовірності безвідмовної роботи i , тому, воно складається з часу на планову заміну інструментів τ_n і часу, що витрачається на аварійну його заміну τ_a :

$$\tau = \tau_n \cdot P(T) + \tau_a [1 - P(T)]. \quad (5.6)$$

Показник ступеня μ у формулі Тейлора залежить від розсіювання стійкості, що виражається формулою:

$$\mu = \frac{C_{\mu} \cdot (E_2 \cdot K_2 - E_1 \cdot K_1)}{b \cdot \ln V}, \quad (5.7)$$

де C_{μ} – коефіцієнт, який залежить від матеріалу, який обробляється, розсіювання стійкості та типорозміру інструменту;

K_1, K_2 – коефіцієнти, які залежать від об'єму вибірки та розсіювання стійкості;

b – коефіцієнт форми розподілення Вейбулла, що є універсальним законом, який описує розсіювання стійкості;

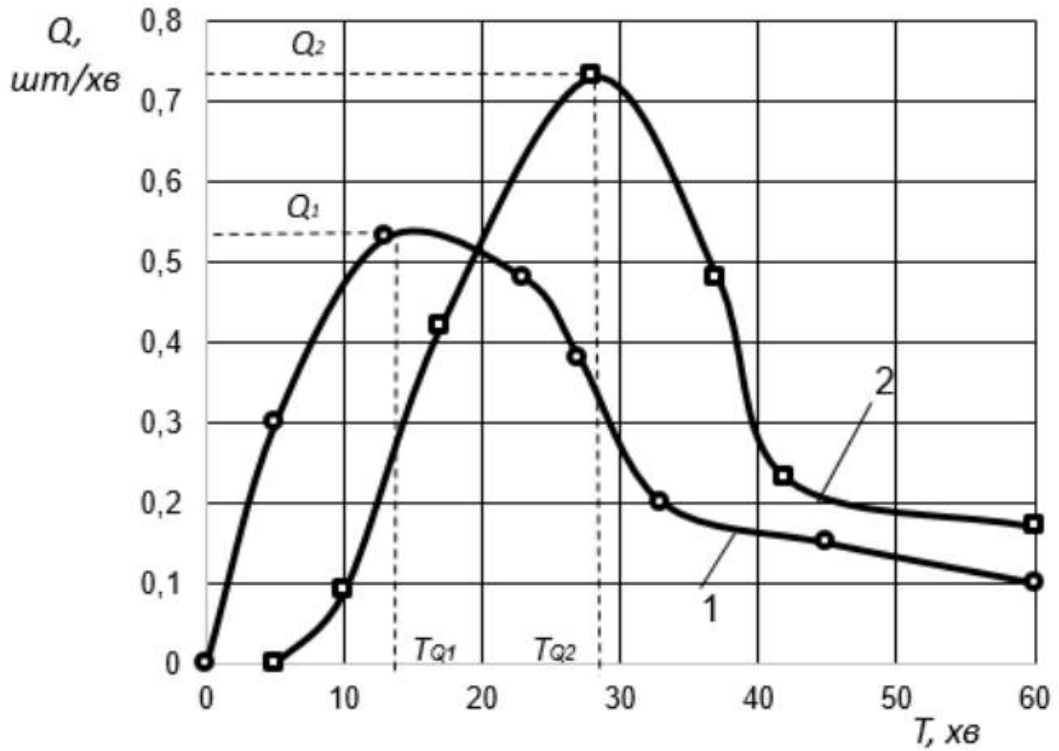
$$E_1 = \ln(-\ln P_{T_{min}}); \quad E_2 = \ln(-\ln P_{T_{max}}),$$

де $P_{T_{min}}, P_{T_{max}}$ – вірогідність безвідмовної роботи за умови найменшого та найбільшого значеннях зносостійкості інструментів в усій вибірці.

З урахуванням наведених вище залежностей були розраховані виробництво, собівартість операції та інструментальні витрати для операції партії інструментів 7 (табл. 5.1), графіки яких наведені на рисунках 5.1–5.3 [114].

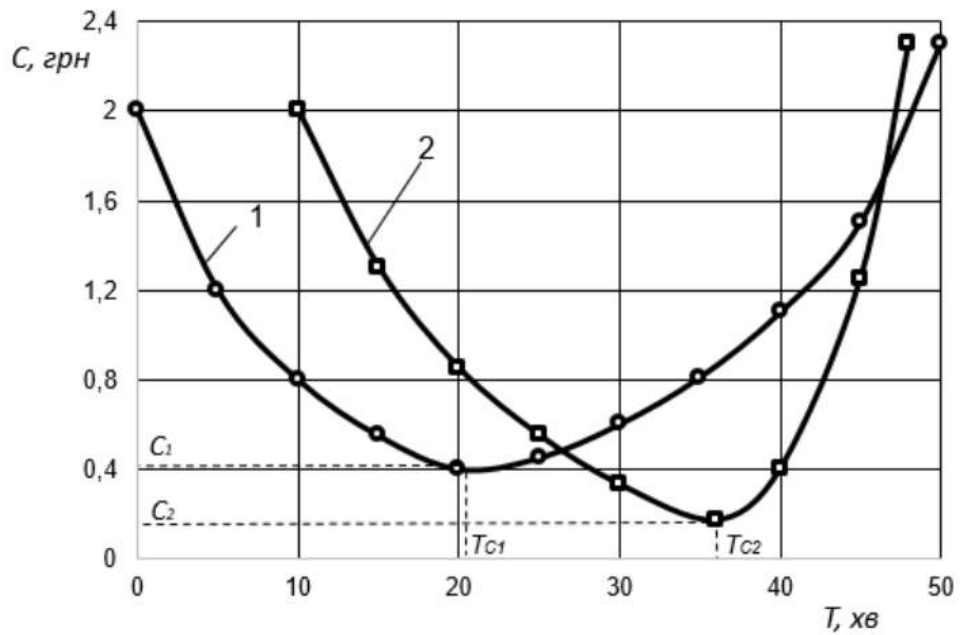
Аналіз графічних залежностей продуктивності від стійкості (рис.5.1, довірчий інтервал: $\Delta Q = \pm 0,126$ шт./хв) показав наявність чітко вираженого екстремуму, який характеризує оптимальне значення стійкості інструментів. Слід зазначити, що для інструментів, які зміцнені ОІМП, спостерігається підвищення оптимальної стійкості T_Q у 1,8-2,5 разу.

На підставі отриманих результатів (формула 5.2) було побудовано залежність собівартості операції від стійкості (рис. 5.2, довірчий інтервал: $\Delta C = \pm 0,0226$ грн).



1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.1 – Вплив ОІМП на продуктивність операції



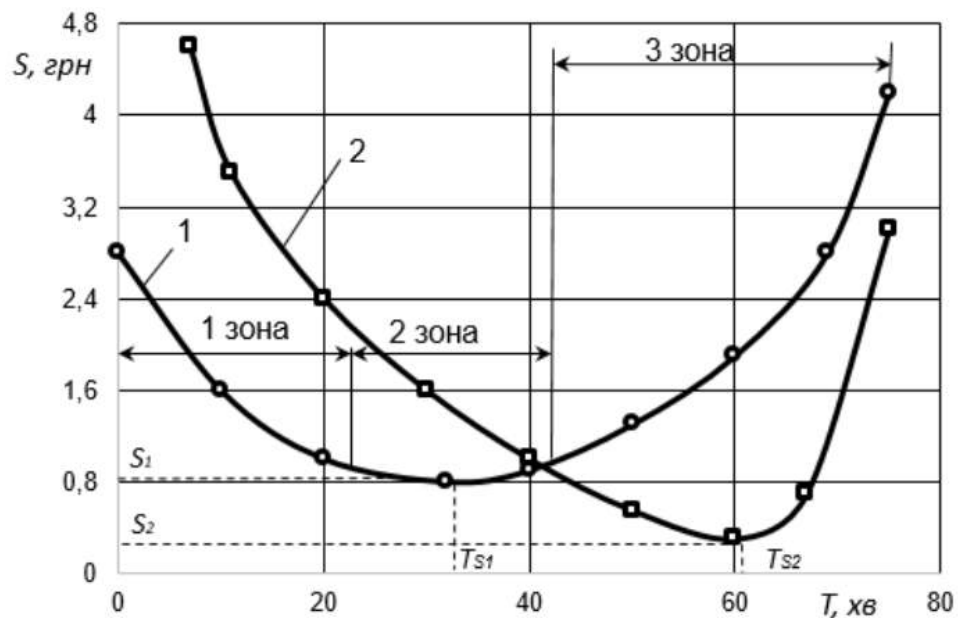
1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.2 – Вплив ОІМП на собівартість операції

Виходячи з рисунка 5.2, значення оптимальної стійкості інструментів, які зміцнені ОІМП, підвищується в 1,5 разу, що також говорить про зменшення розсіювання стійкості інструментів.

Використання ОІМП сприяє також підвищенню кількості переточок інструменту. Разом з підвищенням стійкості інструментів це призводить до зменшення інструментальних витрат (рис. 5.3).

З рисунка 5.3 (довірчий інтервал: $\Delta S = \pm 0,647$ грн) визначено, що для інструментів, які не зміцнені, характерні три зони. Для першої зони, при порівняно невисокому значенні стійкості інструменту, характерно різке зменшення інструментальних витрат під час збільшення стійкості. У другій зоні інструментальні витрати змінюються незначно, що пов'язано з постійною інтенсивністю відмов.



1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.3 – Вплив ОІМП на інструментальні витрати

У третій зоні інтенсивність збільшення інструментальних витрат різко підвищується. Для інструментів, які зміцнені ОІМП, має місце більш визначений екстремум функції. Друга зона звужується. Це говорить про те,

що ОІМП сприяє усуненню дефектів внутрішнього будування інструментального матеріалу. Це позитивно впливає на стійкість інструменту, та інтенсивність відмов монотонно збільшується.

Виходячи з рисунків 5.1–5.3 ОІМП сприяє підвищенню оптимальної стійкості (екстремум на графіках залежностей) T_Q , T_C , T_S у 1,4–2,0 разу.

Це пов'язано перш за все із зниженням вірогідності відмов, які викликані абразивним зношуванням і руйнуванням різальних інструментів, отже і зі зменшенням долі часу, який витрачається на заміну інструмента при аварійному виході його з ладу. Крім того, спостерігається підвищення стабільності властивостей інструментів, які зміцнені ОІМП, що відображено у зменшенні коефіцієнту варіації стійкості, збільшує вірогідність безвідмовної роботи (5.6).

З наведених вище графіків також видно, що застосування ОІМП сприяє підвищенню продуктивності операції, зниженню її собівартості й інструментальних витрат за умови оптимальної стійкості інструментів. Це говорить про підвищення ефективності технологічного процесу під час застосуванні різальних інструментів, які зміцнені ОІМП.

При відомому значенні оптимальної стійкості інструменту T_{opt} оптимальний розмір швидкості різання (за умови прийнятого критерія оптимізації) може бути розрахований за рекомендованою М. І. Клушиним формулою [48]:

$$V = \frac{C_V}{X K_x} \cdot \left[\frac{(T_{пр} - T_{опт}) \cdot T_C}{T_{опт} \cdot (T_{пр} - T_C)} \right]^{\frac{1}{\mu}} \cdot K_{ин} \cdot K_q \cdot K_M \cdot K_{сож} \cdot K_{сп} \cdot K_{ж}, \quad (5.8)$$

де X – характеристика різання, яку виведено М. І. Клушиним для того, щоб відобразити безперервний характер зміни швидкості різання. Для операції точіння ця характеристика визначається з виразу:

$$X = \alpha \cdot S \cdot \sin \varphi,$$

де T_c – нормативна стійкість;

$K_{ин} \cdot K_q \cdot K_M \cdot K_{сож} \cdot K_{сп} \cdot K_{ж}$ – коефіцієнти, які враховують вплив на швидкість різання, відповідно, інструментального матеріалу, мастильно-охолоджувальних засобів, стан поверхні заготовки деталі, що обробляється, жорсткості системи ВПД.

