МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шамрай Віталій Борисович

УДК 629.017.629.083

ДИСЕРТАЦІЯ
ПОЛІПШЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Віталій Шамрай

Науковий керівник: Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук, професор

Київ -2025

АНОТАЦІЯ

Шамрай В.Б. Поліпшення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, 2025.

Дисертаційна робота направлена на вирішення науково-технічної задачі підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування, В дисертації досліджено напружено-деформований стан, фізико-механічні і триботехнічні властивості поверхонь деталей з композиційними покриттями та визначено характеристики покритттів.

Мета роботи полягає в експериментальних та теоретичних дослідженнях процесу підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування.

У вступі представлені актуальність, мета та задачі дисертаційної роботи, що була виконана, її наукова новизна та практичне значення, описані методи дослідження.

У першому розділі за результатами проведеного аналізу умов експлуатації сільськогосподарських машин і основних факторів, що визначають вид зношування їх робочих органів і деталей встановлено, що довговічність сільськогосподарських машин знаходиться в прямій залежності від здатності протистояти їх робочих органів і деталей абразивному та корозійно-механічному руйнуванню.

Узагальнення результатів проведених досліджень по дефектації деталей сільськогосподарських машин дозволило зробити висновок, що перспективним шляхом підвищення триботехнічних властивостей їх деталей є використання зміцнюючих захисних покриттів і створення композиційних структур із мінімальним зносом.

Шляхом аналізу літературних джерел доведено, що нанесення покриттів із композиційних матеріалів є найбільш раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин.

Багаточисельними дослідження показали, що найбільший вплив на властивості композиційних покриттів і відповідно зміцнюємих і відновлюємих робочих поверхонь деталей та робочих органів сільськогосподарських машин чинить склад композиційного покриття та спосіб його формування. Вибір способу формування композиційного покриття визначається умовами експлуатації сільськогосподарських машин, конструкцією деталі або робочого органу, їх матеріалом, складом композиційного покриття та його економічною доцільністю.

Виконаний літературний огляд способів зміцнення та відновлення композиційними покриттями дозволив сформулювати основні вимоги до технологічного процесу їх нанесення, яким відповідає метод електроіскрового легування.

Аналіз літературних джерел дозволив сформулювати мету дисертаційної роботи і задачи, вирішення яких дозволить досягти поставленної мети.

У другому розділі представлена загальна схема досліджень у вигляді сукупності методів і методик теоретичних і експериментальних досліджень напружено-деформованого стану, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь деталей з композиційними покриттями.

Для створення покриттів запропонований склад композиційних матеріалів, метод і обладнання для їх нанесення. Для створення композиційних покриттів використовували установку "Елітрон-22" для електроіскрового легування. В якості матеріалу композиційних покриттів використовували карбід вольфраму ВК8 (WC – 8%Co), композиційний матеріал КХН-25 (системи Cr-Ni-C) і сплав Х20Н80 (Ni-Cr 80/20).

Для дослідження мікроструктури покриттів, отриманих методом ЕІЛ використовували фізичні методи досліджень: оптичну металографію, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналіз.

Для моделювання напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями використовували метод скінчених елементів. Триботехнічні характеристики досліджували на установці 2070 СМТ-1 та установці на абразивне зношування в середовищі абразивних частинок.

Оцінку точності експериментальних результатів, які містять систематичні і випадкові помилки, проводили за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики.

У третьому розділі наведено результати оцінки напружено-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування, що дозволило вибрати оптимальний варіант конструкції поверхні, режими процесу нанесення покриття та склад композиційного матеріалу. Встановлено, що максимальне зниження дотичних та еквівалентних напружень несуцільних електроіскрових покриттів проявляється для суцільності покриття 60…80 %, в порівнянні з покриттями, що нанесені суцільним шаром. Обгрунтовано і доведено, що шляхом зміни суцільності та товщини покриття можливо мінімізувати його напружено-деформований стан.

Дискретний характер методу електроіскрового легування дозволив при нанесенні композиційних покриттів із твердих сплавів вирішити основне протиріччя - подолати їх крихкість, і тим самим забезпечити обмежене зростання напружень, що виключає когезійне розтріскування та адгезійне відшарування покриття і багаторазово підвищує міцність і довговічність зміцнюємих поверхонь.

Четвертий розділ присвячений дослідженню та встановленню впливу режимів ЕІЛ (параметрів імпульсного розряду, тривалості обробки, матеріалів електродів, робочого струму) на мікротвердість, триботехнічні властивості, товщину і суцільність покриттів. При проведенні досліджень встановлено вплив величини робочого струму

ЕІЛ на його товщину та суцільність, співвідношення розмірів суцільності покриття до його товщини, що визначає експлуатаційну надійність зміцнюємих поверхонь деталей, підвищує триботехнічні властивості зміцненого поверхневого шару в 2-3 рази. Показано, що змінюючи частоту імпульсів і швидкість відносного переміщення анода і катода можна регулювати суцільність покриття. Встановлено залежність товщини покриття від енергії імпульсів струму і визначено, що чим менша енергія імпульсів струму, тим менша товщина сформованого шару покриття. Визначена залежність мікротврдості покриттів від енергії розряду. Досліджено триботехні характеристики покриттів і їх залежність від товщини і суцільності покриття.

Результати досліджень використовували при підвищенні триботехнічних властивостей та терміну служби деталей сільскогосподарських машин шляхом нанесення композиційних покриттів методом електроіскрового легування на прикладі зміцнення ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну і валу муфти зчеплення трактора.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

– встановлено підвищення зносостійкості та антифрикційних властивостей несуцільних електроіскрових композиційних покриттів внаслідок збільшення частки компоненту матриці (нікелю) в структурі композиційного матеріалу, що забезпечує ефективний розподіл контактного навантаження на локальних ділянках та високу демпфуючу здатність в приповерхневих шарах контактних поверхонь;

– визначено закономірності зменшення зносу несуцільних електроіскрових композиційних покриттів в абразивному середовищі, які полягають в зменшенні інтенсивності механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті за рахунок формування покриттів з високою мікротвердістю та зниженні дотичного опору зсуву при втіленні твердої абразивної частки залежно від типу матриці композиційних матеріалів;

– на основі аналізу НДС доведено, що максимальне зниження дотичних та еквівалентних напружень несуцільних електроіскрових покриттів проявляється для суцільності покриття 60…80 %; максимальні еквівалентні напруження формуються в покритті, що знижує напружено-деформований стан основи; оптимальне співвідношення товщини та суцільності покриттів дає можливість мінімізувати їх когезійне розтріскування та адгезійне відшарування.

Удосконалено:

– методику оцінки напружено-деформованого стану деталей сільскогосподарських машин із композиційними електроіскровими покриттями та визначення їх оптимальних параметрів шляхом побудови скінченно-елементної моделі поверхні деталі з композиційним покриттям із розподілом еквівалентних напружень по Мізесу.

Отримало подальший розвиток:

– дослідження триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин шляхом нанесення електроіскрових композиційних покриттів із оптимальними значеннями їх товщини та суцільності.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Дослідно-експериментальні та експлуатаційні випробування ножів із ЕІП покриттям довели, що за рахунок підвищення зносостійкості ножів збільшилась ефективність подрібнення зернових культур. Експлуатаційні випробування відновлених деталей валів муфти зчеплення та розподільного валу трактора композиційними покриттями показали підвищення їх триботехнічних властивостей та строку експлуатації в 2…2,5 рази, що представляє практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств (акт про використання результатів наукових досліджень від 05.10.2024 року, «Агробудавтосервис» (м. Кропивницький).

2. Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес: у процесі підготовки курсів лекцій та практичних занять з дисциплін «Інженерія поверхні» та «Технології конструкційних матеріалів» розглянуто сучасні порошкові

зносостійкі композиційні матеріали та метод електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; результати роботи використано при підготовці тем кваліфікаційних робіт (акт про впровадження в навчальний процес ДУ «КАІ» від 07.03.2025 року).

Ключові слова: електроіскрове легування, композиційні покриття, триботехнічні властивості, мікротвердість, напружено-деформований стан, зносостійкість, абразивне зношування, деталі сільськогосподарських машин, експлуатаційні властивості.

SUMMARY

Shamrai V.B - Improving the tribotechnical properties of agricultural machinery parts by forming composite coatings. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for the scientific degree of the doctor of philosophy, the field of study 13 – Mechanical engineering, program subject area 131 – Applied Mechanics. - State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv. 2025.

The dissertation is aimed at solving the scientific and technical problem of increasing the tribotechnical properties of agricultural machinery parts by forming composite coatings by the method of electrospark alloying. The dissertation is devoted to the study of the stress-strain state, physical-mechanical, tribotechnical and operational properties of the surfaces of parts with composite coatings and determining the parameters and characteristics of the coatings.

The purpose of the work is to conduct experimental and theoretical studies of the process of increasing the tribotechnical properties of agricultural machinery parts by forming composite coatings by the method of electrospark alloying.

The introduction presents the relevance, purpose and objectives of the dissertation work that was performed, its scientific novelty and practical significance, and describes the research methods.

In the first chapter, based on the results of the analysis of the operating conditions of agricultural machines and the main factors that determine the type of wear of their working bodies and parts, it was established that the durability of agricultural machines is directly dependent on the ability of their working bodies and parts to resist abrasive and corrosion-mechanical destruction.

The generalization of the results of the studies on the defect detection of agricultural machine parts allowed us to conclude that a promising way to improve the tribotechnical properties of their parts is the use of strengthening protective coatings and the creation of composite structures with minimal wear.

By analyzing the literature, it was proven that the application of coatings from composite materials is the most rational and economically feasible solution to the problem of improving the tribotechnical properties of agricultural machine parts.

Numerous studies have shown that the greatest influence on the properties of composite coatings and, accordingly, the strengthened and restored working surfaces of parts and working bodies of agricultural machines is exerted by the composition of the composite coating and the method of its formation. The choice of the method of forming a composite coating is determined by the operating conditions of agricultural machines, the design of the part or working body, their material, the composition of the composite coating and its economic feasibility.

The completed literature review of methods of strengthening and restoration with composite coatings made it possible to formulate the main requirements for the technological process of their application, which the method of electrospark alloying corresponds to.

Analysis of literary sources made it possible to formulate the goal of the dissertation work and the tasks, the solution of which will allow achieving the set goal.

The second chapter presents a general scheme of research in the form of a set of methods and techniques of theoretical and experimental studies of the stress-strain state, physical-mechanical and operational properties of the surfaces of parts with composite coatings.

To create coatings, the composition of composite materials, the method and equipment for their application are proposed. To create composite coatings, the "Elitron-22" installation for electrospark alloying was used. As a material for composite coatings, tungsten carbide VK8 (WC - 8%Co), composite material KHN-25 (Cr-Ni-C system) and alloy X20N80 (Ni-Cr 80/20) were used.

To study the microstructure of coatings obtained by the EIL method, physical research methods were used: optical metallography, X-ray structural and micro-X-ray spectral analysis.

To model the stress-strain state of the surfaces of parts with composite coatings, the finite element method was used. Tribotechnical characteristics were studied on the 2070 SMT-1 machine. Abrasive wear tests of coatings were carried out on a special installation for bench tests of parts and experimental samples in an environment of abrasive particles.

The accuracy of the experimental results, which contain systematic and random errors, was assessed using the methods of probability theory and mathematical statistics.

The third chapter presents the results of the assessment of the stress-strain state of surfaces with composite coatings formed by the electrospark alloying method, which made it possible to choose the optimal variant of the surface design, the coating application process modes and the composition of the composite material. It has been established that the maximum reduction in tangential and equivalent stresses of discontinuous electric spark coatings occurs for a coating continuity of 60…80%, compared to coatings applied in a continuous layer. It is substantiated and proven that by changing the continuity and thickness of the coating it is possible to minimize its stress-strain state.

The discrete nature of the electrospark alloying method allowed to solve the main contradiction when applying composite coatings from hard alloys - to overcome their fragility, and thereby ensure a limited increase in stresses, which eliminates cohesive cracking and adhesive delamination of the coating and many times increases the strength and durability of the surfaces being strengthened.

The fourth chapter is devoted to the study and establishment of the influence of EIL modes (pulse discharge parameters, treatment duration, electrode materials, working current) on the microhardness, tribotechnical properties, thickness and continuity of coatings. During the research, the influence of the EIL working current on the depth of penetration of the coating into the strengthening surface, its thickness and continuity, the ratio of the dimensions of the coating continuity to its thickness, which determines the operational reliability of the strengthened surfaces of parts, increases the tribotechnical properties of the strengthened surface layer by 2-3 times. It is shown that by changing the pulse frequency and the speed of relative movement of the anode and cathode, it is possible to regulate the continuity of the

coating. The dependence of the coating thickness on the energy of current pulses has been established and it has been determined that the lower the energy of the current pulses, the smaller the thickness of the formed coating layer. The dependence of the microhardness of coatings on the discharge energy has been determined. The tribotechnical characteristics of coatings and the influence of coating thickness and continuity on them were investigated.

The results of the research will be used to improve the tribotechnical properties and service life of agricultural machinery parts by applying composite coatings using the electrospark alloying method, using the example of strengthening the knives of the chopping drum of a forage harvester and the clutch shaft of a tractor.

The results of the research will be used to improve the tribotechnical properties and service life of agricultural machinery parts by applying composite coatings using the electrospark alloying method, using the example of strengthening the knives of the chopping drum of a forage harvester and the clutch shaft of a tractor.

Scientific novelty of the obtained results.

For the first time:

– an increase in wear resistance and antifriction properties of non-continuous electrospark composite coatings was established due to an increase in the proportion of the matrix component (nickel) in the structure of the composite material, which ensures effective distribution of the contact load in local areas and high damping capacity in the near-surface layers of contact surfaces;

– a mechanism for reducing wear of discontinuous electrospark composite coatings in an abrasive environment has been determined, which consists in reducing the intensity of mechanical-destructive processes in the surface layers of the metal during friction due to the formation of coatings with high microhardness, the implementation of a positive gradient of mechanical properties along the depth of the coating-base, and the selection of a matrix of composite materials to reduce the tangential shear resistance when incorporating a solid abrasive particle;

– based on the analysis of the NDS, it was proven that the maximum reduction in tangential and equivalent stresses of discontinuous electric spark coatings occurs for a coating continuity of 60…80%; maximum equivalent stresses are formed in the coating, which reduces the stress-strain state of the base; the optimal ratio of the thickness and continuity of the coatings makes it possible to minimize their cohesive cracking and adhesive delamination.

Improved:

– a method for assessing the stress-strain state of parts of agricultural machinery with composite electric spark coatings and determining their optimal parameters by constructing a finite element model of the surface of a part with a composite coating with a Mises equivalent stress distribution.

Further development:

– research into the tribotechnical properties of agricultural machinery parts by applying electrospark composite coatings with optimal values of their thickness and continuity.

Practical significance of the results obtained.

1. Experimental and operational tests of knives with EIP coating proved that due to the increase in the wear resistance of the knives, the efficiency of grinding grain crops increased. Operational tests of restored parts of the clutch shafts and the tractor camshaft with composite coatings showed an increase in their tribotechnical properties and service life by 2...2.5 times, which is of practical interest for agricultural enterprises (act on the use of scientific research results dated 05.10.2024, “Agrobudavtoservis” (Kropivnitsky).

2. The results of the dissertation research were implemented into the educational process: in the process of preparing courses of lectures and practical classes in the disciplines "Surface Engineering" and "Technology of Structural Materials", modern powder wear-resistant composite materials and the method of electrospark alloying for strengthening contact surfaces were considered; the results of the work were used in the preparation of topics for qualification works (act on the introduction into the educational process of the State Educational Institution "KAI" dated 07.03.2025).

Keywords: electric-spark alloying, composite coatings, tribotechnical properties, microhardness, stress-strain state, wear resistance, abrasive wear, parts of agricultural machinery, operational properties.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

У фахових виданнях:

1. Мікосянчик О.О., Шамрай В.Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. 4 (97). С. 44-49. https://doi.org/10.18372/0370-2197.4 (97).16958

2. Шамрай В.Б., Мікосянчик О.О., Лопата Л.А., Голембієвський Г.Г., Горб Є.С. Композиційні матеріали для зносостійких покриттів деталей сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 1(98). С. 4-13. https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17356

3. Шамрай В.Б., Мікосянчик О.О., Забойкіна Н.П. Зміцнення та підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин композиційними покриттями дискретної структури. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 4 (101). С. 60 - 72. https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18080

4. Шамрай В.Б., Калініченко В.І. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки покриттями дискретної структури. Технологічне забезпечення покриттів дискретної структури електроіскровим легуванням. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. 2 (103). С. 146-157. https://doi.org/10.18372/0370-2197.2 (103).18697

5. Шамрай В.Б. Оцінка напруженно-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 1 (106). С. 87-97. https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(106).19836

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Мікосянчик О.О., Шамрай В.Б., Кулижський В.М., Бурлаченко О.М., Лопата В.Н. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика:* матеріали 21-ї Міжнародної науково-практичної конференції (06–10 вересня 2021 р., м. Одеса). 2023. Київ, АТМ України. С. 53-55. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb3-21s.pdf

7. Мікосянчик О.А., Шамрай В.Б., Дудан О.В., Філоненко Д.В., Каліні-ченко В.І., Кобзарь В.Л. Підвищення ефективності дроблення зерна шляхом використання ріжучих елементів робочих органів із зносостійкими покриттями дискретної структури. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем* (13-15 квітня, 2022 р., ЦНТУ, м. Кропивницький)*: м*атеріали IV–ії Міжнародної науково-практичної конференції (19-20 травня 2022 року, ЦНТУ, м. Кропивницький). Кропивницький: 2022. С. 59-64.
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/programa_konf._pnmo-2022_1.pdf

8. Шамрай В.Б., Калініченко В.І., Лопата Л.А. Розробка технології відновлення та зміцнення кільцевої канавки алюмінієвого поршня ДВЗ дискретними покриттями. *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті:* Матеріали 23-го Міжнародного науково-технічного семінару (15–16 березня 2023 р., Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ). Київ, АТМ України, 2023. С. 123-125. ttps://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-23.pdf

9. Мікосянчик О.А., Шамрай В.Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільскогосподарської техніки композиційними покриттями. Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали 25-го Міжнародного науково-технічного семінару (25–26 березня 2025 р., Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ). Київ, АТМ України, 2025. С. 118-121.

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ	27
1.1. Умови експлуатації та основні причини втрати працездатності робочих органів і деталей сільськогосподарських машин, їх несправності, дефекти та особливості зношування	27
1.2.Основні напрямки підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин	35
1.3. Матеріали для зносостійких покриттів. Композиційні матеріали	38
1.4. Вибір способу формування композиційних покриттів	44
1.5. Формування композиційних покритті методом електроіскрового легування. Характеристика процесу, його переваги та особливості	47
Висновки до першому розділу. Мета і задачі дослідження	52
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА СХЕМА, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	55
2.1. Загальна схема досліджень	55
2.2. Обладнання для створення композиційних покриттів. Характеристика установки та інструменту для електроіскрового легування	57
2.3. Вибір матеріалів покриттів для досліджень	61
2.4. Дослідження мікроструктури, визначення хімічного складу покриттів і розподілу елементів. Методи рентгеноспектрального мікроаналізу і скануючої електронної мікроскопії	65
2.5. Визначення мікротвердості та твердості зміцнених поверхонь	66
2.6. Оцінка напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями	68
2.7. Дослідження триботехнічних характеристик деталей з покриттями	71
2.8. Методика обробки результатів експериментальних досліджень	74
Висновки до розділу 2	75
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА НАПРУЖЕННО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОВЕРХОНЬ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ, СФОРМОВАНИМИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ	77
3.1. Характеристика та аналіз напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями	77
3.2. Визначення товщини і суцільності електроіскрових композиційних покриттів із умови мінімізації рівня напружено-деформованого стану	81
3.3. Розрахунково-експериментальні дослідження впливу поверхонь ножів подрібнюючого барабану з електроіскровими покриттями на ефективність подрібнення зернової сировини	92
Висновки до розділу 3	97

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ З КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ 100
4.1. Фізичний аспект створення композиційних покриттів методом електроіскрового легування 100
4.2. Визначення впливу режимів процесу електроіскрового легування на параметри і властивості покриттів 103
4.3. Дослідження триботехнічних характеристик композиційних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування 113
4.4. Використання композиційних покриттів для підвищення триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин (на прикладі ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну і валу муфти зчеплення трактора) 119
Висновки до розділу 4 126
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ 128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 130
ДОДАТКИ 162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГТН – газотермічне пилення

ГІС - генератор імпульсів струму

ДВЗ - двигуни внутрішнього згорання

ДП - дискретні покриття

ЗП - зносостійкі покриття

ЗЗП - захисні зміцнюючі покриття

ЗТВ – зона термічного впливу

ІІА – імпульсне іоне азотування

КВМ – коефіцієнт використання матеріалів

КМ – композиційні матеріали

КП – композиційні покриття

МДО - мікродугове оксидування

МСЕ - метод скінчених елементів

МО – механічна обробка

РО робочі органи

РЕМ - растрова електронна мікроскопія

РСМА - рентгеноспектральний мікроаналіз

СГМ – сільськогосподарські машини

СЕМ - скануюча електронна мікроскопія

СЕС - скінчено-елементна сітка

ЕІЛ –електроіскрове легування

ЕДН – електродугове напилення

ЕМ - електродні матеріали

HVOF - високошвидкісне паливно-кисневе напилення

ВСТУП

Актуальність теми. Термін служби сільськогосподарських машин лімітують триботехнічні вдастивості їх деталей, а знос призводить до порушення агротехнічних вимог, і як наслідок - до зменшення врожайності.

Втрата працездатності деталей і робочих органів сільськогосподарських машин зв'язана з абразивним зносом, який складає 20%. Процес абразивного зношування в чистому вигляді зустрічається рідко, він являє собою суттєву частку загального процесу зношування. Найбільш поширеними видами зношування робочих органів і деталей сільськогосподарських машин є абразивний та корозійно-механічний види зношування.

Багаточисельні дослідження українських вчених Ляшенко Б.А., Клименко С.А., Черновола М.І. та ін. показали, що раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми забезпечення міцності, твердості, зносостійкості та триботехнічних властивостей деталей і робочих органів сільськогосподарських машин є застосування композиційних покриттів.

Вирішення поставленої проблеми пов'язане з вибором складу та способу формування композиційних покриттів.

В якості матеріалу для нанесення зносостійких покриттів використовують композиційні матеріали з металевою матрицею, яка сумісно з армуючим наповнювачем рівномірно розподіляє напруження, забезпечує несучу здатність композиту і захищає наповнювач від механічних ушкоджень і окислення. Наповнювачами в композиційних матеріалах служать дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів і карбідів, основною функцією яких є зміцнення. Абразивна зносостійкість композиційних матеріалів залежить від їх складу. Високою абразивною зносостійкістю володіють матеріали й покриття з мартенситно-аустенітною матрицею, зміцнені карбідною фазою.

Для підвищення триботехнічних властивостей використовуються різні методи нанесення композиційних покриттів: наплавленням, газотермічним напиленням,

електроіскровим легуванням, а також різні комбіновані методи. Аналіз літературних джерел показав, що більшість методів нанесення композиційних покриттів альтернативні. Вибір способу формування композиційного покриття визначається умовами експлуатації сільськогосподарських машин, конструкцією деталі або робочого органу, їх матеріалом, складом композиційного покриття та його економічною доцільністю.

Виконаний літературний огляд способів зміцнення та відновлення деталей композиційними покриттями дозволив сформулювати основні вимоги до технологічного процесу їх нанесення, яким відповідає метод електроіскрового легування.

Процес електроіскрового легування, який забезпечує формування покриттів дискретних по своїй природі, дозволяє формувати зносостійкі композиційні покриття різної суцільності на основі карбідів, оксидів, боридів, самофлюсуючих сплавів. Покриття, отримані електроіскровим легуванням, утворюють поверхні, які дозволяють значно підвищити несучу здатність пар тертя, зносостійкість деталей і трибосполучень, стабільність їх триботехнічних характеристик.

Електроіскрові покриття характеризуються високою зносостійкістю, твердістю і в них не проявляються фазові перетворення. Зносостійкість композиційних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування, залежить від твердості матеріалу покриття, який перешкоджає абразивним часткам потрапляти в поверхню деталі.

Великий внесок у розвиток методу електроіскрового легування внесли українські та закордонні вчені Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.І., Верхотуров А.Д., Гитлевич А.Є., Подчерняєва І.О., Ляшенко Б.А., Feldshteina E.E., Mao Y., Xie Y.J., Wang M.C., Johnson R.N., Reynold J.L. та ін.

До нинішнього часу формування композиційних покриттів методом електроіскрового легуванням є однією з невирішених задач в проблемі підвищення зносостійкості робочих органів і триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин. Відновлення, зміцнення, підвищення триботехнічних

властивостей та строку експлуатації деталей сільскогосподарських машин є важливим резервом розвитку сільськогосподарського машинобудування та ремонтного виробництва, підвищення його ефективності. Використання зміцнених і відновлених деталей дозволить знизити витрати ремонтних підприємств на запасні частини, зберегти велику кількість металу.

Тому підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування є актуальним завданням, вирішення якого забезпечить строк служби зміцнених і відновлених деталей, що не поступиться строку служби нових деталей та допоможе зробити сільськогосподарське та ремонтне виробництво рентабельним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Державного університету «Київський авіаційний інститут». Дослідження проводились в рамках науково-дослідної робіти:

№ 16-2022/ 07.01.01. «Підвищення довговічності та забезпечення міцності елементів конструкцій авіаційної техніки» (0125U001009) на кафедрі прикладної механіки та інженерії матеріалів Державного університету «Київський авіаційний інститут». Аспірант запропононував склад композиційних матеріалів, дав характеристику способам створення композиційних покриттів і методам їх дослідження.

Здобувач виконав дослідження триботехнічних властивостей поверхонь експериментальних зразків із електроіскровими композиційними покриттями. Автором проведено моделювання поверхонь деталей з композиційними покриттями, дана оцінка напружено-деформованого стану поверхонь з композиційними електроіскровими покриттями та визначені оптимальні параметри покриття.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – експериментальні та теоретичні дослідження процесу підвищення триботехнічних властивостей деталей

сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування.

Для виконання поставленої мети необхідно було виконати завдання:

- проаналізувати умови експлуатації сільськогосподарських машин і довговічність їх деталей і робочих органів залежно від їх зносостійкості та корозійної стійкості;

- обгрунтувати, що нанесення зносостійких покриттів із композиційних матеріалів є найбільш раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин;

- довести доцільність формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування, сформулювати його особливості, переваги та потенційні можливості;

- проаналізувати напружений стан між композиційним покриттям і поверхнею деталі та в самій деталі моделюванням напружено-деформованого стану та визначити оптимальні значення товщини та суцільності покриття;

- визначити вплив режимів процесу електроіскрового легування на параметри і властивості покриттів;

- дослідити триботехнічні характеристики поверхонь з композиційними покриттями в залежності від режимів процесу електроіскрового легування;

- встановити залежність триботехнічних властивостей композиційних покриттів, сформованих методом електроіскрового легуванням, від їх товщини їх суцільності;

- показати доцільність використання композиційних електроіскрових покриттів для підвищення триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин.

Об'єкт досліджень – процеси тертя та зношування композиційних покриттів, сформованих методом електроіскрового легування.

Предмет досліджень – закономірності зміни триботехнічних властивостей електроіскрових композиційних покриттів залежно від їх суцільності та товщини.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети і вирішення поставлених задач була запропонована загальна схема досліджень у вигляді сукупності методів і методик теоретичних і експериментальних досліджень напружено-деформованого стану, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь деталей з композиційними покриттями.

Для проведення досліджень використовували установку "Елітрон-22" для електроіскрового легування. В якості матеріалу композиційних покриттів використовували карбід вольфраму ВК8 (WC – 8%Co), композиційний матеріал КХН-25 (тип Cr-Ni-C), сплав Х20Н80 (Ni-Cr 80/20).

Для дослідження мікроструктури покриттів, отриманих методом ЕІЛ використовували фізичні методи досліджень: оптичну металографію, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналіз.

Для моделювання напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями використовували метод скінчених елементів.

Триботехнічні характеристики (інтенсивність зношуванні та коефіцієнт тертя) досліджували на машині 2070 СМТ-1 з їх реєструванням за допомогою програмно-технічного комплексу.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

– встановлено підвищення зносостійкості та антифрикційних властивостей несуцільних електроіскрових композиційних покриттів внаслідок збільшення частки компоненту матриці (нікелю) в структурі композиційного матеріалу, що забезпечує ефективний розподіл контактного навантаження на локальних ділянках та високу демпфуючу здатність в приповерхневих шарах контактних поверхонь;

– визначено закономірності зменшення зносу несуцільних електроіскрових композиційних покриттів в абразивному середовищі, які полягають в зменшенні інтенсивності механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті за рахунок формування покриттів з високою мікротвердістю та зниженні дотичного

опору зсуву при втіленні твердої абразивної частки залежно від типу матриці композиційних матеріалів;

– на основі аналізу НДС доведено, що максимальне зниження дотичних та еквівалентних напружень несуцільних електроіскрових покриттів проявляється для суцільності покриття 60…80 %; максимальні еквівалентні напруження формуються в покритті, що знижує напружено-деформований стан основи; оптимальне співвідношення товщини та суцільності покриттів дає можливість мінімізувати їх когезійне розтріскування та адгезійне відшарування.

Удосконалено:

– методику оцінки напружено-деформованого стану деталей сільскогосподарських машин із композиційними електроіскровими покриттями та визначення їх оптимальних параметрів шляхом побудови скінченно-елементної моделі поверхні деталі з композиційним покриттям із розподілом еквівалентних напружень по Мізесу.

Отримало подальший розвиток:

– дослідження триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин шляхом нанесення електроіскрових композиційних покриттів із оптимальними значеннями їх товщини та суцільністі.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Дослідно-експериментальні та експлуатаційні випробування ножів із ЕІП покриттям довели, що за рахунок підвищення зносостійкості ножів збільшилась ефективність подрібнення зернових культур. Експлуатаційні випробування відновлених деталей валів муфти зчеплення та розподільного валу трактора композиційними покриттями показали підвищення їх триботехнічних властивостей та строку експлуатації в 2…2,5 рази, що представляє практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств (акт про використання результатів наукових досліджень від 05.10.2024 року, «Агробудавтосервис» (м. Кропивницький).

2. Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес: у процесі підготовки курсів лекцій та практичних занять з дисциплін «Інженерія поверхні» та «Технології конструкційних матеріалів» розглянуто сучасні порошкові зносостійкі композиційні матеріали та метод електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; результати роботи використано при підготовці тем кваліфікаційних робіт (акт про впровадження в навчальний процес ДУ «КАІ» від 07.03.2025 року).