За умови важких умов різання (оброблення по ливарній кірці, різання з ударами, нерівномірність припуску) будуть переважати тендітні руйнування інструменту. У цьому випадку важливим критерієм стійкості інструменту є його міцність. Характеризує цю міцність інструменту гранична подача, при якій відбувається руйнування інструменту S_p [108]. Продуктивність оброблення за таких умов [32] рекомендовано розраховувати за формулою:

$$Q = 10^3 \cdot t \cdot S \cdot V \cdot T. \quad (5.9)$$

Оскільки у виробничих умовах має місце розсіювання стійкості інструментів, то призначення режимів різання має здійснюватися виходячи із забезпечення зносостійкості із заданою вірогідністю P . Остання визначається у залежності від характеру розподілення стійкості за аналогією з гамма-відсотковим ресурсом виробу. Така стійкість називається гамма-відсотковою стійкістю та визначається за допомогою графіків безвідмовної роботи інструментів, складених за результатами спостережень за роботою інструментів (рисунки 5.1–5.6) або за формулою (5.5).

За умови попереднього оброблення твердосплавними інструментами на розмір розсіювання стійкості чине вплив подача S . Залежність коефіцієнту варіації стійкості від подачі виражається рівнянням:

$$K_T = M_K + 0,75 \cdot S, \quad (5.10)$$

де M_K – коефіцієнт, який залежить від умов різання.

Останній вираз використано під час розроблення нормативів різання для важких верстатів токарно-карусельної групи [61].

У свою чергу встановлений функційний зв'язок поміж коефіцієнтами варіації стійкості та параметрами розподілення Вейбулла:

$$K_T = \left[\frac{\Gamma \cdot (1 + \frac{2}{b})}{[\Gamma \cdot (1 + \frac{1}{b})]^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5.11)$$

де Γ – гамма-функція.

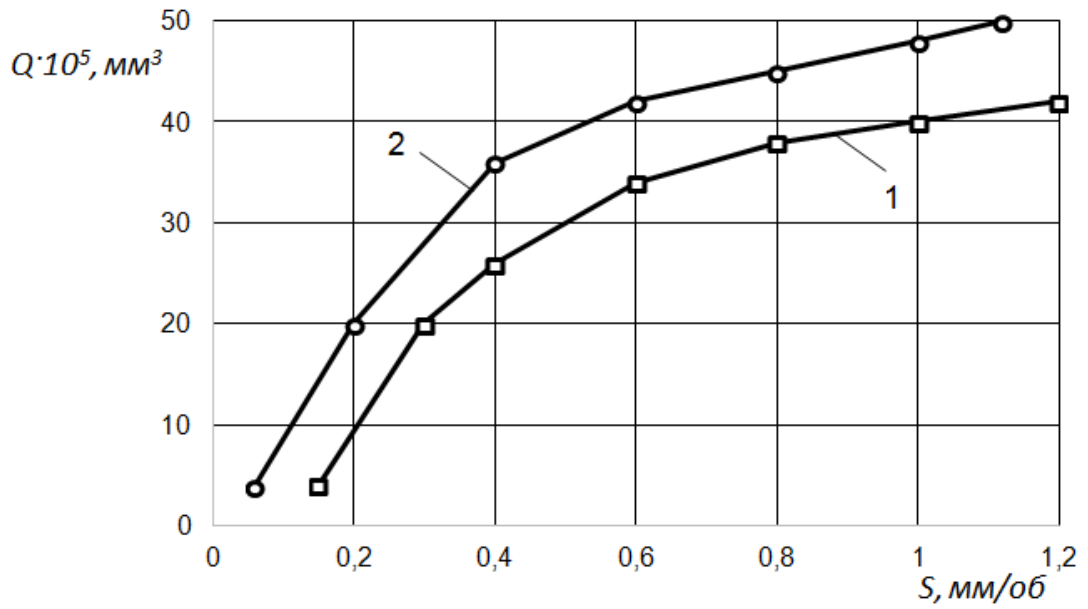
Отже, гамма-відсоткова стійкість має тісний зв'язок з коефіцієнтом варіації стійкості.

Враховуючи визначений вплив подачі на розмір розсіювання стійкості (5.26), а також складний характер залежності гамма-відсоткової стійкості від коефіцієнта варіації стійкості (5.5; 5.10), а відповідно і від подачі, важливо знати ступінь впливу подачі та гамма-відсоткової стійкості на продуктивність оброблення (5.9).

На рисунку 5.4 відображена залежність продуктивності від розміру подачі для випадку повздовжнього точіння сталі твердістю HB 201-226 різцями зі сплаву T5K10 ($\varphi = 60^\circ$, $t = 4$ мм, $S = 1,6$ мм/об, $V = 36$ м/хв).

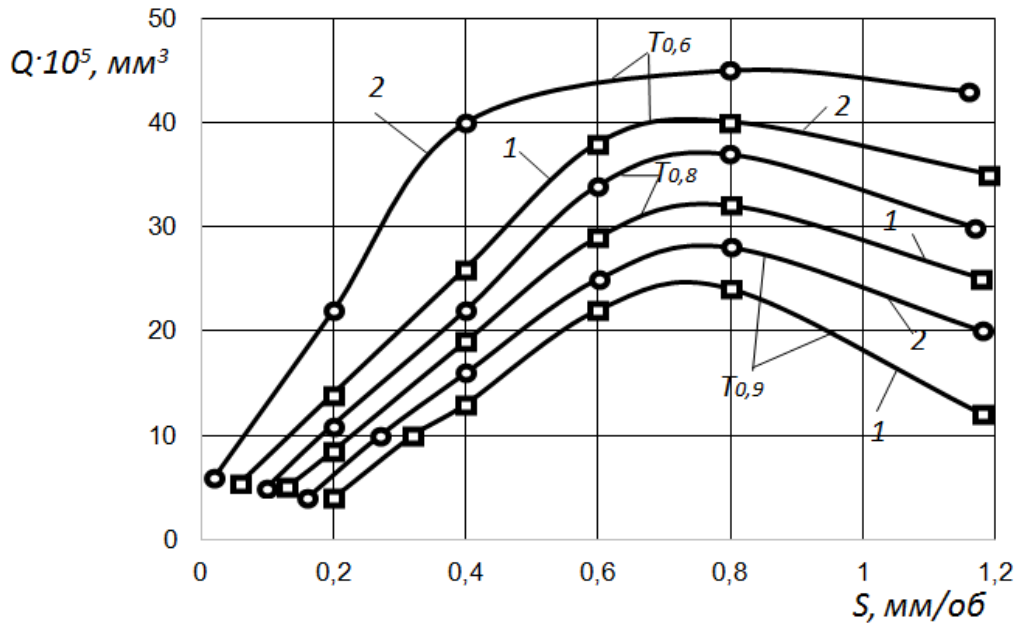
З рисунка 5.4 (довірчий інтервал: $\Delta Q = \pm 0,986 \cdot 10^5$ мм³) видно, що при постійному значенні середньої стійкості інструментів зі збільшенням подачі спостерігається безперервне зростання продуктивності, причому для зміцнених інструментів крива 2 знаходиться вище, що говорить про зростання продуктивності під час роботи інструментами, які зміцнені ОІМП.

Якщо ж для розрахунку продуктивності замість середньої стійкості використовувати гамма-відсоткову стійкість, то, як видно з рисунка 5.5, існує значення подачі, відповідне максимальній продуктивності. При цьому при збільшенні ймовірності безвідмовної роботи $P(T)$ максимум продуктивності зміщується в бік зменшення подачі.



1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.4 – Вплив подачі на продуктивність оброблення без урахування розсіювання стійкості

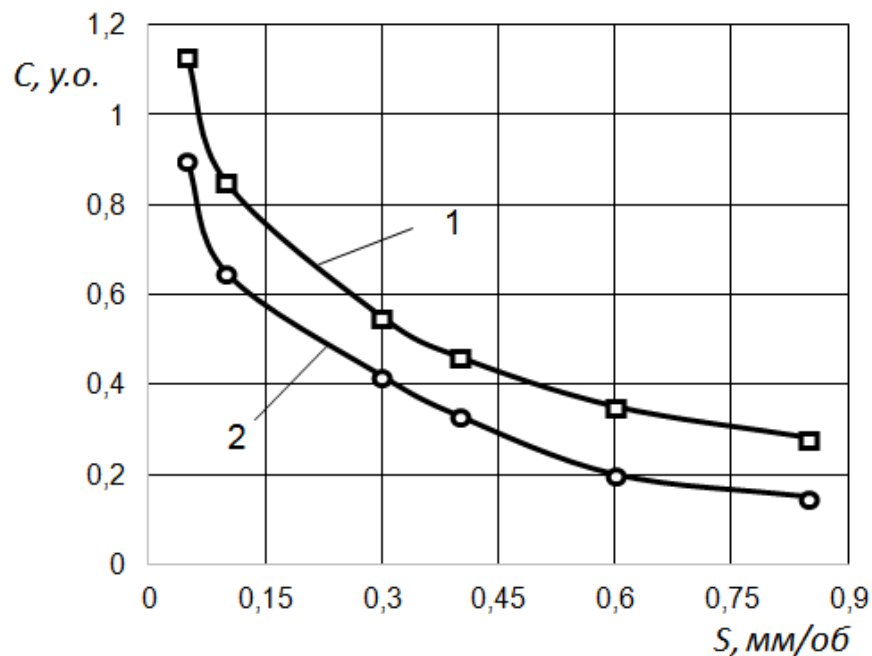


1 – інструменти без зміцнення; 2 — зміцнені інструменти

Рисунок 5.5 – Вплив подачі на продуктивність оброблення з урахуванням розсіювання стійкості

Оптимальний розмір подачі під час роботи інструментами, які зміцнені ОІМП, збільшується у 1,2–1,3 разу під час зростання продуктивності оброблення в 1,1–1,2 разу.

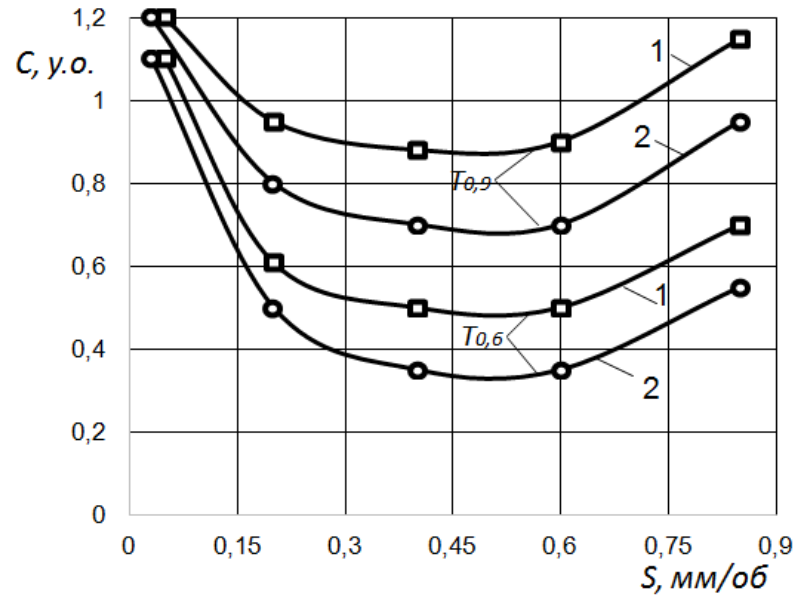
Аналогічні закономірності відслідковуються також під час дослідження впливу подачі на собівартість (рисунки 5.6 і 5.7, довірчий інтервал: $\Delta C = \pm 0,0342$ грн) та інструментальні витрати (рисунки 5.8 і 5.9, довірчий інтервал: $\Delta S = \pm 0,148$ грн).