Особистий внесок здобувача. Основні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, автор отримав самостійно. Постановка задач, аналіз наукових результатів і основних висновків досліджень виконано спільно з науковим керівником. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, здобувачеві належать: результати досліджень, які показали ефективність використання композиційних покриттів для підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин, які доцільно формувати методом електроіскрового легування [1]; обгрунтований вибір складу композиційних матеріалів для формування композиційних покриттів електроіскровим легуванням [2]; довів можливість технологічного забезпечення покриттів дискретної структури методом електроіскрового легування [3]; виконав моделювання напружено-деформованого стану деталей з композиційними покриттями [4]; дослідив і дав оцінку напруженому стану в покритті, на межі покриття з поверхнею деталі та в самій деталі в залежності від товщини та суцільності покриття та визначив їх оптимальне значення [5]; встановив залежність зносостійкості композиційних електроіскрових покриттів від їх суцільності [6]; дослідив фізико-механічні, триботехнічні та експлуатаційні властивості поверхонь з композиційними покриттями [7]; використав результати досліджень при отриманні експериментальних зразків і деталей із композиційними покриттями на прикладі ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну і валу муфти зчеплення трактора і показав підвищення їх триботехнічних властивостей та терміну служби [8, 9].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи представлені та обговорені на:

- XXI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Якість, стандартизація і контроль: Теорія і практика», Одеса, Україна, вересень 2021 року;

- IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем», ЦНТУ, Кропивницький, Україна, травень 2022 року;

- XXIII-му Міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті», Інститут надтвердих матеріалів НАН України, Київ, Україна, березень 2023 року;

- XXV-му Міжнародного науково-технічного семінару «Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті», АТМ України, Інститут надтвердих матеріалів НАН України, Київ, Україна, березень 2025 року.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 наукових праць, з них – 5 статей у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України за спеціальністю дисертації, 4 – у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Відповідно до п.3.6 «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук», затвердженого Постановою КМУ № 261 (із змінами в редакції постанови КМУ від 19.05.2023 № 502) від 23.03.2016 р., та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.: наукові результати дисертації висвітлені у 4 наукових публікаціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Список використаних джерел із 224 найменувань на 31 сторінці. Додаток – 10 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 120 сторінок,

загальний обсяг дисертації складає 173 сторінки. Всього в роботі 23 таблиці, 52 ілюстрації та 4 додатки.

РОЗДІЛ 1
СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Умови експлуатації та основні причини втрати працездатності робочих органів і деталей сільськогосподарських машин, їх несправності, дефекти та особливості зношування.

Сільськогосподарські машини (СГМ) поділяються (табл. 1.1) на машини й знаряддя для: поверхневої обробки ґрунту, внесення добрив, догляду за посівами, захисту рослин, заготівлі кормів, збирання та обробки овочевих культур, садів та виноградників; плуги; сівалки; розсадо-посадкові, зернозбиральні, зерноочисні, сортувальні, меліоративні, транспортні (автомобілі, трактори) та енергетичні машини (двигуни, турбіни, газогенераторні, електродвигуни) [1-8].

В процесі експлуатації СГМ їх деталі й робочі органи підлягають зносу. Вирішення задачі підвищення їх зносостійкості та поліпшення триботехнічних властивостей базується на аналізі умов їх експлуатації [9-28].

Умови експлуатації характеризуються широким діапазоном режимів роботи, температури, тиску, безперервним зростанням навантажень, швидкостей та тривалості експлуатації. При експлуатації деталей та робочих органів (РО) сільськогосподарських машин (СГМ) їх розміри, геометричні характеристики, структура та властивості матеріалів змінюються [16, 20-22]. Характеристика цих змін залежить від природи тертя, умов механічного навантаження, середовища, виду мастильного матеріалу та властивостей конструкційного матеріалу [11-15, 17-19].

Основна причина руйнування поверхонь деталей та РО СГМ - зовнішнє тертя, яке є результатом впливу механічних, фізичних, хімічних, електричних та інших факторів, що виникають при їх контактуванні з поверхнею деталей [26]. Негативний вплив цих факторів - знос та ушкодженні поверхонь деталей як результат зношування та причина втрати працездатності деталей та РО СГМ. Експлуатаційною

характеристикою деталей і РО СГМ є зносостійкість. Від зносостійкості та триботехнічних властивостей деталей і РО СГМ залежить термін їх експлуатації [26-29].

Таблиця 1.1

Класифікація сільськогосподарських машин

Група	Тип	Вид
1	2	3
Машини для обробітку ґрунту	Борони Лущильники Культиватори Ґрунтообробні фрези	Зубові, дискові Дискові, лемішні Стрілчасті та розпушувальні лапи Болотяні, польові, садові, просапні
Плуги	Загального призначення (лемішні, ротаційні, чизельні, комбіновані) Спеціальні (чагарниково-болотні, садові, виноградникові, лісові)	Причіпні, напівнавісні, навісні Плуги для гладкої та свавільно-розвальної оранки
Сівалки	Універсальні (зернові, зерно-трав'яні) Спеціальні (бурякові, бавовняні, кукурудзяні, овочеві)	Рядові, розкидні, пунктирні, гніздові
Розсадо-посадочні машини	Картоплесаджалки	
Машини для догляду за посівами	Культиватори-рослиноживильники	
Машини для захисту рослин	Машини-запилювачі, обприскувачі, мішалки, протруювачі	
Машини для заготівлі кормів	Косарки Граблі, преси-підбирачі, підбирачі-копнювачі, кормозбиральні комбайни	Плющилки й подрібнювачі
Зернозбиральні машини	Зернозбиральні комбайни, валкові жниварки, жатки, молотилки	
Зерноочисні та сортувальні машини	Повітряно-решітні машини Зерносушарки	Пересувні, стаціонарні, барабанні та шахтні
Машини для збирання та обробки овочевих культур	Машини для збирання картоплі Машини для збирання буряків та моркви	Картоплекопачі роторні та елеваторні, картоплезбиральні комбайни Коренезбиральні комбайни, машини коренезбиральні та ботвоприбиральні для буряків та моркви, бурякопідйомники, буряконавантажувачі

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Машини для садів та виноградників	Машини для закладки садів та виноградників	Глибокорозпушувачі, сівалки, викопні плуги та скоби, ямокопачі та гідробури, сажалки
	Машини для догляду за садами та виноградниками	Дискові борони, фрези, культиватори для обробки ґрунту.
	Машини для товарної обробки плодів	Сортувально-калібрувальні агрегати, конвеєри, транспортери, сушарки
Меліоративні машини	Прочісуючі каменеприбиральні машини	Машини для корчування пнів та збирання каміння
	Підкопні каменеприбиральні машини	Кущниково-болотні плуги та фрези, кущорізи, бульдозери
	Каналокопачі, каналоочисники	Корчувачі-збирачі та граблі, машини для глибокого фрезерування, корчувальні борони та машини, гребінки
Машини для влаштування та утримання каналів	Вирівнювачі	Каналокопачі плужного, фрезерного та роторного типу; лемехи, бульдозери, скрепери, грейдери, культиватори, котки
	Планувальники	Планувальники ковшові та відвальні
	Машини для траншейного та кроторного дренажу.	Дреноукладачі
Машини для влаштування закритого дренажу	Дренажно-щілинні машини, машини для стубчастого дренажу, машини для покращення лук і пасовищ	Дощувальні установки та апарати, Трубки-сифони, гнучкі шланги з водопропускними та поливними машинами
Машини для зрошення	Дощувальні системи Поливні машини	
Транспортні машини (автомобілі, трактори)	Сільськогосподарські Промислові Спеціальні	Загального призначення, універсально-просапні, садово-городні
Енергетичні машини (двигуни)	Електродвигуни Дигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) Гідравлічні двигуни	Синхронні, асинхронні Дизелі, карбюраторні, газові Турбіни, гідромашини

Складність процесу зношування деталей та РО СГМ пов’язана з силами на поверхні тертя, механічним і хімічним складом абразивного середовища [9-11, 30].

Вид зношування деталей та РО СГМ визначають: середовище, в якому вони експлуатуються; динаміка і кінематика відносного переміщення складових середовища; властивості матеріалу деталей та робочих органів і характер їх контакту із

середовищем. Середовище, в якому експлуатуються деталі та РО СГМ і характер їх контакту з ним, динаміка і кінематика відносного переміщення складових середовища – фактори, які характеризують умови експлуатації деталей та робочих органів і визначають фізичні основи їх зносу. Поєднання властивостями матеріалу деталей і РО СГМ з умовами та середовищем їх експлуатації визначає вид зношування [9-11, 26-28, 30].

Вид зношування обумовлюється: домінуючим видом тертя; швидкістю відносного переміщення поверхонь; величиною й характером тиску на поверхню при терті; видом і якістю мастильного матеріалу; властивостями матеріалів деталей (межою міцності, твердістю, тепловою та хімічною стійкістю) [26-33].

Найбільш поширеними видами зношування деталей та РО СГМ є абразивний, також проявляється корозійно-механічне зношування [34, 35]. Абразивне зношування зумовлено наявністю абразивного середовища в зоні тертя [34]. Найбільш поширений абразив - кварцевий пісок, що входить до складу ґрунтів, пилу та є головним агентом, що викликає зношування РО й деталей СГМ [28].

При взаємодії поверхневих шарів деталей та РО СГМ з атомами кисню, що міститься в повітрі або в мастильному матеріалі й адсорбуються на них, має місце окисне зношування. Окислювальний знос - різновид корозійно-механічного зносу, який обумовлений механічним процесом деформації поверхневих шарів і одночасною їх взаємодією з агресивними компонентами середовища [35 - 37].

Абразивний знос та корозійно-механічний знос РО СГМ приводять до порушення агротехнічних вимог і як наслідок - до зменшення врожайності [28]. Наприклад, при зносі лемеша [19] погіршуються агротехнічні показники оранки й збільшується тяговий опір плуга, а при зносі лап – такі агротехнічні показники як погане подріблення ґрунту та не зрізання бур'янів, що призводить до підвищення тягового опору культиваторів і грунторізів.

Основні дефекти лап культиваторів - знос і затуплення леза й носка, тріщини та сколи на робочій поверхні [19-22]. В процесі експлуатації диски лущильників, борон, а

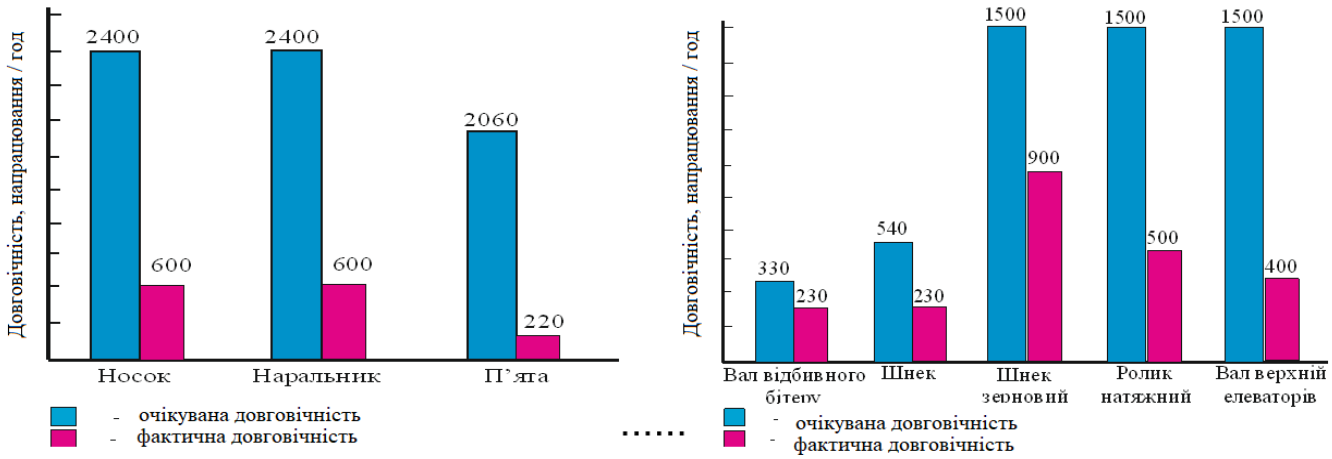
також сівалок затупляються й зношуються по товщині та діаметру (рис. 1.1, а), на робочій поверхні виникають сколи й тріщини, на лезах утворюються щербини, поверхні деформуються. Показник зносу дискових сошників - збільшення зазору між лезами дисків.

Подрібнюючий апарат кормозбирального комбайна в процесі роботи набуває наступних несправностей: затуплення й поломка барабана та протиріжучої пластини. В подрібнюючому апараті зношуються рухомі та нерухомі зубці, отвори для кріплення зубців, підшипники головного валу, посадкові гнізда корпусів підшипників і посадкові місця на валу, порушується балансування диску із зубцями [23, 28, 38]. В процесі роботи в ріжучому апараті кормозбирального комбайна затупляються леза сегментів і протиріжучих пластин, косинці й пальці згинаються та скручуються, секції пальців перекошуються, деформується спинка ножової смуги, зношуються поверхня отвору голівки шатуна, зубці щічок голівки й посадочні місця шарніра кріплення коромисла [23, 28, 38].

Основні несправності бітерів молотильного пристрою - тріщини зварних швів, вигини та розриви лопатей, знос зубців приводних зірочок, биття цапф, руйнування диска відбійного битера, а молотильного барабану - забоїни й знос рифів; обрив головок заклепок кріплення підбічників до дисків, деформація підбічників; порушення балансування, знос і поломка валу, тріщини в зварних швах.

Основні несправності підбарабання молотильного апарату - вигин планок і боковин каркаса, деформація направляючого щитка й гнізд ексцентрика підвіски; руйнування зварних швів [23, 28, 38].

Основні несправності шнеків жаток зернозбиральних комбайнів: руйнування зварних швів; деформація витків спіралі; вигин і злам валу; вм'ятини, пробоїни, тріщини кожухів; знос канавок шпонок. У шнеків жаток зернозбиральних комбайнів в результаті деформації витків спіралі та вигину цапф порушується балансування (рис. 1.1, б).

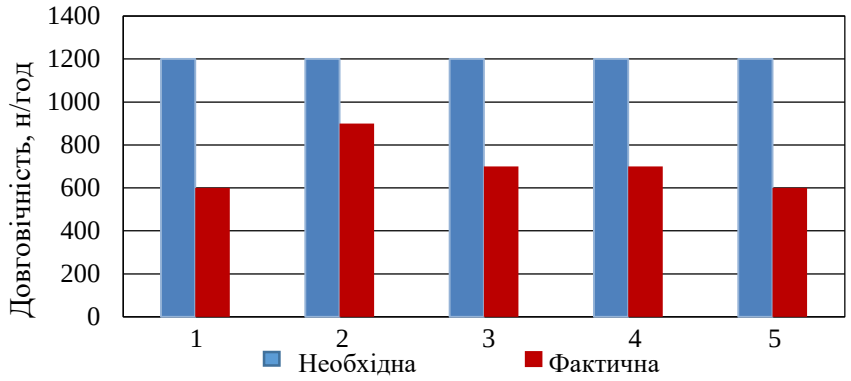


а б

Рис. 1.1. Швидкозношувані деталі зернових сівалок (а) і зернозбиральних комбайнів (б).

В процесі роботи дробильного пристрою дробарок, призначених для подрібнення фуражного зерна й приготування сінного борошна, зношуються робочі грані дробильних молотків, поверхні решіт, леза ножів і протиріжучих пластин, кронштейни ножів

На рис. 1.2. представлено показники зносостійкості молотів кормоподрібнювачів, а на рис. 1.3 - результати аналізу строку служби протиріжучих пластин подрібнюючих кормозбиральних комбайнів [23, 28, 38].



1 – молотки кормоподрібнювачів;
2 – каток барабану агрегату для приготування вітамінно-трав′яної муки;
3 – молотки агрегатів для приготування вітамінно-трав′яної муки;
4 – матриця обладнання для гранулювання вітамінно-трав′яної муки;
5 – молотки кормоподрібнювачів

Рис. 1.2. Зносостійкість молотків дробарок і подрібнювачів.

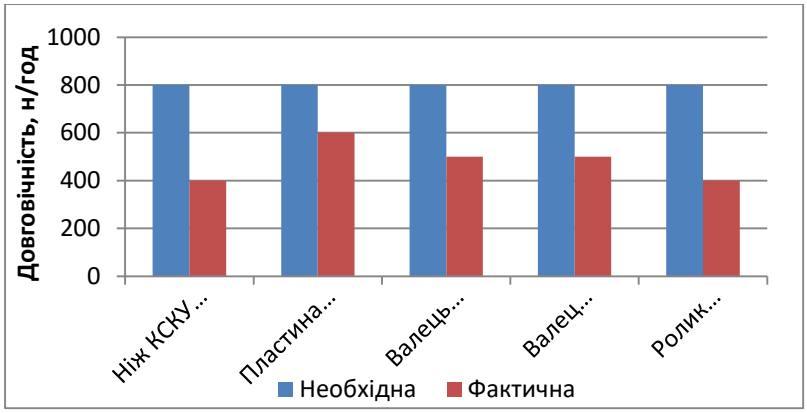


Рис. 1.3. Довговічність ріжучих елементів подрібнюючих барабанів кормозбиральних комбайнів.

В табл. 1.2 представле=на номенклатура зношуємих деталей машин і обладнання для кормовиробництва, тваринництва та птаховиробництва.

Таблиця 1.2

Номенклатура зношуємих деталей машин і обладнання для кормовиробництва, тваринництва та птаховиробництва

Найменування машини	**Найменування деталі**	**Контролюємий показник**	**Величина зносу, мм**
Кормодробарка	Лопатка ротора вентилятора, пальці молотків	Товщина полки Діаметр	3,53 1,07
Агрегати для приготування вітамінно-трав'яного борошна	Молоток Ролики Упорний каток	Ширина Діаметр Діаметр	6,595 1,075 3,75
Обладнання для пресування кормів Подрібнювач	Сегмент брикетування Ніж ріжучого барабана	По торцевій поверхні Ширина	1,093 1,173
Кормороздавач	Опорне ходове колесо Шатун	Діаметр Діаметр отвору	3,866 1,0
Обладнання для утримання тварин	Нерухомий ніж дозатора Ексцентрик	Ширина Діаметр стрижня	0,10 0,175
Обладнання для птаховиробництва	Палець тяги Поворотний ролик Поворотне колесо	Діаметр Робоча зона Діаметр	0,05 0,50 0,667

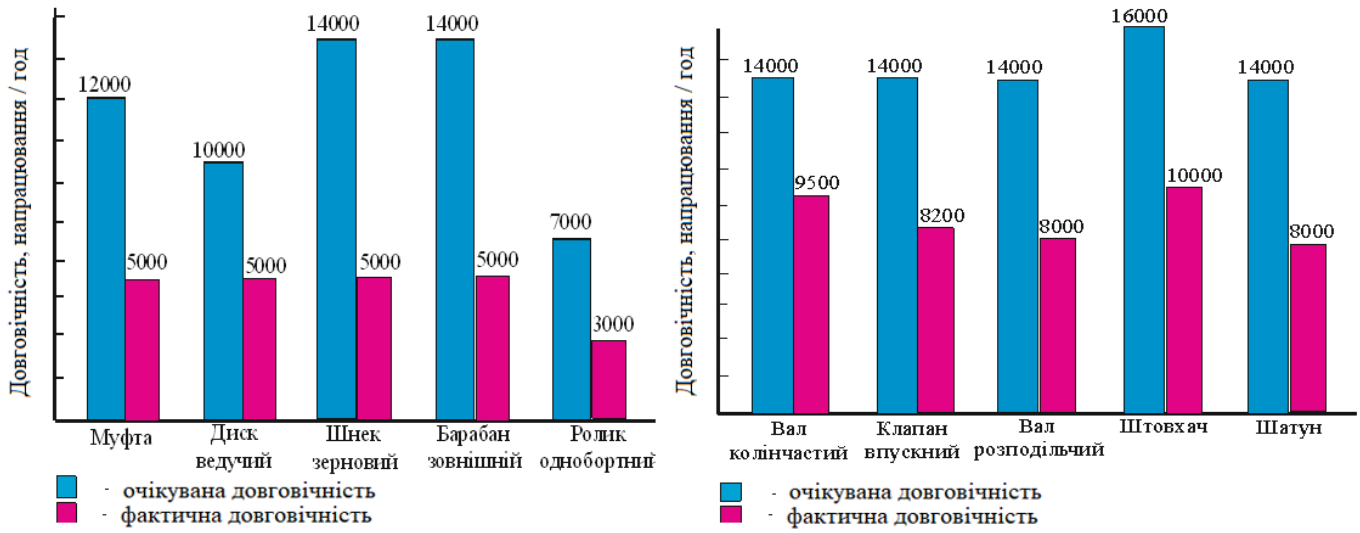
Основні дефекти елементів ланцюгів транспортуючих, сепаруючих, передаючих і запобіжних механізмів СГМ [39, 40]: знос отворів і поломка внутрішніх й зовнішніх пластин; знос внутрішньої та зовнішньої поверхонь й поломка роликів і втулок, знос поверхні валів. Основні дефекти зірочок ланцюгових передач – знос зубців, різьбових отворів, злам і тріщини обода маточини й спиць [39, 40].

Основні несправності шківів ремених передач [39, 40]: знос конусних поверхонь канавок, поверхні отвору маточини, канавки шпонки, різьбових отворів; тріщини в маточині або спицях; сколи буртів канавок.

Основні несправності соломотрясів – вигин валів, знос шийок валів і підшипників, тріщини корпусу клавіш, злам кронштейнів, вигин граблин і грат. Пошкодження складових частин очищення: тріщини й деформації транспортної дошки; обрив кріплень гребінок і жалюзійних решіт; старіння гумових ущільнень; вигин лопатей вентилятора та порушення його балансування; ослаблення кріплень [39]. В процесі роботи вентилятора можливі наступні несправності: прогинання валу, деформація лопатей, ослаблення кріплень хрестовин, вм'ятини кожуха [39].

Підвищення показників експлуатаційних параметрів – температури, тиску, швидкості та агресивності робочих середовищ призводить до знеміцнюючої дії на конструкційні матеріали.

У працюючих двигунах транспортних засобів СГМ (тракторів, автомобілів), насамперед, у сполучених поверхнях його деталей, виникає знос внаслідок тертя (рис. 1.4) [24, 25]. Відмови відбуваються в результаті поверхневого руйнування, зношування, деформації. Відмови внаслідок зношування визначаються станом контактуючих поверхонь, наявністю мастильного матеріалу, тиском, швидкістю відносного переміщення. На розподіл тиску впливає характер навантаження, відносні швидкості ковзання поверхонь тертя. Підвищена інтенсивність зношування - наслідок вібраційних навантажень, перекосів і деформацій поверхонь, недостатньої кількості мастильного матеріалу, підвищеної температури, потрапляння сторонніх частинок і продуктів зношування в зону тертя [40].



а) б)

Рис. 1.4. Швидкозношувальні деталі тракторів (а) і дизельних двигунів (б).

Відмови деталей та робочих органів СГМ можуть відбуватися через недостатню їх міцність, перевищення діючого навантаження, дефекти матеріалу. Проведений аналіз умов експлуатації сільськогосподарських машин і розглянуті основні фактори, що визначають вид зношування їх робочих органів і деталей показали, що довговічність СГМ знаходиться в прямій залежності від здатності протистояти їх робочих органів і деталей абразивному та корозійно-механічному руйнуванню.

1.2. Основні напрямки підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин.

Існують основні напрямки підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ [38]:

- вибір раціональних параметрів конструктивних елементів робочих органів і деталей сільськогосподарських машин;

- вибір оптимальних параметрів режимів роботи СГМ;

- застосування захисних зміцнюючих покриттів та створення композиційних структур із мінімальним зносом.

Найбільший ефект підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ дає використання всіх трьох напрямків одночасно [38]. Найбільш перспективним шляхом слід вважати створення захисних зміцнюючих покриттів [41, 42] та створення композиційних структур із мінімальним зносом [43-45].

Так, наприклад, зносостійкість лемеша й лап культиваторів підвищують наплавленням твердого сплаву сормайт [45-50]. Для забезпечення самозаточування леза дисків лущильників і борон з опуклого боку наплавляють твердим сплавом сормайт або ПС-4 [51-53]. Диски сівалок правлять ударами молотка в холодному стані [54, 55].

Зношені посадкові місця валу молотильного барабана та його поверхні опору проточують до видалення слідів зносу, наплавляють під шаром флюсу і в середовищі вуглекислого газу дротом Нп-30ХГСА діаметром 1 мм, а потім піддають механічній обробці (МО) до номінального розміру [56, 57]. Дробильні молотки дробильного пристрою виготовляють з листової сталі 65Г або із звичайної вуглецевої сталі з наступним наплавленням зміцнюючого сплаву сормайт [56]. Зношені поверхні вісі шнека жатки зернозбирального комбайна відновлюють на установці для автоматичного наплавлення під шаром флюсу [58, 59].

В двигунах до поверхонь тертя деталей подачу мастильного матеріалу забезпечує система змащування. Крім зменшення втрат на тертя та збільшення довговічності їх деталей, мастильний матеріал забезпечує видалення з тертьових поверхонь продуктів зносу [60]. Деталі двигуна (рис. 1.4) працюють в умовах різних навантажень, температур і швидкостей. Тому умови змащення різних деталей відрізняються один від одного. Кривошипний механізм двигуна і, зокрема, підшипники колінчастого валу, при роботі сприймають великі навантаження, тому необхідно забезпечити їх достатньою кількістю мастильного матеріалу. Надмірна кількість оливи, що надходить до циліндрів і поршнів, порушує нормальну роботу двигуна: відбувається відкладення нагару на поршнях, зависання клапанів, замаслювання свічок у карбюраторних двигунах, виникає небезпека роботи двигуна в результаті потряпляння оливи в камеру

згоряння дизеля через збільшені зазори. Тому для змащення пари цилиндр-поршень подають оливи менше, ніж для змащення кривошипного механізму [60].

В даний час напрацьовані рекомендації по вибору раціональних параметрів конструктивних елементів РО і деталей СГМ [23, 38, 46]. Що ж стосується застосування зносостійких матеріалів і методів нанесення покриттів, то доцільно відзначити їх обмежене використання для підвищення триботехнічних властивостей РО і деталей СГМ, що і є однією з причин їх недостатньої довговічності та строку служби.

Призначення покриттів - захист робочих поверхонь деталей та РО СГМ від зношування, корозії, окислення при підвищених температурах [41-45, 47-60].

Процес нанесення покриттів обґрунтовується тим, що до зміцнюємої поверхні РО і деталей СГМ пред'являють різні вимоги, які виключають одна одну. Так, наприклад, високі вимоги до твердості поверхневого шару не завжди можуть бути пред'явлені до всього об'єму деталі. Задовольнити такі протиріччя до поверхневих і об'ємних характеристик РО і деталей СГМ можна шляхом створення покриттів [41-44, 46-66].

До покриттів повинні пред'являтись наступні вимоги: близький до матеріалу основи коефіцієнт термічного розширення; відсутність несприятливого впливу на властивості деталей; дифузійна інертність до матеріалу деталей; достатня адгезія; комплекс необхідних експлуатаційних характеристик; економічна доцільність [41, 42, 67].

Таким чином, застосування зміцнюючих захисних покриттів (ЗЗП) і розробка технологічних процесів (ТП) їх нанесення – актуальний напрямок підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ.

Великий вплив на властивості покриттів і відповідно зміцнюємих і відновлюємих робочих поверхонь деталей та РО СГМ чинить матеріал покриття та спосіб його отримання. Вибір складу покриття складний, тому що, структура, товщина покриття, оптимальний з точки зору склад покриттів залежать від багатьох факторів.

1.3. Матеріали для зносостійких покриттів. Композиційні матеріали.

Для підвищення довговічності робочих органів і деталей СГМ, які працюють в умовах абразивного та корозійно-механічного зношування, доцільно використовувати зносостійкі матеріали. Якщо проаналізувати вимоги до зносостійких матеріалів, то можна зробити висновок, що їх можливо виконати лише при використанні гетерогенних матеріалів [44].

У окремий клас зносостійких матеріалів виділяють композиційні матеріали (КМ), які поєднують два або більш матеріалів із межею розділу між ними [68-73]. Перевагами КМ є їх висока міцність, жорсткість і зносостійкість. Головна мета використання КМ – підвищення експлуатаційних властивостей Багаточисельні дослідження показали й довели [42-45, 68-70], що нанесення покриттів із КМ є найбільш раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ.

Опір абразивному та корозійно-механічному зношуванню багато в чому залежить від природи й кількості твердих зносостійких складових в структурі покриття. Існують два принципово різних методи регулювання вмісту твердих складових в структурі покриття: 1) зміна хімічного складу; 2) введення в шихту наповнювачів, які утворюють в результаті взаємодії з матрицею композиційні матеріали [42-45, 68-73]. Зносостійкість, корозійна стійкість та інші властивості КМ залежать від їх складу [42-45, 68-73].

Для нанесення зносостійких покриттів використовують КМ у вигляді порошків, дроту, прутків, електродів. Композиційні матеріали включать матрицю, наповнювачі та додаткові матеріали [42, 43, 68-73].

Матриця об'єднує в одне ціле всі компоненти КМ і забезпечує його несучу здатність, захищає наповнювач від механічних ушкоджень й окислення, додає покриттю монолітність, пов'язує його з основою деталі й дозволяє сприймати різні зовнішні навантаження. Тип матриці визначає технологію отримання композиційного покриття (КП), його термічну і корозійну стійкість, електричні й теплозахисні

властивості, інші характеристики покриття та деталі в цілому [42, 43, 68-73]. Матеріал матриці забезпечує спільну роботу армуючих елементів і рівномірно розподіляє напруження. Композиційні матеріали можуть бути на основі металевої, керамічної та полімерної матриці [42, 43, 68-74]. В якості матеріалу матриці для зносостійких покриттів використовуються залізо, нікель, мідь, наплавочні сплави [42, 43, 68]. Найбільш поширене застосування для формування зносостійких КП отримали самофлюсуючі сплави на основі нікелю та заліза [42, 68, 75-77].

Самофлюсуючі сплави (СФС) – багатокомпонентна гетерогенна система, що містить м'яку матрицю та тверді дисперсні включення карбідів, боридів, силіцидів. Найширше застосовуються СФС системи Ni-Cr-B-Si-C. Для підвищення зносостійкості, твердості та інших властивостей робочих органів і деталей СГМ доцільно використовувати СФС на основі заліза. Самофлюсуючі сплави [42, 43, 68, 75-77] володіють високим комплексом експлуатаційних характеристик (зносостійкістю, теплостійкістю, корозійною стійкістю), і використовуються як еталони для розробки КП.

Склад наповнювача композиційного матеріалу надає йому задані експлуатаційні властивості. Основна функція наповнювача, їх часто називають зміцнювачами, забезпечення міцності та жорсткості КМ. В кераміко-металічних КМ відповідно до геометрії армуючих часток (наповнювача) використовуються керамічні наповнювачі у вигляді дисперсних частинок. Армування дисперсними частинками дозволяє підвищити міцність кераміко-металічних КМ [42, 43, 45, 68-70].

У дисперсно-зміцнених КМ на металевій основі наповнювачами служать дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів, нітридів і карбідів [42, 43, 68-70]. В якості матеріалу для нанесення зносостійких покрить (ЗП) використовують КМ, наповнювачами в яких служать дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів і карбідів, основною функцією яких є зміцнення КП. При зміцнені робочих органів СГМ доцільно використовувати КМ, які включають зносостійкі наповнювачі, наприклад, карбід хрому та карбід вольфраму[42, 43, 68-70, 74].

Допоміжні матеріали, що входять до складу КМ не залишаються в покритті після його нанесення та використовуються на різних стадіях технологічного процесу [42, 43, 68, 70].

Кожен з компонентів вводиться до складу КМ з метою додати йому властивості, якими не володіє кожен із компонентів окремо [42, 43, 68-70]. Поєднання матриці та наповнювача забезпечує властивості КП, що не тільки відображають початкові характеристики його компонентів, але й властивості, якими володіє композиційне покриття після його формування.

Вибір армуючого компоненту визначається призначенням КМ, вибір матричного матеріалу – рівнем робочих температур. Склад і властивостей наповнювача та матриці впливають на створення необхідних експлуатаційних і технологічних властивостей КП. Властивості композиційних покриттів залежать від співвідношення кількості наповнювачів в матриці та їх міцності зчеплення [78].

Вибір компонентів КМ обмежується їх сумісністю [78]. Вирішення проблеми регулювання сумісності компонентів в одному покритті дає можливість в повному обсязі використовувати триботехнічні властивості КП. Спроможність використання КМ на практиці залежать від вибору методів їх формування та складу, які повинні забезпечити високу міцність зчеплення між матрицею та наповнювачими та зберегти без зміни їх початкові властивості.