1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

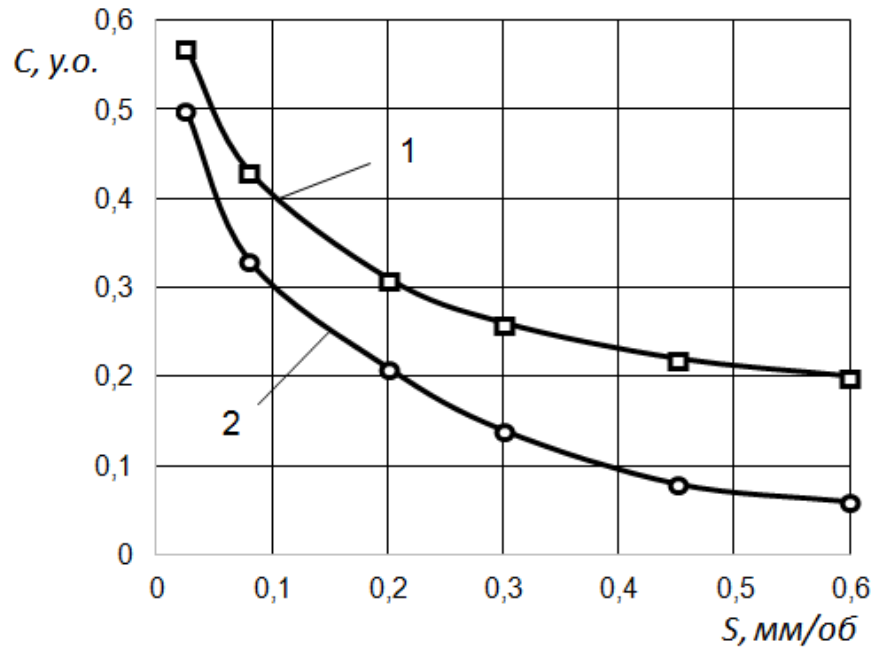
Рисунок 5.6 – Вплив подачі на собівартість оброблення без урахування розсіювання стійкості

Так, оптимальна подача, яка відповідає мінімальній собівартості операції, під час роботи інструментами, які зміцнені ОІМП, збільшується в 1,15–1,25 разу за умови зниження собівартості операції в 1,1–1,2 разу. Оптимальна подача, яка відповідає мінімальним інструментальним витратам, збільшується в 1,1–1,2 разу.



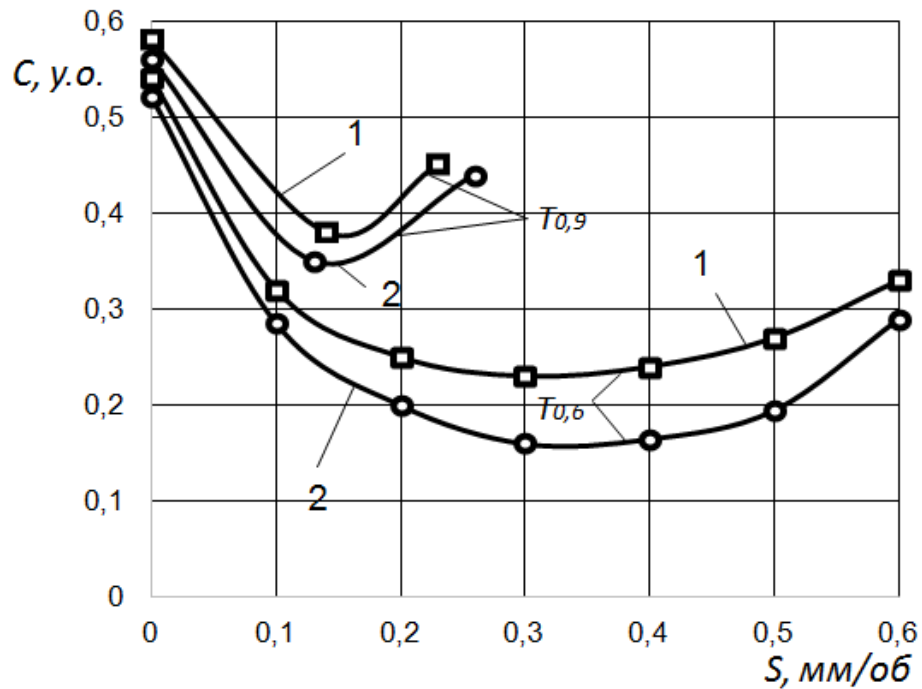
1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.7 – Вплив подачі на собівартість оброблення з урахуванням розсіювання стійкості



1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.8 – Вплив подачі на інструментальні витрати без урахування розсіювання стійкості



1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти

Рисунок 5.9 – Вплив подачі на інструментальні витрати з урахуванням розсіювання стійкості

Таким чином, за умови попереднього оброблення, коли переважає крихке руйнування інструменту, призначати режими різання необхідно виходячи з оптимального значення подачі з урахуванням розсіювання стійкості інструментів.

5.2 Взаємозв'язок параметрів ОІМП, параметрів процесу механічного оброблення й ефективності виробництва, їх практичне застосування

Процес, який пов'язаний з обробленням металів різанням, за визначенням проф. М. І. Клушина [48], являє собою систему різання, що складається з елементів, які у нашому випадку є окремими процесами. Стан системи характеризується підбором значень ряду змінних (факторів, показників), а поведінка системи – послідовністю станів у часі.

Система має властивість відносної стійкості у тому сенсі, що вона зберігається лише в певних межах зміни її змінних. Для нашого випадку – попереднє оброблення металів твердосплавними різальними інструментами, які зміцнені ОІМП, система представлена на рисунку 5.10 у вигляді взаємозв'язку параметрів, що характеризують процес механічного оброблення і ефективності виробництва з ОІМП.

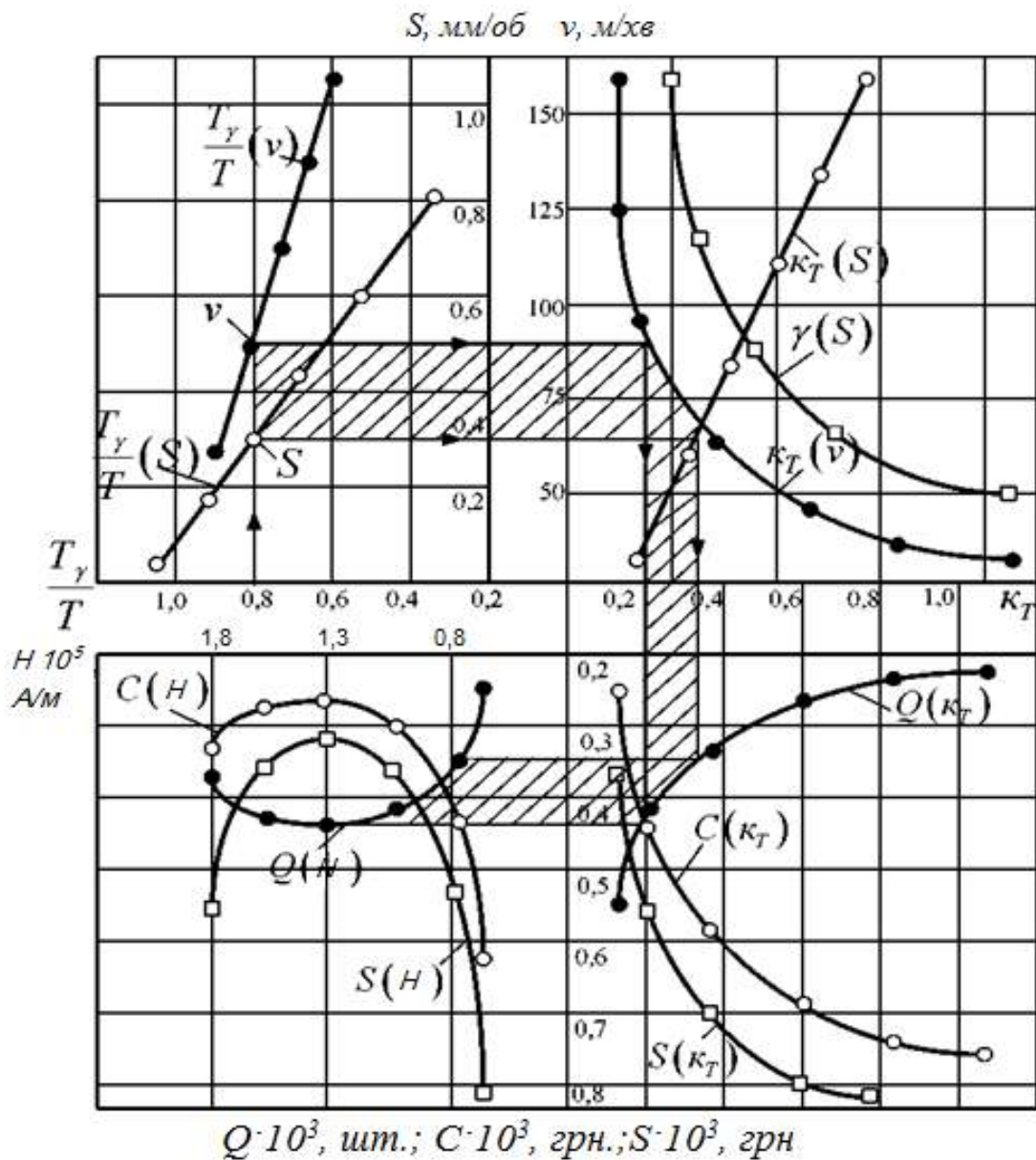


Рисунок 5.10 – Взаємозв'язок параметрів механооброблення й ефективності виробничого процесу під час використання ОІМП

На рисунку 5.10 надані рекомендації з визначення коефіцієнта варіації стійкості K_T , параметра розподілу Вейбулла γ , гамма-відсоткової стійкості інструментів T_γ у залежності від заданих режимів різання v і S , а також доцільно значення показників ефективності роботи підприємства: продуктивності Q , собівартості C й інструментальних витрат S . Послідовність зв'язків визначена стрілками.

У наслідок своєї автономності зазначена система може розглядатися як підсистема чи елемент більш ширшої системи. Вивчення системи здійснюється шляхом змінення зовнішніх впливів на неї «на вході» та вивчення її реакції «на виході», які прийнято називати функціями системи або параметрами її функціонування.

Змінними факторами стану системи в зазначеному випадку є:

1. Матеріал, що оброблюється, його властивості: твердість, межа міцності;
2. Операція оброблення – знятий припуск, стан вихідної поверхні, режими різання;
3. Різальний інструмент – інструментальний матеріал (склад, властивості), геометричні та конструктивні параметри;
4. Жорсткість системи ВПД, її динамічні властивості;
5. Параметри ОІМП – напруженість магнітного поля, частота імпульсів.

Було розглянуто такі результати функціонування системи:

1. Стійкість різального інструменту, гамма-відсоткова стійкість;
2. Варіація стійкості;
3. Продуктивність оброблення;
4. Собівартість операції;
5. Інструментальні витрати.

На кожен з параметрів функціонування системи в більшій чи меншій мірі впливають всі змінні фактори її стану, а також їх взаємовплив. У цілому розглянута система характеризується великою кількістю можливих станів і багаточисельністю зв'язків між її елементами, тобто є складною системою.

Оскільки на цей час реальне фізичне утримання механізмів, через які здійснюється взаємодія змінних стану системи на кожен з її показників, залишається виявленим лише в основних рисах, зв'язок між параметрами буде визначено у вигляді статистичних моделей, що характеризують взаємозв'язок між основними змінними факторами системи та параметрами, які характеризують ефективність виробництва.

5.2.1 Фактори, які впливають на параметри функціонування системи під час механооброблення деталей

На підставі досліджень [48; 108] представимо фактори, що впливають на параметри функціонування для таких груп:

1 група. Фактори, які характеризують конструктивні та геометричні параметри інструментів:

- передній кут γ ;
- задній кут α ;
- головний кут у плані φ ;

2 група. Фактори, які характеризують якість виготовлення інструментів:

- шорсткість задньої поверхні R_{zn} ;
- шорсткість передньої поверхні R_{zn} ;
- межа міцності твердого сплаву σ_B ;

3 група. Фактори, які характеризують якість заготовки:

- нерівномірність припуску в заготовці h_3 ;
- твердість матеріалу, що обробляється HB;
- межа міцності матеріалу, що обробляється σ_B ;
- межа плинності матеріалу, що обробляється σ_T ;

4 група. Фактори, які характеризують процес ОІМП:

- напруженість магнітного поля H ;
- частота імпульсів f ;

5 група. Фактори, які характеризують властивості інструментального матеріалу:

- твердість HRC;
- зносостійкість;
- червоностійкість.

Фактори, які наведені у групах 3 та 5, не було розглянуто, тому що під час відсіювання за методом, описаним у п. 5.2.2, не вдалося отримати відомостей стосовно факторів у виробничих умовах, які б дозволили встановити кореляційну залежність із стійкістю інструментів.

5.2.2 Вибір найвпливовіших факторів на ефективність механічного оброблення деталей при використанні ОІМП

Основні фактори, які наведені у п. 5.2.1, представляють простір опису. Теоретично можна розглядати будь-який простір. Практично це пов'язано з більш-менш значною витратою часу на стан програми й аналіз результатів.