Природа початкових компонентів КМ, їх фазовий стан, співвідношення, стан межі розділу фаз, створення мікро- і макроструктури визначають властивості композиційного покриття, а поєднання властивостей композиційного матеріалу обумовлює використання КП для тих або інших цілей. Комбінуючи об'ємний вміст компонентів КМ: можна, залежно від їх призначення, створювати КП з заданими властивостями (зносостійкістю, корозійною стійкістю, теплостійкістю та іншими).

Композиційні кераміко-металічні покриття за їх призначенням та використанням розділяють на зносостійкі, антифрикційні, фрикційні, корозійностійкі, спеціальні [42, 43, 68-70].

Створення композиційних покриттів дозволить виготовляти деталі з дешевих і недефіцитних матеріалів при забезпеченні їх необхідними експлуатаційними властивостями, і тим самим підвищити термін їх строку служби. Працездатність робочих поверхонь деталей залежить від узгодженості термомеханічних характеристик матеріалів деталі та покриття [78]. При створенні композиційних покриттів необхідно при виборі їх складу враховувати можливість встановлення зв'язків між матеріалом деталі та покриття. При умові, що склад матеріалу заданий наперед, необхідна інформація щодо їх:

- по-перше – високої енергонасиченості матеріалу;
- по-друге – стабільної формованості з отриманням необхідної щільності;
- по третє – правильного підходу в встановленні температурних режимів на кінетичному та термодинамічному рівнях, при яких формується базова структура матеріалу, що забезпечує проектовані функціональні властивості виробу [70, 78].

При виборі КП необхідно враховувати здатність матеріалу деталі до фізико-механічних взаємодій з матеріалом композиційного покриття. Коефіцієнти термічного розширення матеріалу зміцнюємої деталі та матеріалу покриття повинні мінімально відрізнятися для того, щоб міцність зчеплення між покриттям та поверхнею деталі була максимальна.

При підвищенні триботехнічних властивостей деталей СГМ доцільно використовувати КМ на металевій основі з керамічними наповнювачами [42-45, 68]. Вибір КМ на металевій основі обґрунтованій високими значеннями характеристик міцності, модуля пружності та їх збереженням до температур плавлення основного металу. Основна функція керамічних наповнювачів – зміцнення металевої матриці КМ та композиційного покриття в цілому.

Таким чином, в якості матеріалів для нанесення зносостійких композиційних покриттів доцільно використовувати композиційні матеріали, наповнювачами в яких являються дисперсні частинки тугоплавких фаз – оксидів і карбідів. При підвищенні

зносостійкості РО і деталей СГМ доцільно використання композиційних матеріалів систем:

- метал (сплав) – тугоплавке з'єднання металоїду: Сг-WC, Ni-WC, Ni-Cr_3C_2; (Ni-Cr-B-Si)-WC та ін.;

- метал (сплав) – оксид: Ni - Al_2O_3; Mo - Al_2O_3 та ін.

Деякі дані про композиційні матеріали, що використовують для підвищення зносостійкості РО і деталей СГМ, представлені в таблиці 1.3 [42-45, 68].

Таблиця 1.3

Композиційні матеріали для зносостійких покриттів

Матеріал	**Марка**	**Склад по масі %**
Нікель-карбід вольфраму	ВНП-15, ВНП-20, ПКВН-20 ПКВН-30 ПКВН-40, ПКВН-50	Ni - 15...20 Ni - 20...50
Нікелевий сплав - карбід вольфраму-алюміній	ПТ-19НВК-01	W - I6...20 AL - 8
Нікель-окисел алюмінію	ПОАН-70, ПОАН-50, ПОАН-30	Ni - 70...30
Нікель-карбід хрому і карбід титану	ПКХТН-40, ПКХТН-30, ПКХТН-20	Ni - 40...20
Нікель-карбід титану	КТНП-35	Ni - 35
Нікель-карбід хрому	КХНП-20, КХНП-25 КХНП-30, КХН-15, КХН-30	Ni - 20...30 Ni - 15...30
Нікель-алюміній-карбід вольфраму	НАКВ-20, НАКВ-2 НАКВ-30	WC - 70...80
Нікель-алюміній-карбід титану	НАКТ-20, НАКТ-2S, НАКТ-30	TIC - 70…80
Нікель-алюміній-карбід хрому	НАКХ-20, НАКХ-25, НАКХ-30	Cr_3C_2 - 70...80

Доцільно в якості матеріалів для створення КП застосовували такий їх склад: матриця - ПГ-С1, ПГ-СР3; наповнювач - ферохром вуглецевий ФХ-800, карбід хрому

(табл. 1.4) [42, 43, 68, 79]. Для зміцнення ріжучих кромок робочих органів СГМ використовують твердий сплав “Сормайт”.

Таблиця 1.4

Матеріали для зміцнення робочих органів і деталей СГМ

Вид зносу та умови роботи	**Рекомендований матеріал для зміцнення**		**Товщина шару, мм**
	Наповнювач	Матриця	
Абразивний знос у поєднанні з ударними навантаженнями	ФХ-800	ПГ – С1	1,5 – 3,0
Абразивний знос у середовищі ґрунту в поєднанні з вимогами доброї підрізки рослин	ФХ-800	ПГ-СР3	1,5 – 2,0
Переміщення у рослинній масі, що містить абразивні частки та подрібнення силосної маси, соломи, рихлення ґрунту	ФХ-800	ПГ – С1 ПГ-СР3	1,0 – 1,5

Для зміцнення та відновлення деталей, що при експлуатації піддаються абразивному та корозійно-механічному зношуванню, в якості матеріалів покриттів і у вигляді легуючих добавок до них використовують феросплави (табл. 1.5).

Доцільність застосування в складі КМ феросплавів обгрунтована їх невисокою вартістю, доступністю та можливістю підвищувати експлуатаційні властивості деталей і робочих органів сільскогосподарських машин (табл. 1.5) [42, 43, 68, 79]. Феросплави можуть використовуватись як в чистому вигляді, так й у вигляді легуючих добавок [42, 43, 68, 79]. Високі властивості феросплавів забезпечують хром, титан, бор, марганець, молібден, вольфрам та ін. матеріали, що входять до їх складу (табл. 1.5) [42, 43, 68, 79].

Таблиця 1.5

Хімічний склад компонентів композиційного покриття

Матеріал	**Вміст хімічних елементів, %**							
	Fe	Cr	C	Si	Mn	Ni	P	S
Наплавочний сплав ПГ-С1	основа	28,7	3,17	3,20	0,70	3,51	0,04	0,04
Ферохром вуглецевий ФХ-800	основа	65,6	7,8	2,0	-	-	0,07	0,04
Карбід хрому	-	До 85	15,0	-	-	-	-	-
Карбід вольфраму		До 85	15,0					

Вирішення поставленої проблеми підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ шляхом нанесення композиційних покриттів тісно пов'язане не тільки з вибором композиційного матеріалу, а і з способом його нанесення.

1.4. Вибір способу формування композиційних покриттів.

Для вибору способу отримання зносостійких композиційних покриттів і його експлуатаційного призначення, необхідне глибоке знання механізмів їх руйнування та впливу на міцність деталей. Відмінність властивостей матеріалу деталі й покриття і формування перехідної зони на межі контакту покриття з основою (деталлю) змушує розглядати систему «деталь (основа) – покриття» як конструкцію [80]. Оцінку напружено-деформованого стану поверхонь і деталей з композиційними покриттями, вибір критеріїв граничного стану та довговічності покриттів [80] ускладнює характер зміни властивостей матеріалу деталі на межі перехідної зони між поверхнею деталі та покриття [80].

Вибір методу формування КП визначається наступними основними чинниками: умовами експлуатації СГМ; конструкцією деталі; видом матеріалів деталі й складом композиційного покриття; економічною доцільністю [43, 68, 80-82]. Як було повідомлено в [81, 83-85] на виробництві серед традиційних способів нанесення покритів переважають різні види наплавлення (табл. 1.6).

Таблиця 1.6

Способи наплавлення. Основні їх характеристики

Назва способу	ЗТВ, мм	Продуктивність, $см^2$/хв.	Адгезійна міцність, МПа
Наплавлення під флюсом	2,5...6,2	55...75	170...220
Наплавка у середовищі вуглекислого газу	2,6…3,5	65...85	70... 110
Газова наплавка	1,7...3,3	25…50	90...140
Електроконтактне наплавка	0,2...0,4	до 120	180...190
Плазмове наплавлення	0,4...0,6	50...70	210...240
Вібродугова наплавкае	0,7...2,2	30...35	150...170

Більшість способів наплавлення (табл. 1.6) не спроможні формувати бездефектну структуру наплавленого покриття. Відновлення сталевих деталей наплавленням потребує зняття внутрішніх напружень шляхом нагрівання поверхонь деталей перед наплавленням та наступною ТО. Наплавленні покриття потребують механічної обробки. Деталі та покриття після наплавлення втрачаються свої початкові властивості на 20-30%.

Захистити деталі та РО СГМ і підвищити їх зносостійкість можна шляхом нанесення покриттів методами газотермічного напилення (ГТН) [81, 86-95]. Різновид технологічних способів напилення (табл. 1.7) дозволяє отримувати композиційні покриття різного призначення.

Таблиця 1.7

Характеристика способів напилення

Характеристика	**Назва способу напилення**			
	Електродугове напилення	ГПН	Плазмове напилення	Детонаційне напилення
Продуктивність, кг/год	5...30	2...8	0,7...7,0	0,2...6,5
КВМ	0,8...0,85	0,6...0,7	0,5...0,8	0,4..0,7
Адгезійна міцність, МПа	До 80	до 40	до 50	до 220
Температура деталі при напиленні, С	110...150	80...140	140...180	120...150

Сучасне обладнання для ГТН дозволяє наносити покриття з дисперснозміцнених КМ і комбінацію волокнистих матеріалів із дисперснозміцненою матрицею [81]. Як матеріали зносостійких покриттів для ГТН використовують системи самофлюсуючі сплави на основі нікелю й заліза, нихром, композиційні матеріали та ін. [86-90]. Поверхневе зміцнення деталей методами HVOF [95] й активованим електродуговим напиленням (ЕДН) [86-90] істотно підвищує триботехнічні характеристики деталей.

Однак процес напилення має слідуючи негативні властивості: не достатньо високий КВМ, тому не доцільно зміцнювати малогабаритні поверхні; обов‘язкова підготовка поверхні перед напиленням, низька адгезійна міцність покриттів, несприятливі умови праці при попередній підготовці поверхні та при самому напиленні [81].

Для підвищення триботехнічних характеристик робочих поверхонь деталей СГМ, на які неможливо нанести покриття методами ГТН (внутрішні поверхні деталей та ін.) використовується метод мікродугового оксидування (МДО) [81, 96-98]. В процесі МДО на зміцнюємих поверхнях утворюються оксиди, що сприяє підвищенню їх зносостійкості.

Для підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ використовують модифікування їх поверхонь імпульсним іонним азотуванням (ІІА) [99-102]. Шляхом ІІА на робочих поверхнях РО і деталей утворюються нітриди. Композиційні покриття на основі нітридів (наприклад, TiCN-AlN-SiC та ін.) дають можливість значно підвищити триботехнічні і корозійні властивості робочих поверхонь зміцнюємих деталей [103-106]. Імпульсне іонне азотування підвищує триботехнічні властивості деталей, а саме, знижує інтенсивність зношування зміцнюємих поверхонь в 50…60 разів при збільшенні довговічності деталей в 1,5…2 раза. Квазі- та нанокристалічні інтерметалідні фази покриттів забезпечують поєднання високої твердості, імпульсним іонним азотуванням деталей [41, 42, 51, 80-82, 96, 107-110].

Поверхні після лазерного модифікування порошками нікелю Ni та карбіду титану TiC характеризуються інтенсивністю зношування на порядок нижчою, ніж у незміцнених поверхнях.

Для поверхневого зміцнення РО і деталей СГМ використовують методи поверхнево-пластичного деформування (ППД). Наприклад, ППД поверхні роликами підвищує її зносостійкість та опір втоми [41, 42, 51, 80-82, 87, 96,].

Літературний огляд способів зміцнення та відновлення РО та деталей СГМ шляхом нанесення композиційних покриттів показав [42-45, 68-70, 74, 76, 77, 80-82,

109, 110], що необхідно проводити аналіз технологій формування КП, таких їх показників, як вартість обладнання та його енергоємність, екологічний вплив технологій на довкілля.

Проведений аналіз умов експлуатації РО та деталей СГМ [9-28] дозволив сформулювати основні вимоги до технологічного процесу (ТП) нанесення композиційних покриттів: 1) невелика зона термічного впливу (ЗТВ) з метою зниження короблення деталей; 2) незначні втрати зміцнюючого матеріалу покриття; 3) нанесення покриттів без використання захисних сполук [38].

Сформульованим основним вимогам до ТП формування композиційних покриттів на поверхнях РО та деталей СГМ відповідає метод електроіскрового легування (ЕІЛ) [42, 43, 80, 81, 96, 111-114].

1.5. Формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування. Характеристика процесу, його переваги та особливості.

Електроіскрове легування (ЕІЛ) – це метод поверхневої обробки матеріалів, який використовує високоенергетичні електричні розряди для переносу матеріалу з електрода на поверхню оброблюваної деталі. Суть методу полягає в тому, що під впливом високоенергетичних імпульсів відбувається локальне плавлення і часткове випаровування матеріалу електрода, який переноситься на поверхню деталі, формуючи покриття з заданими властивостями [115-118]. Цей процес дозволяє створювати зносостійкі, корозійностійкі та термостійкі покриття на різних матеріалах, включаючи метали, сплави, кераміку та інші тверді матеріали.

При електроіскровому легуванні металевих поверхонь в процесі протіканні електричного розряду в газовому середовищі (рис. 1.5) відбувається електрична ерозія та перенос матеріалу електрода на поверїню деталі.

Рис. 1.5. Процес електроіскрового легування.

Між електродом (інструментом) і деталлю ЕІЛ виникають короткотривалі електричні розряди. Матеріал електрода під впливом цих розрядів розплавляється та переноситься на поверхню деталі. За своєю сутністю розряд сам по собі є типовим імпульсним розрядом, який іноді називають конденсованою іскрою. Імпульсний розряд «конденсована іскра» був використаний Б.Р. Лазаренко [115, 116] – автором методу електроіскрового легування [115, 116].

Розвиток імпульсного розряду починається зі зближення електроду-інструменту з деталлю. При відстані між електродом-інструментом і деталлю, рівній або більшій пробивній, починається процес ЕІЛ, який триває і завершується вже при контакті електродів.

При ЕІЛ відбувається наступні процеси [115-118]: руйнування матеріалу електрода (анода); перенесення продуктів ерозії електрода на поверхневий шар деталі (катоду); утворення на зміцнюємій поверхні деталі шару, що включає дифузійну зону і зону термічного впливу (ЗТВ); зміцнюєма поверхня набуває новий рельєф; відбувається зміна розміру виробу; формування поверхневого шару з підвищеними властивостями.

Кількість перенесенного матеріалу покриття при ЕІЛ, товщину покриття та його адгезію до матеріалу зміцнюємої деталі визначають – струм, напруга, тиск у розрядному проміжку, частота і тривалість імпульсів процесу електроіскрового

легування. Енергію, що виділяється під час розряду в процесі ЕІЛ, визначає струм розряду. Інтенсивність переносу матеріалу відбувається при більшому струмі, однак більший струм викликає термічні напруження та тріщини, впливає на якість і структуру покриття та в цілому на поверхню зміцнюємої деталі [111-123]. Інтенсивність та тривалість термічного впливу визначають частота та тривалість імпульсів. На товщину покриття та глибину проникнення розряду впливає напруга розряду. На стабільність розряду та ефективність переносу матеріалу впливає тиск у розрядному проміжку [111-123]. Ключовим фактором ефективності електроіскрової обробки є контроль параметрів процесу.

На сьогоднішній час метод ЕІЛ використовується для зміни у заданому напрямі фізико-механічних, триботехнічних і експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей.

Електроіскрове легування, в порівнянні з іншими процесами нанесення покриттів, має ряд істотних переваг[115-122]:

- висока адгезія легованого шару з основним матеріалом;
- можливість використання в якості електродів матеріалів з високими фізико-механічними характеристиками (КМ, тверді сплави, тугоплавкі матеріали);
- високий коефіцієнт переносу електродного матеріалу (60...80%);
- економія використання матеріалів з високою вартістю;
- відсутність попередньої обробки поверхні, перегріву і деформацій деталі в процесі обробки;
- простота проведення процесу;
- - нанесення покриття з автоматизацією процесу та у ручному варіанті;
- можливість локального формування покриття в зазначених місцях із будь-яких струмопровідних матеріалів без перегрівання та деформації деталі;
- екологічна чистота процесу;
- застосування простого в експлуатації малогабаритного устаткування;
- невисока вартість та низька енергоємність обладнання.

Приклад переваги електроіскрове легування, в порівнянні з наплавленням, представлено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8

Переваги процесу електроіскрового легування

Спосіб	**Товщина покриття, *мкм***	**Температура нанесення покриття, °С**	**Тривалість процесу, продуктивність**	**Необхідність в попередній та фінішній обробці**	**Витрати на процес**
ЕІЛ	15 −1000	30 − 42	0,25 – 12 $см^2$/хв.	-	1 – 3 кВт/год
Наплавка	5000	1120	0,2 – 10 $см^2$/хв.	необхідно	Затрати в 15 – 20 разів більші, ніж при ЕІЛ

Основна особливість способу ЕІЛ - дискретний характер процесу [115, 123-125]. Так, одиничний електричний розряд забезпечує стабільність фізико-механічних властивостей окремої ділянки покриття. Величина робочого струму дозволяє регулювати глибину проникнення покриття в зміцнюєму поверхню, висоту та довжину одиничної ділянки.

Забезпечити зміну розмірів ділянок ЕІЛ-покриття та глибину їх впровадження можна шляхом зміни напруження та величину струму. Суцільність і товщина ЕІЛ-покриття забезпечують необхідні експлуатаційні властивості зміцнюємих поверхонь деталей.

Топографія ЕІЛ-покриття на робочій поверхні деталі створюється шляхом переміщення електродів. Регулювати суцільність покриття на робочій поверхні деталі можна змінюючи величину робочого струму, частоту імпульсів і швидкість анода і катода [126-139].

Процес електроіскрового легування має наступні переваги [115-118, 123-139]:

- підвищує зносостійкість поверхонь тертя при трибофатичних навантаженнях за рахунок використання явища структурно-енергетичної

пристосованості матеріалів під час тертя та створення мікрогеометрії поверхні тертя, яка зберігає фрагменти руйнувань вторинних структур;

- виключає концентрацію напружень від контактних навантажень і перериває процес тріщиноутворення;

- знижує схильність до схоплювання деталей, що суттєво підвищує міцність і експлуатаційну здатність пар тертя;

- дає можливість отримання низького коефіцієнту тертя й зносу і мінімізувати НДС поверхні шляхом зміни суцільності та розмірів дискретних ділянок на зміцнюємій поверхні деталі;

- дозволяє досягти високу адгезійну та когезійну міцність покриття з поверхнею деталі шляхом керування величинами нормальних напружень в покритті та дотичних на межі контакту покриття з поверхнею деталі;

Порівняльно невелика продуктивність процесу ЕІЛ обумовлює специфіку його практичного використання – зміцнення невеликих за площею ділянок, тобто локальне нанесення покриттів.

Для формування покриттів методом ЕІЛ можуть використовуватися електроди з металів, сплавів та композиційні матеріали. Властивості покриттів забезпечують матеріалом електроду. Розробка електродних матеріалів (ЕМ), фазовий та хімічний склад яких відповідають структурі та складу матеріалу зміцнюємої поверхні деталі, – один із провідних напрямів розвитку технології ЕІЛ [139 - 151].

Сучасні тенденції методу ЕІЛ полягають в застосуванні новітніх електродних композиційних матеріалів. В ІПМ імені І.М. Францевича НАН України розроблено ряд композиційних матеріалів для електродів на основі карбідів та боридів титану, молібдену, хрому і вольфраму та сплавів, що самофлюсуються: FeNiSi–Cr3C2, WC–TiC–Mo2C–Co–Cr та WC–TiC–Co–Cr–Ni–Al, TiC-(Fe–Cr–Si–Al), NiCrBCuC–WC, FeNiCrBSiC–TiB2 та FeNiCrBSiC–CrB2 [139-151].

Позитивний ефект композиційних покриттів, які отриманні методом ЕІЛ, перш за все виявляється в більш високій твердості, у порівнянні з матеріалом деталі, покриття

знижують поширений вид зносу – абразивний, одночасно знижуючи при цьому коефіцієнт тертя.

Метод електроіскрового легування використовується для зміцнення конструкційних сталей, чавунів і бронз [127-131]. Відомі приклади зміцнення титанових сплавів [132-134]. Електроіскрові покриття з унікальними властивостями можна створити шляхом керування параметрів процесу ЕІЛ. У звязку з цим ЕІЛ – універсальний та ефективний метод, за допомогою якого можна покращити поверхневі властивості деталей СГМ [118, 135-138].

Спосіб ЕІЛ на практиці знаходить застосування для зміцнення та відновлення поверхні валів під підшипники ковзання та кочення. Метод ЕІЛ може бути використаний для зміцнення поверхні поршнів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) [118, 135-138].

Таким чином, відповідно основним вимогам до технологічного процесу зміцнення та відновлення робочих органів і деталей СГМ, а також аналізу методів нанесення ЗЗП, доцільно підвищувати їх триботехнічні властивості шляхом формування на робочих поверхнях композиційних покриттів методом електроіскрового легування.

Висновки по першому розділу. Мета і задачі дослідження.

1. На основі аналізу умов експлуатації сільскогосподарських машин і основних факторів, які визначають вид зношування їх робочих органів і деталей, показано, що довговічність СГМ знаходиться в прямій залежності від здатності робочих органів і деталей протистояти абразивному та корозійно-механічному руйнуванню.

2. Показано, що перспективним шляхом підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ є застосування зміцнюючих захисних покриттів і створення композиційних структур із мінімальним зносом.

3. Доведено, що найбільший вплив на властивості композиційних покриттів і відповідно зміцнюємих і відновлюємих робочих поверхонь деталей та РО СГМ чинить склад КП та спосіб його отримання.

4. Показано, що вибір методу формування композиційних покриттів визначається наступними чинниками: умовами експлуатації СГМ; конструкцією деталі; матеріалом деталі, складом композиційного покриття; економічною доцільністю.

5. Проведено літературний огляд способів зміцнення та відновлення шляхом формування композиційних покриттів, який дозволив сформулювати основні вимоги до технологічного процесу їх нанесення на робочі поверхні деталей СГМ.

6. Аналіз методів нанесення КП дозволив зробити висновок, що основним вимогам до ТП формування КП на зміцнюємих поверхнях РО та деталей СГМ відповідає метод електроіскрового легування.

Таким чином, формування композиційних покриттів електроіскровим легуванням є однією з актуальних задач в проблемі підвищення триботехнічних властивостей деталей СГМ

Висновки по першому розділу дозволяють сформулювати мету роботи.

Мета роботи – експериментальні та теоретичні дослідження процесу підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування.

Для виконання поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

- проаналізувати умови експлуатації сільськогосподарських машин і довговічність їх деталей і робочих органів залежно від їх зносостійкості та корозійної стійкості;

- обгрунтувати, що нанесення зносостійких покриттів із композиційних матеріалів є найбільш раціональним і економічно доцільним вирішенням проблеми підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин;

- довести доцільність формування композиційних покриттів методом електроіскрового легування, сформулювати його особливості, переваги та потенційні можливості;

- проаналізувати напружений стан між композиційним покриттям і поверхнею деталі та в самій деталі моделюванням напружено-деформованого стану та визначити оптимальні значення товщини та суцільності покриття;

- визначити вплив режимів процесу електроіскрового легування на параметри і властивості покриттів;

- дослідити триботехнічні характеристики поверхонь з композиційними покриттями в залежності від режимів процесу електроіскрового легування;

- встановити залежність триботехнічних властивостей композиційних покриттів, сформованих методом електроіскрового легуванням, від їх товщини їх суцільності;

- показати доцільність використання композиційних електроіскрових покриттів для підвищення триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин.

РОЗДІЛ 2
ЗАГАЛЬНА СХЕМА, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі представлена загальна схема і методи досліджень, обґрунтовано вибір матеріалів і обладнання для формування композиційних покриттів з метою підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин.

2.1. Загальна схема досліджень.

Проблема підвищення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин вирішувалась шляхом поєднанням досліджень: умов експлуатації СГМ і причин виходу з ладу їх деталей та робочих органів; композиційних матеріалів, вибраних для зміцнення їх робочих поверхонь і способу їх формування; фізико-механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь деталей та робочих органів сільськогосподарських машин, зміцнених композиційними покриттями (рис. 2.1), що були поєднанні в єдину структурну схему.

Методологія проведених досліджень передбачала використання комплексу методів і методик:

- експериментально-статистичного та обчислювального експерименту;
- обладнання для електроіскрового легування та матеріалів для отримання композиційних покриттів;
- металографічного і рентгеноструктурного аналізу поверхонь після електроіскрового легування;
- визначення мікротвердості зміцнених поверхонь експериментальних зразків і робочих поверхонь деталей СГМ;
- дослідження напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями з використанням чисельних розрахунків;
- визначення триботехнічних властивостей поверхонь з покриттями.

Рис. 2.1. Загальна схема досліджень.

Комплекс методів досліджень включає в себе:

- метод електроіскрового легування:

- методи визначення фізико-механічних характеристик поверхонь деталей з композицйними покриттями;

- методи металографічних і рентгеноструктурних досліджень;

- чисельні дослідження напружено-деформованого стану поверхонь з покриттями;

- дослідження триботехнічних характеристик поверхонь з КП;

- визначення залежності фізико-механічних характеристик поверхонь деталей з композицйними покриттями від параметрів процесу ЕІЛ і складу матеріалу, вибраного для формування КП.

При проведенні досліджень використовували як стандартні, так і оригінальні методи і методики, захищені патентами України.

Методи обробки статистичних даних використані з метою скорочення обсягу експериментальних робіт.

2.2. Обладнання для створення композиційних покриттів. Характеристика установки та інструменту для електроіскрового легування.

Формування композиційних покриттів методом ЕІЛ здійснювали на установці «Елітрон-22» (рис. 2.2).

Рис. 2.2. Установка «Елітрон-22» для електроіскрового легування.

Основні характеристики установки «Елітрон-22» представлені в таблиці 2.1. Тип генератора – транзисторно-теристорний; габарити – 450х315х170 мм; вага – 2,2 кг [116-118, 139].

Таблиця 2.1

Технічні характеристики установки«Елітрон-22»

Найменування характеристики	**Установка**
	«Елітрон-22»
Напруга живлення від однофазної мережі змінного струму частотою 50 Гц, В	220±10%
Споживання потужності при номінальній напрузі мережі, кВА	1 - 3
Кількість технологічних режимів	9
Частота вібрації електрода вібратора, Гц	100 - 200 ±10
Продуктивність на найпотужнішому режимі, $см^2$/хв	0,25 – 12
Товщина покриття, що наноситься, мкм	15 −1000
Шорсткість поверхні (R_a) покриття, мкм	3,2-12,5
Габаритні розміри генератора, мм	450х315х170
Вага, кг	2,2

Створення імпульсів струму, живлення обмотки вібратора, контроль та управління технологічним процесом електроіскрового легування здійснюється генератором імпульсів струму з ємнісним накопичувачем енергії (рис. 2.3) [116-118].

Механічна частина установки (рис. 2.3) включає електрод-інструмент і механізми кріплення й руху деталі та відносного переміщення електродів. Електрод-інструмент з’єднаний з приводом, струмопроводом, механізмами кріплення та передачі руху електродів (електродоутримувачем) [116-118].

Електрична частина установки крім генератора (рис. 2.3) складається з блоків автоматичного регулювання відстанню між електродами та управління відносним переміщенням електродів-інструментів і рухом деталі [116-118]. Комутація зазору поміж електродами здійснюється за рахунок вібрації електрода-анода. При цьому електрод, який здійснює коливальний рух з частотою 50 – 100 Гц, контактує з поверхнею деталі-катода. Вібруючий електрод контактує з поверхнею, що обробляється, і при цьому відбувається розряд. Кінематика електрода повністю визначає частоту розрядів і тривалість їх контактування.

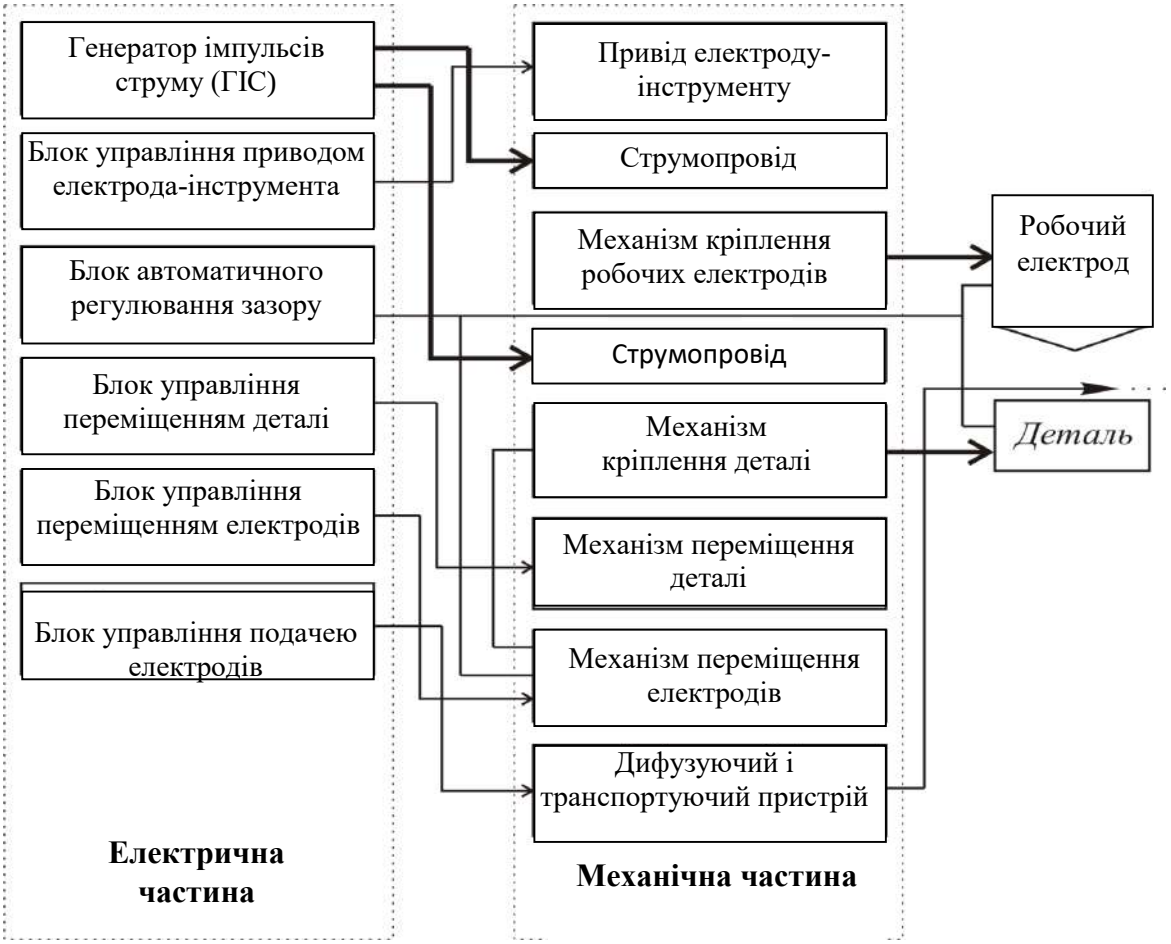


Рис. 2.3. Структурна схема установки «Елітрон-22».