На першому етапі для попереднього відсіювання факторів було проведено кореляційний аналіз. За розмірами кореляційних характеристик можна встановити щільність зв'язку між стійкістю і факторами та виділити ті фактори, які мають найбільшу тісноту зв'язку зі стійкістю інструменту в межах діапазону її розсіювання.

Оскільки між розглянутими факторами і стійкістю може бути як лінійний, так і нелінійний зв'язок, то для оцінювання тісноти цього зв'язку використовувалося кореляційне відношення, яке визначалося за формулою:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma^2 - \sigma_y^2}{\sigma^2}}, \quad (5.12)$$

$$\text{де } \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum (y - \bar{y})^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum (\bar{y}_j - \bar{y})^2 ;$$

\bar{y}_j – групова середня.

Дані для кореляційного аналізу отримані у виробничих умовах шляхом випробувань інструментів за методикою, яка наведена у п. 4.1.

У таблиці 5.1 показані значення кореляційних відносин між стійкістю та технологічними факторами, які розраховані за формулою 5.12.

Таблиця 5.1 – Кореляційні відносини між стійкістю різців і технологічними факторами

Фактори, які впливають на стійкість	Кореляційне відношення
1. Передній кут γ	0,18
2. Головний кут в плані φ	0,16
3. Відсотковий вміст карбіду вольфраму WC	0,09
4. Напруженість магнітного поля H	0,48
5. Частота імпульсів f .	0,35
6. Відсотковий вміст кобальту C_o	0,42
7. Межа міцності твердого сплаву σ_B	0,34

Як видно з таблиці 5.1, кореляційні відносини між стійкістю і такими факторами, як передній кут, головний кут у плані, відсотковий вміст карбіду вольфраму має значення від 0,09 до 0,18. Це говорить про те, що зазначені фактори мають недостатню тісноту зв'язку зі стійкістю у межах діапазону її розсіювання і тому в подальшому не будуть враховані.

Наведені результати аналізу, хоча й дали можливість звузити простір опису до 7 факторів, але не дозволили визначити домінуючі фактори, тому на наступному етапі проводився розрахунок коефіцієнту взаємкореляції між факторами за допомогою виразу:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_{ik})(x_{jk} - \bar{x}_{jk})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_{ik})^2 \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_{jk})^2}}, \quad (5.13)$$

де i, j – номери факторів, між якими розраховується коефіцієнт взаємкореляції;

x_{ik}, x_{jk} – пара факторів, які розглядаються;

$\overline{x_{ik}}, \overline{x_{jk}}$ – середньоарифметичні значення факторів:

$$\overline{x_{ik}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik}, \quad \overline{x_{jk}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{jk} .$$

Оцінювання значності коефіцієнтів кореляції проводилось за допомогою критерія Стюдента [39]:

$$|r| = \frac{t_{кр}}{\sqrt{t_{кр}^2 + n - 2}} . \quad (5.14)$$

Слід зазначити, якщо розрахункове значення коефіцієнта кореляції r виявиться більше допущеного (5.14), то взаємовпливом пари факторів x_i і x_j нехтувати не можна.

За статистику, що характеризує внесок будь-якого фактора в сумарну дисперсію, була прийнята дисперсія нормованого значення цього фактора. Нормування факторів здійснювалося шляхом такого перетворення:

$$x_{ik} = \frac{x_{ik} - \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2}}{\frac{x_{imax} - x_{imin}}{2}}, \quad (5.15)$$

де x_i – поточне значення фактора в натуральному виразі;

x_{imax}, x_{imin} – максимальне і мінімальне значення i -го фактора.

Зазначене перетворення дозволяє звести усі властивості до єдиного масштабу та надає можливість порівняти їх один з одним.

Дисперсія нормованих значень визначалась за формулою:

$$\sigma\{x_i\} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \overline{x_{ik}})^2}{n-1} \quad (5.16)$$

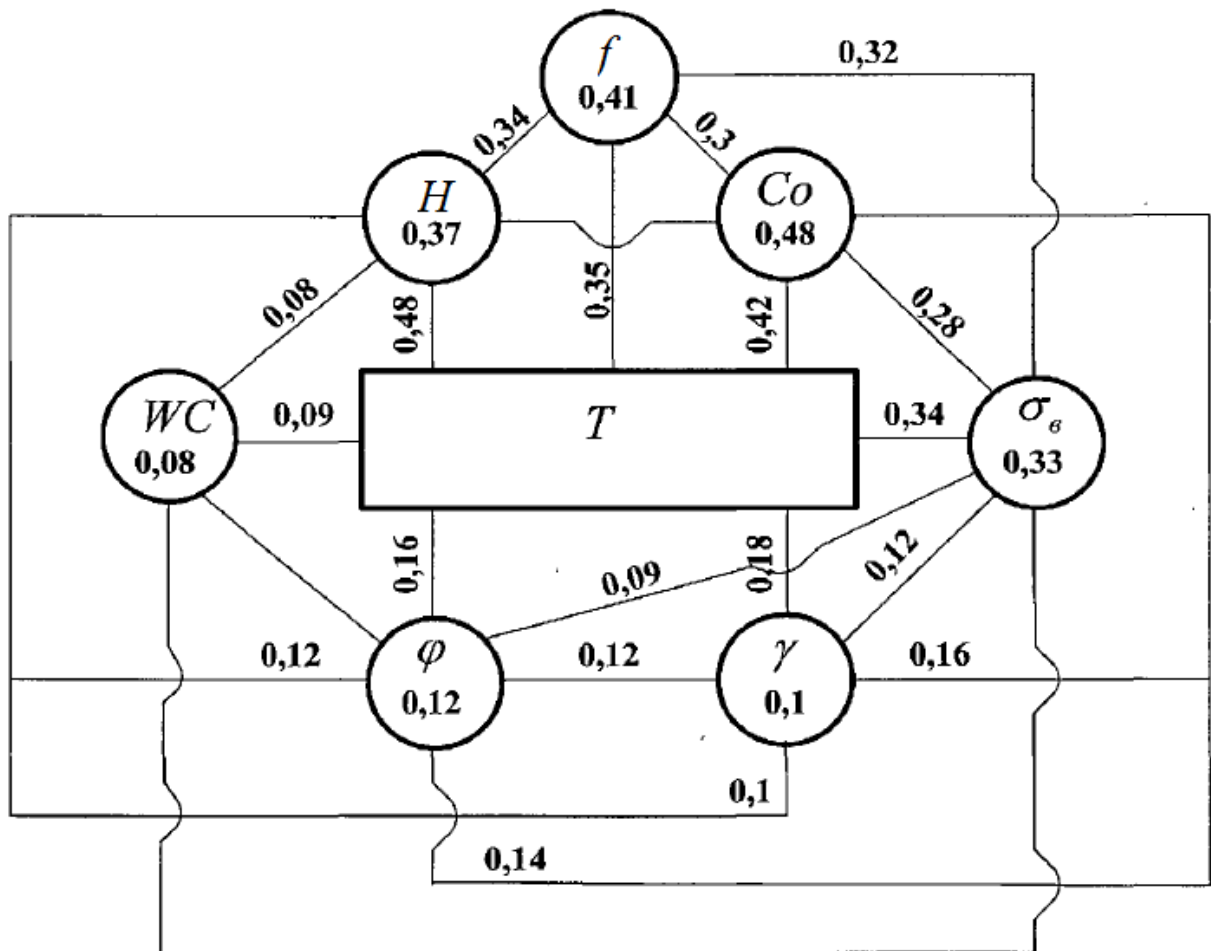


Рисунок 5.11 – Схема взаємозв'язку факторів і зв'язку факторів зі стійкістю

На рисунку 5.11 показана схема взаємозв'язку факторів і зв'язку факторів зі стійкістю. Для основних ознак наведено розміри дисперсій нормованих значень у колах. Лінії, які з'єднують ознаки, відповідають виділеному взаємозв'язку. Про розміри останніх можна судити за допомогою коефіцієнтів кореляції, які наведені на зазначеній схемі.

Таким чином, попередньо проведені дослідження дозволяють вважати, що домінуючими факторами є напруженість магнітного поля H , межа міцності твердого сплаву σ_6 , вмісту кобальту в твердому сплаві Co , частота імпульсів f .

5.2.3 Математичне оброблення експериментальних даних

У якості моделі для описування залежності продуктивності оброблення, яка визначалася за формулою 5.9, від зміни напруженості магнітного поля $x_1(H)$, частоти імпульсів $x_2(f)$, вмісту кобальту в твердому сплаві $x_3(C_o)$, межі міцності твердого сплаву $x_4(\sigma_b)$ було застосовано рівняння першого ступеню із взаємодіями:

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + \\
 & + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + \\
 & + b_{124} + x_1x_2x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4.
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Зазначене рівняння можна отримати шляхом варіювання кожного з факторів x_i на верхньому $x_{i\bar{b}}$ і нижньому $x_{i\underline{b}}$ рівнях, які відрізняються від базового рівня x_{i0} розміром кроку варіювання $\pm\Delta x_i$.

За основу плану експерименту був прийнятий повний факторний експеримент виду 2^4 [1; 36], де 2 – кількість рівней (верхній і нижній) незалежних змінних; 4 – кількість незалежних замінних.

Цей план дозволяє реалізувати всі можливі неповторювані комбінації рівнів незалежних змінних, кожна з яких примусово варіюється на двох рівнях.

Для спрощення обчислень вироблялося кодування незалежних змінних за формулою перетворення:

$$Z_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \tag{5.18}$$

Розмір нижнього та верхнього рівня та, відповідно, розмір кроку варіювання для кожної змінної мали такі значення:

$$- H: x_{1\underline{b}} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ А/м}, x_{1\bar{b}} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ А/м}, \Delta x_1 = 0,25;$$

- f : $x_{2H} = 5$ Гц, $x_{2\sigma} = 10$ Гц, $\Delta x_2 = 2,5$;
- C_o : $x_{3H} = 6$ %, $x_{3\sigma} = 10$ %; $\Delta x_3 = 2$;
- σ_6 : $x_{4H} = 5,1 \cdot 10^8$ Па, $x_{4\sigma} = 6,3 \cdot 10^8$ Па, $\Delta x_4 = 0,6$.

У таблиці 5.2 наведено план експерименту. У кожній строчці відображені рівні значень змінних, які було віднесено до певної точки факторного простору.

Коефіцієнти апроксимувальної функції 5.17 визначалися за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{m=1}^N x_{im} y_m}{N}. \quad (5.19)$$

Результати розрахунків коефіцієнтів наведено в останній строчці таблиці 5.2.

Математичну модель залежності продуктивності оброблення від показників зміни напруженості магнітного поля x_1 (H), частоти імпульсів $x_2(f)$, вмісту кобальту в твердому сплаві x_3 (C_o), межі міцності твердого сплаву x_4 (σ_4) за результатами проведеного випробування може бути записано у вигляді:

$$\begin{aligned} y = & 2,795 + 0,828z_1 + 0,025z_2 + 0,358z_3 + 0,369z_4 - 0,006z_5 + \\ & + 0,115z_6 + 0,126z_7 + 0,016z_8 + 0,027z_9 - 0,148z_{10} - 0,117z_{11} + \\ & + 0,145z_{12} - 0,102z_{13} - 0,019z_{14} - 0,049z_{15}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Таблиця 5.2 – План повного факторного експерименту типу 2^4 і результати розрахунків коефіцієнтів рівняння регресії

№ опыту	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	$y \cdot 10^6$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1,4
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	2,188
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1,47
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	2,625
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	2Д
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	4,025
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	1,925
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	3,675
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	2,275
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	3,85
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1,75
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	3,938

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	2,013
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	4,305
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	2,8
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	4,375
$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	0,828	0,025	0,358	0,369	0,006	0,115	0,126	0,016	0,027	-0,148	-0,117	0,145	-0,102	-0,019	-0,049	2,795

Перевірка на статичну значність розрахованих коефіцієнтів проводилася за довірчим значенням коефіцієнтів:

$$\Delta b_1 = \pm t_{кр} S_{b_i}, \quad (5.21)$$

де S_{b_i} – дисперсія, яка характеризує помилку випробування у визначенні коефіцієнтів регресії:

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (5.22)$$

де S_y^2 – дисперсія опиту.