В установках для ЕІЛ використовуються електромагнітні, електродинамічні й пневматичні збудники. В установці «Елітрон-22» використовується електромагнітний збудник [116-118], який створює вібрації частотою 100, 300 та до 1000 Гц і вище [116-118].

Практика використання методу ЕІЛ показала, що для отримання покриттів із необхідними заданими властивостями необхідно вибрати оптимальний технологічний прийом, режим обробки, міжелектродне середовище, матеріал легуючих електродів.

Електроди-інструменти, використовувані для електроіскрового легування поділяють на інструменти з детермінованим контактуванням і інструменти зі статичним контактуванням [116-118, 139].

На процес формування поверхневого шару істотно впливають параметри, розміри і форма електрода-інструменту, що завжди повинно враховуватися при виборі режиму процесу електроіскрового легування. Електроди-інструменти характеризуються наступними параметрами [116-118]:

1) тривалість контакту електродів – τ; 2) шлях контакту – l;

3) критерії, які характеризують умови контакту електродів-інструментів:

$$L_1 = \frac{l_n}{l_p}; T_1 = \frac{\tau_n}{\tau_p}; L_2 = \frac{l_p}{l_n + l_{к-з}}; T_1 = \frac{\tau_p}{\tau_n + \tau_{к-з}};$$

де l_n, τ_n, l_k, τ_k – інтервали шляху й часу, при яких імпульси струму реалізуються в умовах проміжку між електродами і контакту між електродами;

$l_{к-з}, \tau_{к-з}$ – повний шлях і час руху електродів в короткозамкненому стані відповідно;

параметри L_1 і L_2 визначають ступінь використання робочого імпульсу струму в режимі, коли розряд протікає в проміжку між електродами, і приймає значення в інтервалі від нуля до одиниці;

параметри T_1 і T_2 характеризують ефективність використання шляху і часу контактування електродів. Їх значення лежать в інтервалі від нуля до одиниці для різних електродів-інструментів і змінюються в процесі їх експлуатації.

Параметри L_1, L_2, T_1 T_2, розміри і форма електродів-інструментів істотно впливають на процес формування шару покриття на зміцнюємій поверхні і повинні враховуватися при виборі електрода-інструменту та режиму його роботи [116-118].

Параметри установок для електроіскрового легування (енергія розряду, частота) вибирають, виходячи з вимог до якості зміцнюємої поверхні. Коли немає небезпеки утворення мікротріщин на поверхні катода в результаті впливу на нього імпульсного розряду, то використовують режим з великою енергією імпульсів. Режими з енергією імпульсу не більш 0,2 Дж використовують для сплавів, схильних до утворення тріщин [116-118, 139]. Режим контакту для електродів може тривати і після закінчення імпульсу робочого струму [116-118, 139].

В роботі розглядали модельні пари 1) «покриття з карбіду вольфраму – основа зі сталі», 2) «покриття з карбіду хрому – основа зі сталі», 3) «покриття з ніхрому – основа зі сталі».

2.3. Вибір матеріалів покриттів для досліджень.

Після вибору способу нанесення композиційних покриттів для підвищення експлуатаційних властивостей деталей, необхідно вибрати доступний і зносостійкий матеріал для таких покриттів [68-77, 79, 140-147].

Композиційний матеріал покриття впливає на фізико-механічні, триботехнічні та експлуатаційні властивості робочих поверхонь деталей [68, 80, 139-147].

Так як зниження терміну експлуатації сільськогосподарських машин СГМ визначається зносом їх деталей і робочих органів (розділ 1), тому у вимогах до вибору матеріалу для покриттів повинен обґрунтовуватися вид зносу, і він повинен базуватися на багатогодинних випробуваннях деталей на зношування [140]. Умови впливу середовища і руйнування робочої поверхні деталей зумовлюють необхідний склад, будову, фазовий стан і властивості матеріалу покриття. Властивості матеріалів впливають на триботехнічні властивості в конкретних умовах експлуатації деталей вузлів та агрегатів і можуть змінити підхід до вибору матеріалів для цих умов роботи [140].

Вибором матеріалу покриття обумовлена ефективність процесу його нанесення, а у нашому випадку – електроіскрового легування. Композиційні матеріали для електродів визначають властивості покриттів, що формуються.

Вибір матеріалу електроду – одна із основних задач, що має вирішуватися при формуванні покриттів методом ЕІЛ. При виборі матеріалу електроду необхідно врахувавати багато факторів, що впливають на формування композиційних покриттів: фізико-хімічна взаємодія матеріалів електродів з матеріалом зміцнюємих поверхонь деталей; утворення структур на робочій поверхні аноду; зворотній масоперенос, схоплювання електродів. Всі ці фактори впливають на неаддитивність

процесів ерозії і формування покриття. В залежності від умов експлуатації деталей та вимог до покриття вибирають матеріал електродів.

Хімічний склад, структура та властивості покриття. залежить від вибору матеріалів електродів для ЕІЛ. В процесі електричних розрядів легуючі елементи, що входять до складу матеріалу електродів, переносяться на поверхню зміцнюємої деталі. Склад електродних матеріалів визначає властивості покриття (зносотійкість, корозійну стійкість та інші) [140, 145, 146].

Вибору електродних матеріалів для ЕІЛ присвячена достатня кількість робіт [140-151]. При ЕІЛ можуть використовуватися будь-які електропровідні матеріали. Електродні матеріали для забезпечення ефективності процесу ЕІЛ повинні відповідати наступим вимогам:

- мати високу електропровідність для забезпечення стабільності електричних розрядів і для ефективного переносу матеріалу електрода за поверхню зміцнюємої деталі;

- мати термічну стабільність без значного руйнування електродного матеріалу та витримки високих температур під час розрядів;

- мати хімічну сумісність матеріалу електроду з матеріалом зміцнюємої деталі для утворення стабільних фаз з метою покращення властивостей покриття;

- мати механічну міцність для збереження форми й структури при високих температурах і механічних навантаженнях під час процесу ЕІЛ [140, 145, 146].

Сформувати композиційне покриття з необхідними експлуатаційними властивостями та досягти ефективності процесу електроіскрового легування можливо при оптимальному виборі матеріалу електроду [140-146].

Наприклад, електродні матеріали, до складу яких входить хром та нікель, використовують для формування покриттів на деталях, що працюють в агресивних і корозійних середовищах. Для підвищення зносостійкості робочих органів і деталей СГМ доцільно використовувати електроди з твердих сплавів або композиційних матеріалів [140-146].

Дослідження, проведені багатьма авторами [139-151], дозволили зробити висновок, що електроди з різних матеріалів впливають на експлуатаційні властивості покриттів (шорсткість, жаростійкість, зносостійкість і т.д.).

В таблиці 2.2 представлені електродні матеріали, що застосовуються для ЕІЛ [139-151].

Таблиця 2.2

Електродні матеріали, що використовуються при ЕІЛ

Матеріал анода	**Матеріал катода**
A1	A1, Cu, Ti, , ВТ20, сталі Ст. 3, 35, У10А, ХВГ
Cr	ВТ2, Cu, сталі 30, 45, 40Х, У10А, ХВГ
Fe	ВТ20, Мо, сталі Ст. 3, 45,
Co, Ni	ВТ20, сталі Ст. 3, 45,
Cu	A1, Cu, сталі Ст. 3, Х18Н10Т
Zr	ВТ20
Ag	Cu, Д16Т, 35ХНЗФ, ВТ6А
Nb, Mo, Ta, W	Сталі 30, 45, У10А, ХВГ, Al, ВТ20
Графіт	Сталі Р18, 65Г, Т15К6
FeCr	Сталі 35, 45, У8А, Х12М, 40Х, 4ХВ2С
TiC, TiB2	Сталі У8А, Р18, Р6М5, 65Г, Fe
Бронзи БрБ2, БрАЖНЦ-9	Чавун, сталі 45, Р18, Х12Ф1, 2Х13
ВК1, ВК2, ВК3, 5ВК6, ВК6М	Сталі 45, У7, 65Г, 5ХНТ, Р18, Р6М5
TiC-Ni-Mo-ДТК	Сталі 45, Х12Ф1
WB, W2B5. WC-Co-B, WC-Co-Ni3Al WC-Co-Ni-Cr-B-Si WC-Co-ДТК WC-Co-Al_2O_3	Сталь 45, Х12Ф1, ВТ20, ВТ3-1
TiN, ZrN, AlN, Si_3N_4	Сталі 45, Ст. 3, Мо

Для ЕІЛ можуть використовуватися електроди з металів, сплавів і композиційних матеріалів. В якості матеріалу електродів знаходять застосування метали, сплави, легкоплавкі метали та тверді сплави [140-151]. Покриття з високими

експлуатаційними властивостями неможливо отримати при використанні електродів із металів та металевих сплавів. Доцільно у якості матеріалів легуючих електродів використовують тверді сплави [139, 140, 146, 148, 149, 151] (табл. 2.2, табл. 2.3).

Для зниження кригкості тугоплавкого з'єднання додають пластифікуючої добавки, наприклад до карбіду вольфраму у сплавах ВК додають кобальт (Co). Таким чином, електродний матеріал є гетерофазним і являє складну композиційну багатокомпонентну систему.

Для підвищення зносостійкості деталей використовують електроди на основі тугоплавких металів з металевою зв'язкою (Т15К6, Т17К12, TiC, WC, Mo_2B_5, CrB_2,ВК6, ВК8). Вони утворюють шар покриття, що має мінімальну схильність до схоплювання при терті. Ці покриття рекомендують для зміцнення робочих органів і деталей СГМ.

Особливість вибору матеріалу електрода для ЕІЛ залежить від фізико-хімічних властивостей катода [145-152]. В даний час рекомендують застосовувати дві групи електродних матеріалів [145-152]:

1) на основі металу з добавками, які використовуються в якості зміцнюючої фази;

2) на основі тугоплавкого з'єднання з металевою добавкою, яка вводиться в якості пластифікуючої зв'язки.

Для обох груп матеріалів головною вимогою формування покриття є утворення необмежених твердих розчинів (інтерметалідів) матеріалами електродів [145-149]. На основі даних про взаємну розчинність металів і тугоплавких сполук в металах з урахуванням принципу вибору компонентів зносостійкої складової матеріалу складені варіанти поєднання елементів матеріалу електроду-інструменту, що забезпечують ефективне формування легованого шару на сталях (табл. 2.3) [120-122, 127-130, 148, 151].

В багатьох випадках для здійснення ЕІЛ металевих поверхонь доцільно застосовувати крім твердих сплавів типу ТК і ВК, КХН15, КХН25, КХН30 (композиційний матеріал, що включає карбід хрому та нікель), ніхром, ферохром,

самофлюсуючі сплави та ін.

Таблиця 2.3

Варіанти поєднання матеріалів основи (матриці) і армуєчих компонентів (наповнювача) легуючого електроду

Матеріал катоду	**Матеріал електроду**	
	Основа	Зв‘язка
Вуглецеві сталі	Cr, Mo, W, TiC, TiB_2, TiN, ZrN, Mo_2C, WC, Mo_2B_5, W_2B_5	V, Cr, Fe, Co, Ni, Mo, C, MgO, NbC, TaC, NiC, CaO
Швидкоріжучі сталі	NiC, NiB_2 TiN, ZrN, WC, W_2B_5	V, Cr, Co, Ni, W, Mo
Титан і його сплави	Cr, Mo,W, Ni, Al, TiC, TiB_2, TiN, ZrN, WC, W_2B_5, NiAl, TiAl, Ni_3Al	V, Cr, Fe, Co, Ni, Mo, Al, Zr, Nb
Сплави алюмінію	Cr, Cu, Al, Fe	Fe, Cu, Si, Zn, Ti

При проведенні досліджень використовували для отримання композиційних покриттів такі матеріали як:

1) карбід вольфраму ВК8 (WC – 8%Co);

2) композиційний матеріал КХН-25;

3) сплав Х20Н80 (Ni-Cr 80/20) –ніхром.

Карбіди характеризуються високою твердістю, зносостійкостю, теплопровідністю [139, 140, 146, 148, 149, 151-157].

При нанесенні покриттів з карбіду вольфраму забезпечуються висока твердість та зносостійкість поверхні деталей. Покриття з карбіду вольфраму використовуються для підвищення зносостійкості ножів, лез та інших ріжучих елементів робочих органів та деталей СГМ, що експлуатуються в умовах абразивного середовища.

Композиційні матеріали, до складу яких входять метали і карбіди, дозволяють отримувати покриття, в яких має місце оптимальний баланс між твердістю, зносостійкістю і міцністю [140]. В композиційному порошку КХН-25 карбід хрому використовують як твердий тугоплавкий наповнювач (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Склад композиційного порошку КХН 25 (% мас.)

Марка сплаву (тип)	Карбід хрому (% мас.)	Нікель (% мас.)
КХН-25 (Cr-Ni-C)	73 … 75	22 …25

Сплав Х20Н80 (ніхром: Ni-Cr 80/20) – має добру стійкість до стирання, чинить опір окисленю при температурах до 1200 ^{0}С, забезпечує високу якість поверхні. Сплав Х20Н80 використовується для отримання зносостійкого покриття, що протистоїть корозії та стиранню [140, 146]. Нанесенням ніхрому на зміцнюєму робочу поверхню формують антифрикційний шар, який, знижує коефіцієнт тертя, підвищує зносостійкість, довговічність і надійність роботи деталей тертя СГМ. Нікель підвищує корозійну стійкість і зносостійкість покриттів, захищає поверхні деталей від корозії за рахунок утворення на поверхні стабільних окисних плівок. Для деталей, що працюють при високих температурах доцільно використовувати покриття, до складу яких входять сплави з хромом і нікелем для забезпечення їх термічної стабільності та високої зносостійкості.

Для дослідження мікроструктури, фазових і структурних перетворень в покриттях, отриманих ЕІЛ використовували фізичні методи досліджень [158-162], оптичну металографія, рентгеноструктурний аналіз і растрову електронну мікроскопію [163-165]. Оцінка якості поверхні після електроіскрового легування здійснювалася методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ) [166-169].

2.4. Дослідження мікроструктури, визначення хімічного складу покриттів і розподілу елементів. Методи рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) і скануючої електронної мікроскопії (СЕМ).

Залежно від технологічних режимів процесу формування покриттів методом електроіскрового легування контролювали такі їх параметри: зовнішній вигляд, мікроструктуру, товщину, мікротвердість.

Дослідження мікроструктури починали з приготування шліфів. Приготування шліфів здійснювали за стандартною методикою [163]. Мікроструктуру електроіскрових покриттів вивчали на мікроскопі МІМ-8М та «МеF-3» фірми "Reichert" (Австрія) при збільшеннях '100, '200, '500. Товщину покриття також визначали за допомогою мікроскопа [163]. Метод рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) використовували для визначення хімічного складу покриттів, недосконалостей і включень [164, 165]. Шляхом РСМА здійснювалась генерація рентгенівського випромінювання при попаданні електронного пучка на поверхню досліджуваного шліфа. За допомогою ліній рентгенівського випромінювання ідентифікували хімічний склад матеріалу покриття й основи. Обробка отриманих результатів включала кількісний мікроаналіз, який проводився при прискореній напрузі 20 кВ, струму від 1 до 10 А, куті нахилу площини шліфа до детектора 100^0. Кількісний мікроаналіз полягав у визначенні величини відношення інтенсивності рентгенівського випромінювання досліджуємого елемента в покритті та в основі.

Визначення розподілу елементів здійснювали методом скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) [164, 165] на мікроскопі "CamScan" ("Oxford Instruments", Англія). Дослідження полягали в вивченні спектру з поверхні шліфа та структури поверхні шляхом сканування електронного пучка з реєстрацією рентгенівського випромінювання по кожному елементу матеріалу пориття з побудовою концентраційних кривих їх розподілу. Шляхом зйомки в характеристичному рентгенівському випромінюванні за програмою «Smart map» визначали розподіл елементів в покритті. Кожному з елементів присвоюється умовний колір. Програма «Smart map» дозволяє зрозуміти механізм дифузії елементів покриття в зміцнюєму поверхню.