На підставі результатів експериментів було розраховано довірче значення для коефіцієнтів регресії: $\Delta b_i = \pm 0,037$.

Тому, відкинувши незначні члени взаємодії, первинну математичну модель можна представити у вигляді:

$$y = 2,795 + 0,828z_1 + 0,35z_3 + 0,369z_4 + 0,115z_6 + 0,126z_7 - \\ - 0,148z_{10} - 0,117z_{11} + 0,145z_{12} - 0,102z_{13} - 0,049z_{15}. \quad (5.23)$$

Переходячи від кодованих значень змінних до натуральних за допомогою виразу 5.18, отримуємо рівняння залежності продуктивності оброблення від напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_B , вмісту кобальту в твердому сплаві C_o , частоти імпульсів f :

$$Q = (-22,728 + 0,094H + 2,869C_o + 4,7717\sigma_B + 3,43f + 0,0031HC_o - \\ - 0,0144H\sigma_B - 0,7787f\sigma_B - 0,5983C_o\sigma_B - 0,892Hf - 0,4846fC_o + \\ + 0,0112HfC_o + 0,0973fC_o\sigma_B + 0,0026HfC_o\sigma_B) \cdot 10^6. \quad (5.24)$$

Використовуючи рівняння 5.23 і 5.24 і застосовуючи метод крутого сходження [1; 36], знайдемо найбільш доцільні розміри відхилень напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_B , вмісту кобальту в твердому сплаві C_o , частоти імпульсів f від номінальних значень.

У таблиці 5.3 показано послідовність розрахунків розмірів відхилень.

Таблиця 5.3 – Використання методу крутого сходження для знаходження найбільш доцільних розмірів відхилень від номінальних значень

Послідовність розрахунку відхилень	Фактори, що досліджувалися			C_o	$Q \cdot 10^6$, мм ³
	H	f	σ_B		
Коефіцієнти рівняння регресії b_i	0,828	0,025	0,369	–	–
Інтервал варіювання Δx_i	4,5	3	0,45	–	–
Добуток $b_i \Delta x_i$	3,726	0,075	0,166	–	–
Шаг λ_i	1,5	1	0,15	–	–
Реалізований досвід	25	10	6,3	10	4,375
Уявний експеримент	26,5	11	6,45	10	4,717
Уявний експеримент	28	12	6,6	10	4,992
Уявний експеримент	29,5	13	6,75	10	5,182
Середнє відхилення випадкового розміру $\sigma_{x_i} = k_{x_i} \bar{x}_i$	1,937	1,291	0,335		–
Відхилення фактора $\delta_{x_i} = \pm 3\sigma_i$	5,811	3,873	1,01	–	–

5.3 Висновки до розділу 5

1. Встановлено, що використання оброблення імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню оптимальної стійкості в 1,4–2 рази.

2. Для інструментів, які працюють в умовах важкого різання, використання оброблення імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню оптимальної подачі в 1,15–1,3 разу.

3. Використовуючи факторний аналіз типу 2^4 , визначено залежність продуктивності оброблення різцями, які зміцнені ОІМП, від напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_s , вмісту кобальту в твердому сплаві C_o , частоти імпульсів f .

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведених досліджень вирішена актуальна науково-технічна задача, що має важливе промислове значення, яка полягає у підвищенні ефективності оброблення деталей на важких верстатах шляхом зміцнення твёрдосплавного різального інструменту імпульсним магнітним полем (ОІМП).

2. Аналіз умови роботи різальних інструментів на підприємствах важкого машинобудування показав необхідність розроблення методів підвищення продуктивності, зниження собівартості та витрат інструментальних матеріалів, підвищення надійності інструменту. Встановлено ефект об'ємного зміцнення твёрдосплавного різального інструменту обробленням імпульсним магнітним полем, але методика визначення раціональних режимів оброблення імпульсним магнітним полем твёрдих сплавів і режими експлуатації зміцнених інструментів розроблена недостатньо та потребує вивчення.

3. З'ясовано що, при попередньому обробленні матеріалів твёрдосплавними різальними інструментами, які зміцнені ОІМП, відбувається багаторазова прироботка інструменту з декількома ступенями уповільнення і прискорення процесу зношування, що обґрунтовує підвищення міцності та зносостійкості твёрдосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП.

4. Випробування зразків з твёрдого сплаву при консольному вигинанні показали, що інструменти, які зміцнені ОІМП, мають підвищення у 1,2–1,22 разу міцності, а також більш високу однорідність і рівномірність розподілу дефектів за обсягом тіла. Дослідження на абразивне зношування показали, що після оброблення імпульсним магнітним полем підвищується абразивна зносостійкість твёрдосплавних інструментів у 1,3–1,4 разу і зменшується коефіцієнт варіації зношування у 1,5 разу.

5. Отримано, що модифікація твердого сплаву T5K10 обробленням імпульсним магнітним полем, залежно від застосованих режимів, призводить до зростання границі міцності на згинання при статичному навантаженні на 16–27 %, що дозволяє прогнозувати зростання границі витривалості.

6. Показано значний вплив на міцність і руйнування досліджених твердосплавних пластин дефектів структури поверхневого шару. Встановлено, що модифікація твердих сплавів обробленням імпульсним магнітним полем призводить до підвищення їх однорідності, зменшення товщини тріщинуватого шару, стабілізації механічних характеристик, зростання границі міцності на згинання.

7. Використання методів моделювання дозволило встановити оптимальні режими і умови зміцнення залежно від марки твердого сплаву і геометричних параметрів інструменту. Визначено оптимальні величини напруженості магнітного поля і частоти імпульсів у залежності від геометричних параметрів інструменту.

8. На підставі виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів встановлено, що застосування оброблення імпульсним магнітним полем сприяє:

- підвищенню зносостійкості різальних інструментів у 1,2–2 разу;
- зменшення коефіцієнта варіації стійкості у 1,3–3,1 разу;
- підвищення гамма-відсоткової стійкості у 1,7–2,8 разу;
- зменшення кількості викришування, поломок в зоні прироботки інструменту у 2,7 разу;
- ефект зміцнення після переточування інструменту зберігається.

9. За допомогою системного аналізу процесу механічного оброблення встановлено взаємозв'язок між параметрами, що характеризують процесі різання, параметрами оброблення імпульсним магнітним полем і ефективністю виробництва. На підставі цього розроблена статистична модель, що дозволяє визначити продуктивність механооброблення в

залежності від властивостей інструментального матеріалу і параметрів оброблення імпульсним магнітним полем.

10. Застосування оброблення імпульсним магнітним полем дозволяє оптимізувати режими різання за продуктивністю оброблення, собівартістю операції та інструментальними витратами. Встановлено, що при важких умовах різання доцільно оптимізувати режим різання за величиною подачі з урахуванням розсіювання стійкості інструментів. Застосування оброблення імпульсним магнітним полем твердосплавних інструментів сприяє підвищенню величини оптимальної подачі у 1,2–1,3 разу при підвищенні, продуктивності у 1,1–1,2 разу. Результати роботи впроваджені на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», ПрАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» і у навчальний процес ДДМА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 235 с.
2. Антонюк В. С., Сорока О. Б., Ляшенко Б. А., Рутковський А. В. Дискретні покриття на різальному інструменті. *Проблеми прочності*. 2007. № 1. С. 138–143.
3. Башков В. М., Кацев П. Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. М : Машиностроение, 1985. 136 с.
4. Белявцев Н. И., Узунян М. Д. Оптимизация процесса шлифования инструментов из БВТС группы СТИМ и анализ технологической себестоимости. *Резание и инструмент в технологических системах* : междунар. научн.-техн. сборник. Харьков : ХГПУ, 1998. Вып. 52. С. 12–16.
5. Белявцев Н. И., Узунян М. Д. Остаточное напряженно-деформированное состояние в безвольфрамовом твердом сплаве СТИМ-3Б после алмазно-искрового шлифования. *Резание и инструмент в технологических системах* : междунар. научн.-техн. сборник. Харьков : ХГПУ, 2001. Вып. 60. С. 7–12.
6. Бетанели А. И., Брусиловский Б. Р. Влияние дробеструйной и вибрационной обработок на прочность твердосплавных резцов. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. 1975. Вып. 2 С. 82–86.
7. Бородкин Ю. А. Исследование влияния магнитной обработки на стойкость инструмента из быстрорежущих сталей: автореф. дис.... канд. техн. Наук : 05.03.01. Уфимск. авиац. ин-т. Уфа, 1980. 24 с.
8. Васильченко Я. В. Шаповалов М. В. Способ комбинированного упрочнения режущего инструмента и деталей машин. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : тези доповідей X Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Суми, 2010. С. 139–140.

9. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Оцінка характеристик конструкційної міцності різальних пластин та оптимізація технологій зміцнення за параметрами міцності. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : тези доповідей XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції. Чернігів, 2017. С. 104–105.

10. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Разработка технологических систем для обработки крупногабаритных деталей на базе адаптивных многоцелевых тяжелых станков. *Машиноприладобудування та транспорт* : вестник СевНТУ. 2013. № 139. С. 28–32.

11. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Исследование технических параметров и технологических возможностей тяжелых токарных станков. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА. 2011. № 29. С. 76–84.

12. Васильченко Я. В., Турчанин М. А., Шаповалов М. В., Киреева А. Е. Повышение эффективности режущего инструмента на тяжелых станках за счет разработки и внедрения технологического метода обработки импульсным магнитным полем. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ : ДДМА, 2015. С. 16.

13. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Підвищення ефективності різального інструменту на важких верстатах за рахунок розробки та впровадження технологічного методу обробки імпульсним магнітним полем. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї наука виробництво* : тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Суми, 2014. С. 108.

14. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Михайлюк А. В. Повышение эффективности работы тяжелого токарного оборудования за счет разработки рекомендаций по выбору рациональных режимов резания. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* : матеріали XI

Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ : ДДМА, 2013. С. 25.

15. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Савелова И. К., Савелов Д. В. Моделирование процесса механической обработки крупногабаритных деталей на тяжелом токарном станке. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ : ДДМА, 2011. С. 23.

16. Василюк Г. Д. Влияние искусственного округления лезвий на характер износа твердосплавных резцов. *Надежность режущего инструмента*: сб. статей. Киев, 1975. Вып. 2. С. 175–177.

17. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов: перев. с англ. М. : Машиностроение, 1964. 257 с.

18. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Наука, 1969. 236 с.

19. Верещака А. С., Григорьев С. Н. Повышение работоспособности режущего инструмента путем комплексной поверхностной обработки. *Надежность режущего инструмента*: сб. статей. Краматорск, 1991. Вып. 4. С. 130–136.

20. Верещака А. С. Карпушевски Б., Дюбнер Л. Г. Анализ основных аспектов проблемы применения многослойно-композиционных наноструктурированных функциональных покрытий для режущего инструмента. *Сучасні технології в машинобудуванні*. Харків, 2008. Вип. 2. С. 87–100.

21. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М. : Машиностроение, 1986. 192 с.

22. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Колокольников М. Г. Абразивное изнашивание. М. : Машиностроение, 1990. 224 с.

23. Владимиров Б. Г., Гусева М. И., Апарина Н. П. Повышение износостойкости твердосплавного режущего инструмента методом ионного легирования. *Трение и износ*. 1993. № 3. С. 544–551.

24. Воробьев Р. А. Структурные превращения и физико-механические свойства инструментальных и пружинных сталей при магнитно-импульсном воздействии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2011. 18 с.

25. Высоцкий Ю. И., Миранцов Л. М. Влияние главного заднего угла на надежность твердосплавных отрезных резцов. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. Киев, 1972. С. 170–176.

26. Галей М. Т. Повышение стойкости режущих инструментов путем магнитной обработки. *Станки и инструмент*. 1973. № 5. С. 31.

27. Галей М. Т., Ашихмин В. С. Изучение влияния магнитного поля на стойкость быстрорежущего инструмента. *Станки и инструмент*. 1981. № 6. С. 31–34.

28. Гах В. М. Высокие технологии в машиностроении : уч. пособие. Краматорск : ДГМА, 2005. 62 с.

29. Гах В. М. Исследование механизма и технологии вибрационного упрочнения твердосплавного инструмента. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. Краматорск, 1975. Вып. 2. С. 95–102.

30. Герганов А. Влияние импульсной магнитной обработки на порошковые инструментальные материалы. *Обработка импульсным магнитным полем (метод и техника)* : материалы 4-го науч.-техн. семинара с международным участием по нетрадиционным технологиям АМО'89 (Ботевград, 12–14 окт. 1989 г.). София - Горький, 1989. С. 85–97.

31. Дидык Р. Г., Верховский С. Н. Упрочнение пластинок твердого сплава ударными волнами. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. Краматорск, 1975. Вып. 2. С. 105–107.

32. Зиновьев Н. И., Калиниченко В. В. Влияние режимов обработки импульсным магнитным полем на период стойкости и стабильность показателей микротвердости инструмента из твердого сплава ТН20. *Резание и инструмент в технологических системах* : Международный научно-техн. сборник. Харьков, 2001. Вып. 59. С. 101–105.

33. Зиновьев Н. И., Мирошниченко Ю. В., Кинденко Н. И. Обеспечение качества быстрорежущего инструмента на базе интегрированного упрочнения. Эффективные технологические процессы и оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин. Пенза, 1991. С. 71–72.

34. Зразок для оцінки міцності різальної частини твердосплавного інструменту шляхом його випробування на консольний згин: пат. на кор. модель 89666 Україна. № u201314289; заяв. 06.12.13; опубл. 25.04.14, бюл. № 8.

35. Кабалдин Ю. Г. Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания режущего инструмента. *Вестник машиностроения*. 1990. № 12. С. 62–68.

36. Калиниченко В. В. Применение обработки импульсным магнитным полем для повышения эффективности чистового точения сталей резцами с режущими пластинами из безвольфрамовых твердых сплавов. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. пр. Краматорськ, 2002. Вип. 12. С. 51–60.

37. Калиниченко В. В. Влияние обработки импульсным магнитным полем на структуру безвольфрамого твердого сплава ТН20. *Вестник Национального технического университета ХПИ* : сборник научных трудов. Тематический выпуск «Технологии в машиностроении». Харьков. 2002. Вып. 19. С. 167–173.

38. Калиниченко В. В. Практическое использование обработки импульсным магнитным полем режущих пластин из БВТС для повышения эффективности чистового точения сталей. *Надійність інструменту та сучасні технологічні системи* : тези доповідей 9-ї міжнародної науково-технічної конференції. 2002 р. 23–25 квітня. Краматорськ, 2002. С. 12–13.

39. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М. : Машиностроение, 1974. 240 с.

40. Кичко Ю. М. Долгополов О. И., Бычков Н. В. Опыт внедрения магнитной обработки режущего инструмента. *Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов* : межвузовский научный сборник. Уфа, 1979. Вып. 4. С. 100–104.

41. Кичко Ю. М., Загидуллин Н. З., Бычков Н. В. Исследование влияния импульсного магнитного поля на износостойкость быстрорежущих

сталей. *Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов* : межвузовский научный сборник. Уфа, 1986. С. 129–137.

42. Кінденко М. І. Підвищення експлуатаційних властивостей осьового інструменту шляхом імпульсної магнітної обробки та нанесення антифрикційних покриттів : автореф. дис канд. техн. наук : 05.03.01. Краматорськ, 1996. 18 с.

43. Клименко Г. П. Исследование условий обработки деталей тяжелого машиностроения. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. праць. Вип. 13. Краматорськ, 2003. С. 24–30.

44. Клименко Г. П., Мироненко Є. В., Гузенко В. С., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Експлуатація збірних різців : монографія для студентів спеціальностей 6.050503, 6.050502, 8.05050301, 8.05050302, 8.05050201 денної та заочної форми навчання. Краматорськ : ДДМА, 2015. 86 с.

45. Клименко Г. П. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Якість і надійність технологічних систем : навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, 2018. 204 с.

46. Клименко Г. П. Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Качество и надежность эксплуатации сборных твердосплавных инструментов. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Series: Techniques in a machine industry* : зб. наук. пр. № 34 (1310) 2018. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. С. 34–39.

47. Клименко Г. П. Основы рациональной эксплуатации резального инструмента на тяжелых верстаках : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01 К., 2002. 32 с.

48. Клименко Г. П. Основы рациональной эксплуатации режущего инструмента : учеб. пособие. Краматорск : ДДМА, 2006. 200 с.

49. Клушин М. И. Резание металлов. Горький : ГПИ, 1970. 101 с.

50. Ковалев В. Д., Васильченко Я. В., Клименко Г. П. Применение обработки импульсным магнитным полем для упрочнения деталей машин и

режущего инструмента. *Вестник двигателестроения*. Запорожье, 2004. № 4. С. 149–151.

51. Ковалев В. Д., Васильченко Я. В., Клименко Г. П. Применение обработки импульсным магнитным полем для упрочнения деталей машин и режущего инструмента. *Вестник двигателестроения*. 2004. № 4. С. 149–151.

52. Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В., Сукова Т. О. Методика визначення підвищення міцності твердосплавного різального інструменту для важких верстатів шляхом оброблення імпульсним магнітним полем. *Прогресивні технології у машинобудуванні* : збірник наукових праць VI-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Львів, 2017. С. 53.

53. Козлюк А. Ю., Овчаренко А. Г., Курепин М. О. Обоснование схемы комбинированной магнитно-импульсной обработки твердосплавного режущего инструмента. *Ползуновский вестник*, 2012. № 1. С. 131–134.

54. Комшина А. В., Помельникова А. С. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля. *Инженерное образование*. 2012. № 9. С. 463–488.

55. Конструкционные материалы : справочник / Б. Н. Арзамасов и др. М. : Машиностроение, 1990. 688с.

56. Крагельский И. В., Добрыгин М. Н., Камбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с.

57. Креймер Г. С. Прочность твердых сплавов. М. : Металлургия, 1971. 247 с.

58. Критерии затупления режущих инструментов. ГСПК ТБ «Оргприминструмент». М. : Изд-во стандартов, 1982. 124 с.

59. Куклин Л. Г. Влияние качества поверхности твердого сплава на его усталостную прочность. *Станки и инструмент*. 1968. № 3. С. 30–41.

60. Кулешова И. В. Тенденции экономии вольфрама в инструментальных материалах за рубежом. *Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент*. М. : НИИмаш, 1980. С. 21–26.

61. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / под ред. Рыкалина Н. Н. М. : Машиностроение, 1985. 306 с.
62. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М. : Машиностроение, 1982. 320 с.
63. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев : Наук. Думка. 1984. 328 с.
64. Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б., Рутковский А. В., Липинская Н. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений. *Проблемы прочности*. 2002. № 4. С. 119–125.
65. Майборода В. С., Ульяновко Н. В., Дюбнер Л. Г., Ивановський О. А. Застосування магнітно-абразивної обробки для зміцнення різального інструменту. *Вісник ЖДТУ*. 2003. № 3 (27). С. 22–31.
66. Макаров А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М. : Машиностроение, 1966. 96с.
67. Макаров А. Д. Некоторые вопросы влияния магнитного поля на стойкостные характеристики режущего инструмента. *Труды Уфимского политехнического института*. 1975. Вып. 77. С. 176–178.
68. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М. : Машиностроение, 1989. 112 с.
69. Малыгин Б. В., Бень А. П. Магнитное упрочнение изделий. (Теория и практика). Херсон: Из-во Херсонского Государственного морского института, 2009. 352 с.
70. Малыгин Б. В., Семерникова И. А. Магнитно-импульсное упрочнение деталей машин и инструмента. *Станки и инструмент*. 1982. № 6. С. 36–40.
71. Миркин Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазера. М. : МГУ, 1975. 383 с.
72. Мироненко Е. В. Исследование долговечности блочно-модульных резцов. *Прогрессивные технологии в машиностроении* : сб. трудов Международной научно-техн. конф. Донецк, 1997. С. 163–164.

73. Общемашиностроительные нормативы резания: Токарные и карусельные станки. Работы /Локтев А. Д. и др. М. : ВНИИТЗМР, 1985. 98с.

74. Овсепян Т. С. Повышение стойкости твердосплавного инструмента путем термической обработки в газовой среде. *Станки и инструменты*. 1980. № 5. С. 27–28.

75. Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю., Курепин М. О. Повышение износостойкости пластин из твердого сплава. *Обработка металлов*. 2010. № 2. С. 13–15.

76. Пешес Л. Я., Степанова М. Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. Минск : Наука и техника, 1972. С. 163.

77. Пивоваров М. Н., Золотарев Г. Р. Повышение стойкости твердосплавных пластин нанесением покрытий из карбида титана. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. Киев, 1975. Вып. 2. С. 191–192.

78. Писарев П. С., Гудимова Л. Н., Володин В. Л., Бурков П. С. Повышение стойкости инструмента при обработке гетерогенными плазменными пучками. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. Краматорск, 1991. Вып. 4. С. 153–154.

79. Платов А. Б. Методика и результаты испытаний на прочность при изгибе. В кн.: Твердые сплавы. М. : Metallургия, 1965. С. 184–197.

80. Платонов Г. Л., Аникеев А. И., Торопченко В. С. Повышение качества покрытия из карбида титана путем предварительной очистки газовых компонентов. *Станки и инструмент*. 1979. № 11. С. 27–28.

81. Повидайло В. А. Кармалюк В. И. Исследование влияния работы вибромашин на производительность процесса виброобработки изделий из твердого сплава. *Вибрационное шлифование, отделка и упрочнение* : сб. науч. тр. Ростов-на-Дону, 1969. С. 143–145.

82. Подураев В. Н., Диваев А. В. Повышение надежности твердосплавных инструментов лазерно-акустическим воздействием. *Физика и химия обработки материалов*, 1988. № 5. С. 121–126.

83. Полетаев В. А., Помельникова А. С., Шипко М. Н. Влияние обработки в импульсном магнитном поле и коротком разряде на прочность сталей. *МиТОМ*, 2000. №4. С. 34–37.

84. Постников С. Н. Магнитная обработка режущего инструмента и дальнейшее развитие этого метода. М. : ВДНХ. 1981. 32 с.

85. Постников С. Н. Некоторые физические аспекты магнитной обработки инструмента. *Вопросы электрофизики трения и обработки резанием* : тез. докл. Горьковского политехнического института, 1974. Вып. 4. С. 27–35.

86. Постников С. Н. Бородкин Ю. А. Магнитная обработка быстрорежущего инструмента. *Вопросы судостроения*. 1976. С. 14–17.

87. Постников С. Н. Перестройка дефектных комплексов в кристаллических твёрдых телах под действием магнитных полей допороговых энергий. Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем. *Всесоюзный межвузовский сборник*. Горький, 1980. 138 с.

88. Режимы резания металлов : справочник / под редакцией Ю. В. Барановского. М. : Машиностроение, 1972. 316 с.

89. Ремезов Д. Д. Влияние выбора баз на точность корпусов подшипников сельскохозяйственных машин. *Тракторы и сельхозмашины*, 1968. № 11.

90. Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Статична та втомна міцності твердих сплавів, оброблених імпульсним магнітним полем. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2013. С. 102.

91. Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Прискорені випробування різальних пластин при інтенсивному контактному навантаженні. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії* : зб. наук. пр. Краматорськ, 2018. № 1 (43). С. 181–187.

92. Рочек В. Н. Износостойкость покрытия твердосплавных многогранных пластин. *Станки и инструменты*. 1979. № 1. С. 29–30.
93. Руденко И. Л., Ормяк Н. В. Повышение износостойкости режущих инструментов и деталей машин. *Станки и инструменты*. 1988. №2. С. 28–29.
94. Рэди Д. Промышленные применения лазеров: пер. с англ. М. : Мир, 1981. 98 с.
95. Синопальников В. А. Зависимости процесса резания как случайные функции. *Станки и инструмент*. 1968. №7.
96. Снозик О. В. Підвищення зносостійкості твердосплавного інструменту методом іонного азотування : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Хмельницький, 1999. 24 с
97. Сорока О. Б., Родічев Ю. М., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. Прогнозування втомної міцності твердих сплавів, оброблених імпульсним магнітним полем. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. пр. Краматорськ, 2013. Вип. № 32. С. 317–324.
98. Сорока О. Б., Родічев Ю. М., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. Зміцнення твердосплавного різального інструменту для важкого машинобудування на основі поверхневої та об'ємної модифікації фізичними методами. *Вісник Тернопільського Національного технічного університету ім. І. Пулюя*. 2013. № 3 (71). С. 133–145.
99. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах / под ред. А. Г. Косиловой. М. : Машиностроение, 1985.
100. Степнов М. Н., Зинин А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. Москва : Инновационное машиностроение, 2016. 391 с.
101. Табаков В. П., Смирнов М. Ю., Циркин А. В., Чихранов А. В. Исследование механических свойств и напряженного состояния трехэлементных нитридных покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009. № 2. С. 32–35.

102. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки : монография / Н. А. Бондаренко и др.; под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2015. 368 с.

103. Топосенский П. А., Ермаков С. А. Повышение стойкости деталей машин и инструмента методом плазменно-дугового упрочнения. *Станки и инструменты*. 1990. № 11. С. 38–39.

104. Трощенко В. Т., Красовский А. Я., Покровский В. В., Сосновский Л. А., Стрижало В. А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению : справочное пособие / под ред. В. Т. Трощенко. Т. 2. Киев: Наукова думка, 1994. 701 с.

105. Умаров Э. А., Хасанов С. М., Анцупов А. И., Якунин Г. И. Влияние магнитных полей на износостойкость режущего инструмента. *Теория трения, износа и смазки*. Ташкент, 1975. Ч. 2. С. 117–118.

106. Упрочнение деталей лучом лазера / под ред. Коваленко В. С. Киев : Техника, 1984. 224 с.

107. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М. : Наука, 1971. 312 с.

108. Хаэт Г. Л. Прочность режущего инструмента. М. : Машиностроение, 1975. 168 с.

109. Хаэт Л. Г., Гах В. М. Механизм повышения надежности инструмента при виброабразивной обработке. *Надежность режущего инструмента* : сб. статей. Краматорск, 1991. Вып. 4. С. 142–148.

110. Хаэт Г. Л., Клименко Г. П. Исследование рациональной эксплуатации твердосплавного режущего инструмента. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем*. Краматорск : ДГМА, 2000. Вип. 10. С. 3–9.

111. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости / пер. с англ. под ред. И. Ф. Образцова. М. : Машиностроение, 1969. 504 с.

112. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М., Мир, 1973. 218 с.

113. Шаповалов М. В., Васильченко Я. В. Банк данных для выбора рациональной конструкции сборных резцов. *Теория и практика в машиностроении* : сборник научных трудов ЗАО ОНИКС. Ирбит, 2013. С. 159–162.

114. Шаповалов М. В., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. Вплив результатів виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів, зміцнених ОІМП на підвищення ефективності технологічного процесу різання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Харків, 2018. Вип. 4 (6). С. 84–92.

115. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М. : Машиностроение, 1972. 287 с.

116. Akincioğlu S., Uygur I., Gökkaya H. A review of cryogenic treatment on cutting tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, June 2015. Vol. 78. Issue 9–12. Pp. 1609–1627.

117. Alves S. Improvement of coating adhesion on cemented carbide tools by plasma etching. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39(3), 2016.

118. Asai S. Electromagnetic Processing of Materials Fluid. *Mechanics and Its Applications* 99. Springer Science C Business Media B.V. 2012. 176 p.

119. Bataineha O., Klameckia B., Koepek B. G. Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. Vol. 134. № 2. Pp. 190–196.

120. Bataineha O., Klameckia B., Koepek B. G. Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. Vol. 134. Issue 2. Pp.190–196.

121. Bilous O., Mahura B. Application of wear-resistant coating by electrospark alloying method using an eutectic electrode material. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 2018. Vol. 4. №. 1. Pp. 40–48.

122. Caliskan H., Panjan P., Kurbanoglu C. Hard Coatings on Cutting Tools and Surface Finish. *Comprehensive Materials Finishing*. Chapter: 3, Publisher: Oxford: Elsevier / Editors: M.S.J. Hashmi, 2017. Vol. 3. Pp. 230–242.
123. Castanho J. M., Vieira M. T. Effect of ductile layers in mechanical behaviour of TiAlN thin coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 20 December 2003. Vol. 143–144. Pp. 352–357.
124. Dehghani Sasan A., Amnieh K., Fadaei Tehrani A., Mohammadi A. Effects of magnetic assistance on improving tool wear resistance and cutting mechanisms during steel turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 15 August 2017. Vol. 384–385. Pp. 1–7.
125. Didyk R. P. Hard alloy metal regeneration in shock waves. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014. No. 6. Pp. 61–63.
126. El-Batahgy A-M., Ramadan R. A., Moussa A.-R. Laser Surface Hardening of Tool Steels – Experimental and Numerical Analysis. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2013. No. 3. Pp. 146–153.
127. Gerth J., Wear U. W. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. 2008. Vol. 264. № 9–10. Pp. 885–892.
128. Grum J. Comparison of different techniques of laser surface hardening. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007. Vol. 24. Issue 1. Pp. 17–25.
129. Huang Xinquan C. Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic field and pulsed current. *Materials Science and Engineering : A.*, 25 July 2011. V. 528. Issues 19–20. Pp. 6287–6292.
130. Jawad D. K., Surendra Rao R., Madhava Reddy D., Harshavardhan D. Machinability Studies of Selected Bearing Steels by Face Turning Operation. *International Journal of Research in Mechanical Engineering Technology*, November 2014 – April 2015. Vol. 5. Issue 1. Pp. 91–93.
131. Klamecki B. Residual stress reduction by pulsed magnetic treatment.

Journal of Materials Processing Technology, 1. November. 2003. V. 141. Issue 3. Pp. 385–394.

132. Klünsner T., Wurster S., Pippan R., Jenko M., Ebner R., Supancic P. Comparison of bending strength of WC-CO hard metal in millimeter and micrometer sized specimens. *Materials Center Leoben Forschung*. Austria, 2010. URL : <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/esis/ECF18/paper/viewFile/6057/1942>.

133. Kovalev V., Vasilchenko Y. Statistical researches of work of the enterprises of heavy mechanical engineering for a substation of technical characteristics of new machine tools. *11th International Conference RaDMI*. 2011 from 15–18 September 2011. Sokobanja (Serbia), 2011. Pp. 359–364.

134. Kursuncu B., Caliskan H., Yilmaz Guven S., Panjan P. Improvement of cutting performance of carbide cutting tools in milling of the Inconel 718 super alloy using multilayer nanocomposite hard coating and cryogenic heat treatment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. July. 2018. Vol. 97. Issue 1–4. Pp. 467–479.

135. Lalbondre R., Krishna P., Mohankumar G. C. Machinability Studies of Low Alloy Steels by Face Turning Method: An Experimental Investigation. *International Conference On DESIGN AND MANUFACTURING*. IconDM. 2013. Vol. 64. Pp. 632–641.

136. Ma L., Wang X., Liang Z., Liu Y., Zhang D. Machining mechanism in pulsed magnetic treatment for micro-tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. November. 2018. Pp. 1–16.

137. Ma L., Zhao W., Liang Z., Wang X., Xie L., Jiao L., Zhou T. An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 15 July. 2014. V. 609. Pp. 16–25.

138. Malshe A., Deshpande D. Nano and microscale surface and sub-surface modifications induced in optical materials by femtosecond laser machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 149, 2004. Pp. 585–590.

139. Narasimha M., Tewodros D., Rejikumar R. Improving Wear Resistance of Cutting Tool by coating. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. May. 2014. Vol. 04. Issue 05. Pp. 6–14.
140. Neves D., Diniz A. E., Fernandes de Lima M. S. Microstructural analyses and wear behavior of the cemented carbide tools after laser surface treatment and PVD coating. *Applied Surface Science*. 282. 2013. Pp. 680-688.
141. Nirmal S. Kalsi, Rakesh Sehgal, Vishal S. Cryogenic Treatment of Tool Materials: A Review. *Sharma Materials and Manufacturing Processes*. December. 2010. Vol. 25. Issue 10. Pp. 1077–1100.
142. Oskolkova T. N. Improving the Wear Resistance of Tungsten Carbide Hard Alloys. *Steel in Translation*. May. 2015. Vol. 45. Issue 5. Pp. 318–321.
143. Pal C. N., Pal D. K., Das Gupta M. C., J. Just. Influence of magnetic field on drill life in drilling cast iron. *Eng. (India). Mech. Engg. Div*, 1974. № 5. Pp. 241–246.
144. Pham D.T., Dimov S.S., Petkov P.V, Petkov S.P. Laser milling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Bd. 216. 2002. 5. Pp. 657–668.
145. Podchernyaeva I. A., Panasyuk A. D., Lavrenko V. A., Yuga A. I., Berezanskaya V. I. Effect of electrospark alloying a tungsten hard alloy on its wear and corrosion resistance. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. May 1999. Vol. 38. Issue 5–6. Pp. 250–253.
146. Quan S., Jiajie K., Zhiguo X., Haidou W., Yanfei H., Guozheng M., Haipeng L. Effect of pulsed magnetic field treatment on the residual stress of 20Cr2Ni4A steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 15 April. 2019. Vol. 476. Pp. 218–224.
147. Rizvi N. H., Apte P. Developments in laser micromachining techniques. *Journal of Materials Processing Technology*. 127, 2002. Pp. 206–210.
148. Roebuck B. Measuring WC grain size distribution. *Metal Powder Report*. April. 1999. Vol. 54. Issue 4. 1999, Pp. 20–24.

149. Roebuck B. The tensile strength of hardmetals. *Journal of Materials Science*. December. 1979. Vol. 14. Issue 12. Pp. 2837–2844.
150. Roebuck B., Gee M., Bennett E. G., Morrell R. Measurement Good Practice Guide No. 20. Mechanical Tests for Hardmetals. Centre for Materials Measurement and Technology National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom, TW11 0LW: Crown Copyright 2009. 78 p.
151. Salak A. New short time face turning method for testing the machinability of PM Steels. *Journal of Material Processing Technology*. 176. 2006. Pp. 62–69.
152. Shapovalov M. Kovalov V., Vasylichenko Y. Increase the productivity of hard-alloy tools for heavy machine tools by processing impulse magnetic field (Підвищення продуктивності твердосплавних інструментів для важких верстатів шляхом обробки імпульсним магнітним полем). *Вісник ТНТУ*. Тернопіль, 2018. № 3 (50). С. 52–59.
153. Shreyas T. Dhande, Vijay A. Kane, Chandrashekhar L. Gogte. Cryogenic Treatment of Tungsten Carbide Tools: Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. November. 2014. Vol. 3. Issue 11. Pp. 3151–3155.
154. Soroka O., Rodichev I., Shabetia O., Kovalov V., Vasilchenko Y., Shapovalov M. Strength of tool materials. Modern trends in material processing : collective monograph / Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja, 2018. Pp. 185–217.
155. Stuivinga M., Carton. E.P. Shock wave fabricated ceramic composite materials. *HJ. Verbeek 9th CIMTEC, World Ceramics Congress & Forum on New Materials*. June. 1998. Florence, Italy. 10 p.
156. Tadahiro Wada. Cutting Performance of (Ti, W, Si) N Coated Cemented Carbide Tool. *Proceedings of The 43rd Symposium on Powder Science and Technology*. November 2–4. 2005. Busan, Korea. Pp. 75–79.
157. Vereshchaka A. S., Vereshchaka A. A. Increasing tool effectiveness by regulating the composition, structure, and properties of the coatings. *Uprochn. Tekhnol. Pokryt.* 2005. No. 9. Pp. 9–18.

158. Vilar R., Colaco R., Almeida A. Laser surface treatment of tool steels. *Optical and Quantum Electronics*. 1995. No. 27. Pp. 1273–1289.
159. Vosough M., Schultheiss F., Agmell M., Ståhl J.-E. A method for identification of geometrical tool changes during machining of titanium alloy Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. July. 2013. Vol. 67. Issue 1–4. Pp. 339–348.
160. Weber H. АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ. *Fertigungstechn und bert*. №4. 1975.
161. Wu J., Zou Y., Sugiyama H. Study on finishing characteristics of magnetic abrasive finishing process using low-frequency alternating magnetic field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. July. 2016. Vol. 85. Issue 1–4. Pp. 585–594.
162. Zhang P., Kimchi M., Shao H., Gould J. E., Daehn G. S. Analysis of the Electromagnetic Impulse Joining Process with a Field Concentrator. *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications NUMIFORM 2004* : Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. 13–17 June, 2004. Columbus, OH / Edited by Somnath Ghosh, Jose C. Castro and June K. Lee. AIP Conference Proceedings. New York , 2004. Vol. 712. Pp.1253–1258.

ДОДАТОК А
Результати виробничих випробувань різців

Таблиця А.1 – Результати виробничих випробувань різців, які оснащені пластинами твердого сплаву ВК8 (партія 1)

Наявність зміцнення	Номер грані пластини	Середня зносоустійкість \bar{T} , хв.	Коефіцієнт зміни стійкості $\frac{T_{\text{оімп}}}{T_{\text{вих}}}$	Гамма процентна стійкість T_{γ} , хв.	Коефіцієнт зміни гамма процентної стійкості $\frac{T_{\gamma\text{оімп}}}{T_{\gamma\text{вих}}}$	Коефіцієнт варіації стійкості K_T	Коефіцієнт зміни варіації стійкості $\frac{K_{T_{\text{вих}}}}{K_{T_{\text{оімп}}}}$
без зміцнення	1	34		16		0,25	
	2	39		17		0,32	
	3	35		20		0,27	
		$T_{\text{сер}} = 36$		$T_{\text{усер}} = 17,7$		$K_{T_{\text{сер}}} = 0,28$	
ОІМП	1	46		28		0,17	
	2	48		31		0,22	
	3	47		32		0,24	
		$T_{\text{сер}} = 47$	1,3	$T_{\text{усер}} = 30,3$	1,7	$K_{T_{\text{сер}}} = 0,21$	1,3

Таблиця А.2 – Результати виробничих випробувань різців, які оснащені пластинами твердого сплаву (партії 2, 3, 4)

Номер партії інструментів	Наявність зміцнення	Середня стійкість T , хв.	Коефіцієнт зміни стійкості $\frac{T_{\text{оімп}}}{T_{\text{вих}}}$	Гамма процентна стійкість T_{γ} , хв	Коефіцієнт зміни гамма процентної стійкості $\frac{T_{\gamma\text{оімп}}}{T_{\gamma\text{вих}}}$	Коефіцієнт варіації стійкості K_T	Коефіцієнт зміни варіації стійкості $\frac{K_{T_{\text{вих}}}}{K_{T_{\text{оімп}}}}$
2	без ОІМП	200		150		0,28	
	ОІМП	380	1,9	250	1,7	0,09	3,1
3	без ОІМП	800		190		0,21	
	ОІМП	1205	1,5	350	1,8	0,13	1,6
4	без ОІМП	400		180		0,31	
	ОІМП	740	1,8	280	1,6	0,17	1,8

Таблиця А.3 – Результати виробничих випробувань різців, які оснащені пластинами твердого сплаву (партія 5, 6)

Номер партії інструментів	Наявність зміцнення	Середня стійкість T , хв.	Коефіцієнт зміни стійкості $\frac{T_{\text{оімп}}}{T_{\text{вих}}}$	Гамма процентна стійкість T_{γ} , хв.	Коефіцієнт зміни гамма процентної стійкості $\frac{T_{\gamma\text{оімп}}}{T_{\gamma\text{вих}}}$	Коефіцієнт варіації стійкості K_T	Коефіцієнт зміни варіації стійкості $\frac{K_{T_{\text{вих}}}}{K_{T_{\text{оімп}}}}$
5	без ОІМП	67,2		21,2		0,2	
	ОІМП	79,8	1,2	38,4	1,8	0,15	1,3
6	без ОІМП	4,8		1,8		0,1	
	ОІМП	5,2	1,08	2,0	1,1	0,1	1

Таблиця А.4 – Результати виробничих випробувань твёрдосплавних напайних різців, які оснащені пластинами твёрдого сплаву Т5К10 (партія 7)

Наявність зміцнення	Період стійкості	Частота імпульсів f , Гц	Середня стійкість T , хв.	Коефіцієнт зміни стійкості $\frac{T_{\text{оімп}}}{T_{\text{вих}}}$	Гамма процентна стійкість T_{γ} , хв.	Коефіцієнт зміни гамма процентної стійкості $\frac{T_{\gamma\text{оімп}}}{T_{\gamma\text{вих}}}$	Розподіл відмов інструментів, у відсотках %		
							зношування	викришування	несправність
без ОІМП			120		86		32	64	4
ОІМП	1	8	246	2,05	240	2,8	74	24	2
	2	7	218	1,82	190	2,2	72	26	2
	3	6	209	1,74	184	2,14	67	30	3
	4	5	192	1,6	178	2,07	62	34	4
	5	3	160	1,3	140	1,6	54	42	4

Додаток Б
ФОП Алексашов Д.Ю.

ПН 3296801076
Україна,
Донецька обл., м. Краматорськ
вул. Ульянівська, б.196 інд. 84320

р/р 2600919035
в ПАТ «ПУМБ»
МФО 334851
СДРПОУ 3296801076



ЗАТВЕРДЖУЮ:
Директор
Алексашов Д.Ю.
2018 р.

Акт
виробничих випробувань різців з пластинами
після обробки імпульсним магнітним полем (ОІМП)

У виробничих умовах цеху ФОП Алексашов Д.Ю. проводилися порівняльні випробування різців, які пройшли обробку імпульсним магнітним полем (ОІМП), при обробці деталей з сірого спеціального чавуну К1 та з високоміцного спеціального чавуну з шаривидним графітом К4.

Режими різання: швидкість різання $V = 58.9 \text{ } 43.2 \text{ м / хв.}$
подача $S = 0,2 \text{ мм / об.}$
глибина різання $t = 0,5 \text{ } 0,8 \text{ мм.}$

Деталь: кільце поршневе $D = 110-150 \text{ мм, } t = 3-6 \text{ мм,}$ загальна кількість деталей в пакеті – 54шт. Оброблювана поверхня – ливарна кірка. Операція – розточування-обточування по копіру.

Результати випробувань показали, що різцями після ОІМП було оброблено 23-25 пакетів (1242-1350 деталей) з сірого чавуну, що на 64% більше ніж звичайними різцями і 6-8 пакетів (324-432 деталі) з високоміцного чавуну, що на 50 % більше.

Слід зазначити, що після переточування стійкість різців, які пройшли ОІМП, при обробці високоміцного чавуну підвищилася на 15-20%, що склало 7-9 пакетів деталей.

На підставі проведених випробувань можна зробити висновок, що стійкість інструментів після ОІМП підвищується при обробці сірого чавуну в 1,5-2 рази, при обробці високоміцного чавуну в 1,5 рази.

Головний технолог

А.В. Сезоненко

З повагою,
Алексашов Дмитро Юрійович



тел. +380 (66) 095-87-53
Email: alexashov1990@gmail.com

ФОП Алексашов Д.Ю.

ІПН 3296801076
Україна,
Донецька обл., м. Краматорськ
вул. Ульянівська, б.196 інд. 84320

р/р 2600919035
в ПАТ «ПУМБ»
МФО 334851
ЄДРПОУ 3296801076



ЗАТВЕРДЖУЮ:
Директор
Алексашов Д.Ю.
2018 р.

**Акт
виробничих випробувань твердосплавних пластин
після обробки імпульсним магнітним полем (ОІМП)**

У листопаді 2018 року в цеху ФОП Алексашов Д.Ю. проводилися виробничі випробування різців, оснащеними пластинами з твердого сплаву ВК6 після ОІМП, при наступних режимах:

- швидкість різання 42 м / хв,
- подача 0,15 мм / об,
- глибина різання 1 мм.

Результати випробувань показали, що стійкість різців, які пройшли ОІМП, підвищилася у 2 рази. При цьому після кожної з п'яти переточувань ефект ОІМП зберігався.

Головний технолог

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "A.V. Sezonenko".

А.В. Сезоненко

З повагою,
Алексашов Дмитро Юрійович



Додаток В

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
 Ново-краматорський
 машинобудівний
 завод



JOINT-STOCK COMPANY
 NOVO-KRAMATORSKY
 MASHINOSTROITELNY
 ZAVOD

НКМЗ, м. Краматорськ, Донецька область, 84305, УКРАЇНА
 Phone: +38 (06264) 7-80-49, fax: +38 (06264) 7-30-60

NKMZ, Kramatorsk city, Donetsk region, 84305, UKRAINE
 E-mail: vtf@nkmz.donets.ua, http://www.NKMZ.com



ПІДТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор
 ЗАТ "Новокраматорський
 машинобудівний завод"

Г.С. Суков

« _____ » _____ 2010 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво

Даний акт підтверджує, що на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи Шаповалова Максима Валерійовича в ЗАТ "Новокраматорський машинобудівний завод" впроваджено з економічним ефектом 78200 грн. технологію зміцнення різальних інструментів та деталей машин методом обробки імпульсним магнітним полем, нормативи режимів різання для важких верстатів.

Головний інженер
 ЗАТ "Новокраматорський
 машинобудівний завод"

О.І. Волошин

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ПрАТ «КЗВВ»

Загудаєв В.В.

2019 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Шаповалова М.В. на тему «Зміцнення твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем для обробки виробів важкого машинобудування»

Згідно програми робіт по підвищенню ефективності обробки деталей були проведені дослідження верстатного обладнання, роботи твердосплавного різального інструмента та процесу різання на важких верстатах.

За результатами досліджень здійснено:

- Встановлені причини відмов інструменту на важких верстатах;
- Визначені типи граничного зносу і руйнування, особливості пошкодження матеріалу в різних частинах робочих поверхонь леза;
- Виробничі випробування, при яких стійкість змінних багатограних неперезагострювальних різальних пластин при обробці вальцювальних валків підвищується в 2,5 рази у порівнянні з інструментом без зміцнення;
- Розроблені заходи щодо підвищення працездатності різального інструмента;
- Визначені шляхи підвищення працездатності різального інструмента;
- Показано значний вплив на міцність і руйнування досліджених твердосплавних пластин дефектів структури поверхневого шару. Рекомендовано враховувати результати оцінки параметрів поверхневого дефектного шару при заточуванні інструменту з напаяними різальними пластинами.

Даний акт підтверджує, що на основі теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи Шаповалова М.В. на тему «Зміцнення твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем для обробки виробів важкого машинобудування» на підприємстві впроваджено технологію зміцнення та результати впливу режимів обробки твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем (ОІМП) при механічному обробленні металевих виробів на важких верстатах.

Головний конструктор
ПрАТ «КЗВВ»

Палашек О.Г.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор,
проректор з науково-педагогічної,
навчальної та методичної роботи ДДМА
к.т.н., проф. Фесенко А.М.

« » 2018 р.

АКТ

на впровадження результатів дисертаційної роботи Шаповалова Максима Валерійовича на тему: «Зміцнення твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем для обробки виробів важкого машинобудування» в навчальному процесі.

Ми, що нижче підписалися, д.т.н., доцент, завідувач кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» ДДМА Васильченко Яна Василівна, к.т.н., доцент кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» ДДМА Калініченко Владимир Васильович, склали даний акт про використання в навчальному процесі в дисциплінах «Теорія різання», «Різальний інструмент та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем», «Високі технології в машинобудуванні» результатів дисертаційної роботи «Зміцнення твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем для обробки виробів важкого машинобудування», а саме:

– в дисципліні «Теорія різання» для спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» – результати досліджень впливу обробки імпульсним магнітним полем різальних пластин на стійкість та стабільність стійкісних характеристик різальних інструментів і на характеристики процесу різання;

– в дисципліні «Різальний інструмент та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва» для спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» – результати експериментальних досліджень впливу режимів обробки імпульсним магнітним полем різальних пластин на структуру твердого сплаву, інтенсивність зношування та стійкість різальних інструментів, характеристики процесу різання, стабільність характеристик стійкості різців з різальними пластинами з твердих сплавів груп ТК, ТТК, ВК;

– в курсі «Моделювання та оптимізація технологічних систем» для спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» – методика та результати моделювання впливу обробки імпульсним магнітним полем на структуру твердого сплаву;

– в курсі «Високі технології в машинобудуванні» для спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» – рекомендації з використання обробки імпульсним магнітним полем різальних пластин з твердих сплавів.

Отримані результати також використані у низці магістерських робіт.

Завідувач кафедри КМСІТ ДДМА,
д.т.н., доцент

Я. В. Васильченко

Доцент кафедри КМСІТ ДДМА,
к.т.н., доцент

В. В. Калініченко