2.5. Визначення мікротвердості та твердості зміцнених поверхонь.

Мікротвердість ЕІЛ-покриттів визначали за допомогою мікротвердоміра "Micromet-II". Навантаження складало 100 г. Здійснювали навантаження протягом 15 с. Визначення мікротвердості ЕІЛ-покриття виконували за Вікерсом [161, 162]:

$$H_{\mu} = \frac{18540P}{d^2} \text{ МПа} \qquad (2.1)$$

Твердість поверхні вимірювали за допомогою твердоміра ТЕМП – 3. Діапазон вимірювання твердості за шкалами Бринелля (95…460)НВ; Роквелла (22…68)HRC; Віккерса (49…950)HV. При обчисленні твердості користувалися таблицями, в яких наведені значення мікротвердості в залежності від навантаження й довжини діагоналі (чим більше довжина діагоналі, тим менше твердість матеріалу) [161, 162]. Похибка показань приладу 3%.

2.6. Оцінка напружено-деформованого стану системи «зміцнюєма поверхня – електроіскрове покриття»

Для оцінки напружено-деформованого стану (НДС) поверхонь деталей з ЕІЛ-покриттям використовувалися чисельні методи [175, 176], а саме метод скінчених елементів (МСЕ) [175, 176], реалізований в програмі NASTRAN [175, 176] з моделюванням поверхонь деталей з покриттями із урахуванням експлуатаційного навантаження. Оцінку напружено-деформованого стану поверхонь з ЕІЛ-покриттями здійснювали МСЕ в ліцензійному комплексі MSC Visual Nastran for Windows [175, 176].

Для визначення напружень будували модель поверхні деталі з електроіскровим покриттям, граничні умови у вигляді силового навантаження та фізико-механічні властивості матеріалів покриття та деталі [177, 178]. Шляхом моделювання та оцінки напружено-деформованого стану поверхні деталі з композиційним покриттям визначали нормальні напруження, еквівалентні напруження, дотичні напруження та їх оптимальний розподіл залежно від суцільності ЕІП.

Програмне забезпечення NASTRAN – це ліцензований скінченно-елементний комплекс MSC Visual Nastran for Windows, вибір якого обумовлений простотою і універсальністю, використовується для: виконання розрахунків на міцність деталей з покриттями і задач механіки деформованого твердого тіла; аналізу

теплопровідності; теорії коливань; оптимізації конструкції по граничним напруженням [178-182]. Для проведення таких розрахунків скінченно-елементний комплекс MSC Visual Nastran for Windows має всі необхідні інструменти [179].

Оцінка напружено-деформованого стану поврхонь деталей з композиційними покриттями з урахуванням експлуатаційних і технологічних факторів здійснюється згідно наступних етапів:

1) розрахунок напружень, що виникають при нанесенні покриття, від дії силових і температурних навантажень [180-182];

2) визначення залишкових напружень [180-182];

3) дослідження НДС [175-179].

При оцінці напружено-деформованого стану поверхонь з композиційними покриттями необхідно враховувати: властивості матеріалів покриття і деталі та їх геометричні параметри; силові та температурні навантаження, які діють на поверхні з покриттям [175, 177-179].

Метод скінченних елементів (МСЕ) має вирішальне місце в прогнозуванні працездатності поверхонь деталей з композиційними покриттями [178]. Побудова розрахункової моделі та її скінчено-елементної сітки (СЕС) – основний етап скінченно-елементного аналізу [176].

Рішення задач з використанням метода скінченних елементів складається з наступних етапів: 1) побудови розрахункової моделі; 2) створення геометричної комп'ютерної моделі; 3) вибір метода скінченних елементів на основі геометричної моделі; 4) чисельне рішення задачі; 5) аналіз отриманих результатів; 6) фіксація результатів (рис. 2.4) [176, 178].

Побудовою, комбінуванням і редагуванням створювали геометричні моделі. В скінчено-елементну сітку просторових скінченних елементів, з’єднаних між собою в вузли, перетворювали геометричну модель поверхні деталі з композиційним покриттям. Гексагональні та тетраідальні скінченні елементи І-го порядку апроксимації без проміжних вузлів (рис. 2.5, а, б) і ІІ-го порядку з проміжними вузлами на ребрах (рис. 2.5, в, г) використовували для вирішення завдання.

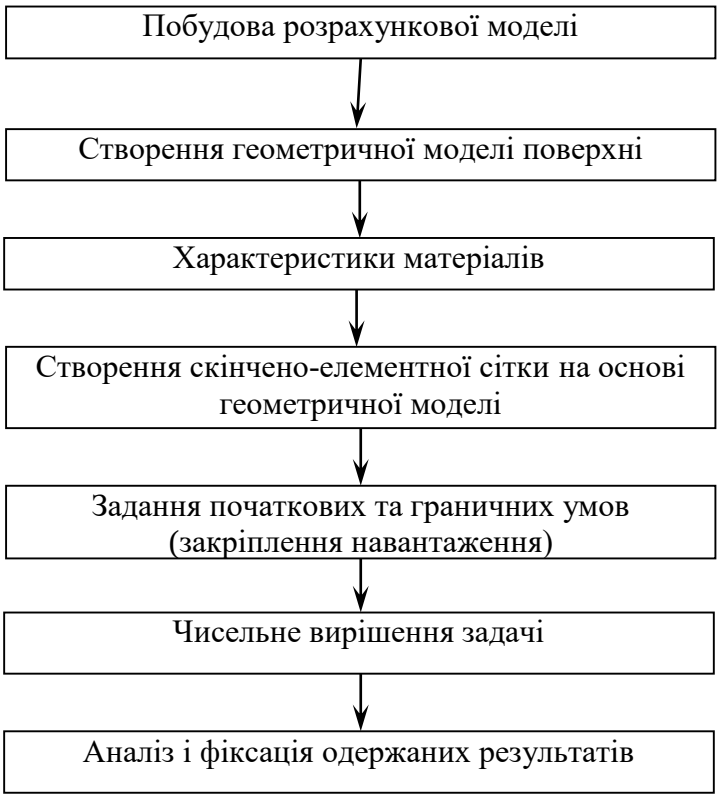


Рис. 2.4. Етапи дослідження тв оцінки напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями МСЕ.

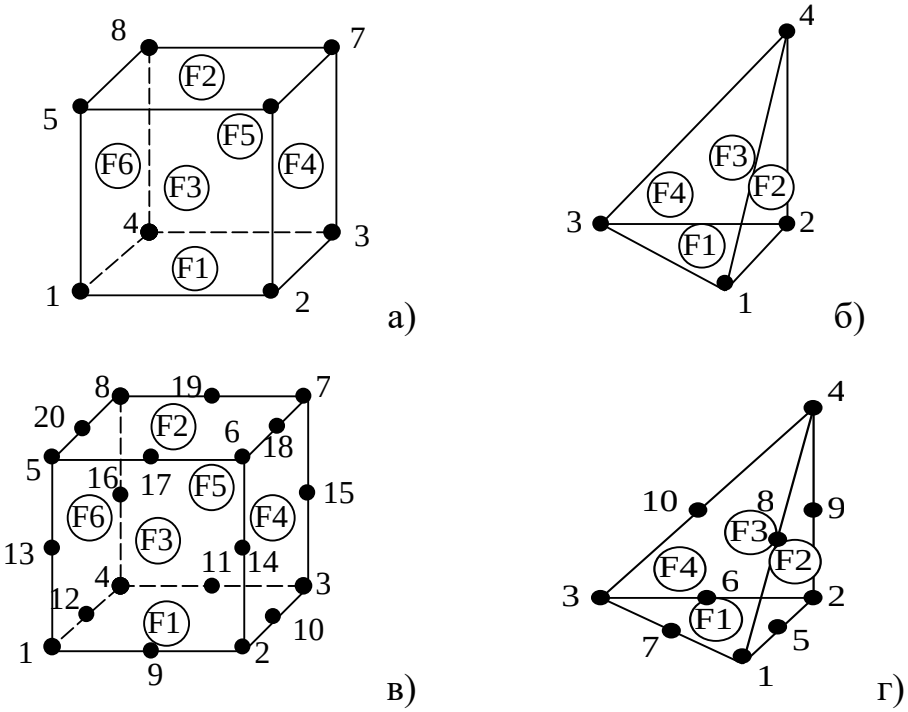


Рис. 2.5. Скінченні елементи та шаблони нумерації вузлів і поверхонь першого (а, б) і другого (в, г) порядку апроксимації [176].

При створенні скінчено-елементної сітки враховували, що великому градієнту деформацій або напружень відповідає найбільш щільна сітка, а більш-менш постійним деформаціям або напруженням менш щільна сітка.

Формулювання та завдання початкових і граничних теплових, кінематичних й силових умов при обмеженні по поступальному переміщенню – важливий етап створення моделі.

Необхідні фізико-механічні властивості матеріалу (коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, коефіцієнт лінійного подовження, щільність, модуль Юнга, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассону та інші) задають в залежності від поставленої задачі (статичне навантаження)

Для моделі поверхні деталі з композиційним покриттям вибирали матеріал деталі й покриття та їх фізико-механічні властивості.

Для визначення геометричних параметрів ЕІЛ-покриття розроблені розрахункові моделі, які представлені в розділі 3.

2.7. Дослідження триботехнічних характеристик деталей з покриттями.

Дослідження триботехнічних характеристик проводили на установці 2070 СМТ-1 (рис. 2.6). В якості триботехнічних характеристик, що підлягали оцінці в процесі випробувань, були обрані коефіцієнт тертя та знос [183-185].

Випробувальна установка, пульт керування та система збору інформації даних для реєстрації в ПК входять до складу машини 2070 СМТ-1 (рис. 2.6, а-г). Випробування полягає в стиранні пари зразків (рис. 2.6, г), які притискаються один до одного із заданою силою (рис.2.6, в). Реєстрування частоти обертання, момента тертя, сили стискання, величини зносу та часу напрацювання здійснюється під час випробувань. Проведення випробувань можливо в різних середовищах при одночасній реєстрації параметрів у числових значеннях. При проведенні випробувань можливе графічне відображення зі збереженням отриманих результатів у програмах Microsoft Word та Microsoft Excel.

а

б

в

г

Рис. 2.6. Машина (а-в) і експериментальні зразки (г) для дослідження триботехнічних характеристик із регістрацією даних в ПК (а).

Для вимірювання триботехнічних характеристик запропонований програмно-технічний комплекс (рис. 2.6), який дозволяє керувати вимірювальним стендом, вводити експериментальні значення, виділяти критичні точки, проводити розрахунки в реальному масштабі часу, графічно або чисельно представляти отримані дані, архівувати масиви інформації в зручному для аналізу форматі. Результати досліджень представлені в розділі 4.

Контактне навантаження при випробуванні становило до 20 МПа. Шлях тертя становив до 1000 м. Величина вагового зносу зразків визначалася втратою ваги при випробуваннях. Втрата ваги визначалася за лопомогою ваг АДВ-200М [186]. Зважування експериментальних зразків проводилося 2-3 рази. Похибка вимірювання ваги зразків складала 0,05 мг.

Випробування покриттів на абразивне зношування здійснювали при використанні абразивних частинок, що закріплені не жорстко [187]. При використання даного методу випробувань тертя досліджуваного і еталонного зразків

в середовищі абразивних частинок відбувається в однакових умовах. Абразивні частки подаються в зону тертя й притискаються до зразка гумовим роликом, що обертається. Потім вимірюють знос випробуваного і еталонного зразків, а зносостійкість матеріалу випробуваного зразка оцінюють шляхом порівняння його зносу зі зносом матеріалу еталонного зразка [187-189].

При випробуванні на абразивне зношування покриттів застосовували установку для стендових випробувань досліджуваного і еталонного зразків в середовищі абразивних частинок, схема якої наведена на рис. 2.7.

Від електродвигуна 2 через редуктор 3 ролик 1 приводиться у обертання. Редуктор 3 з'єднаний з електродвигуном за допомогою ремінної передачі 4. Утримувач 5 зі зразком 6 кріпиться на важелі 7 та притискається до ролика 1 із зусиллям, що створюється вантажем 8. Абразив із бункера 9 по лотку 10 надходить в зону тертя. Кут нахилу направляючої лотка 10 становить ($45^0 \pm 2$). Діаметр ролика – 45…50 мм, ширина ролика – 20 ± 0,1 мм.

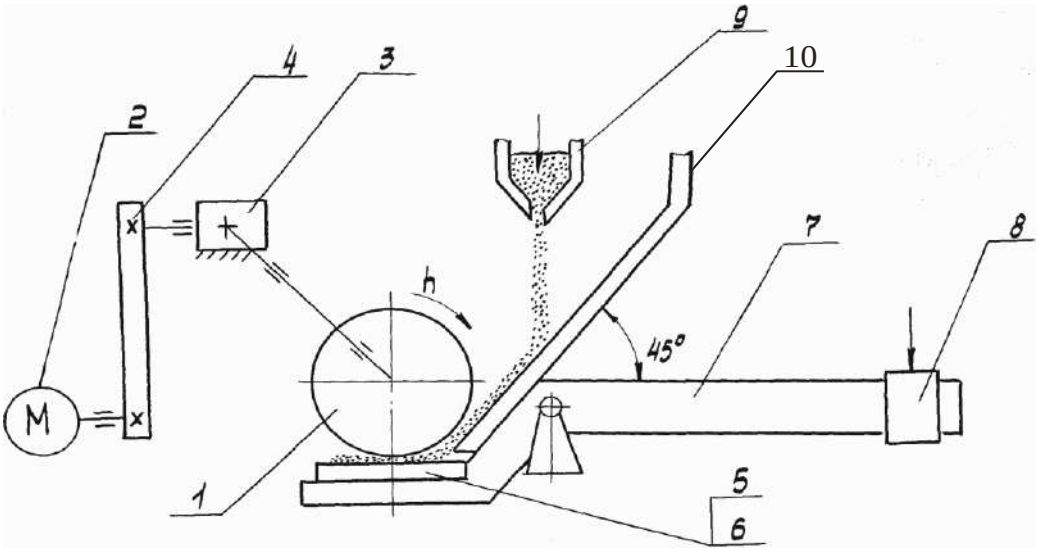


Рис. 2.7. Схема установки для стендових випробувань зміцнених зразків по нежорстко закріпленим абразивним часткам.

Зразки виготовляли у вигляді пластин шириною 30 мм, довжиною 30…50 мм і товщиною 2-3 мм. Твердість абразивних частинок повинна перевищувати твердість

матеріалу не менше ніж у 1,6 рази, Абразивним матеріалом служив карбід кремнію зернистістю до 250 мкм.

Випробування зразка з електроіскровим покриттям здійснювалося протягом часу, що відповідає частоті обертання ролика. Відрахування проводили з початку подачі абразивного матеріалу. Відносну зносостійкість обчислювали за формулою [187]:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta \ell_e}{\Delta \ell_д}\right)\left(\frac{d_e}{d_д}\right)^2 \qquad (2.2)$$

де $\Delta \ell_e$, $\Delta \ell_д$- фактичний лінійний знос еталонного та досліджуваного зразків відповідно, мм; d_e, $d_д$ - фактичний діаметр еталона й зразка, мм.

Відношення абсолютних лінійних зносів допускається замінювати відношенням абсолютних вагових зносів при рівності щільностей матеріалів еталонного та випробуваного зразків [187-189]. При вимірі величини лінійного зносу використовувався мікрометром з ціною розподілу 0,01 мм. Мінімальний абсолютний знос, що підлягає вимірюванню, повинен становити в лінійних одиницях 200 мкм, у вагових - 5 мг [187-189].

2.8. Обробки результатів експериментальних досліджень.

Отримані експериментальні результати містять систематичні і випадкові помилки. Оцінку точності експериментальних результатів проводили за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики [190]. Оцінка точності експериментальних результатів виконувалась в наступній послідовності:

$$\text{вибіркове середнє } \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_1 \qquad 2.3$$

де x_1 - результат і-го вимірювання; п - число вимірювань;

вибіркова дисперсія:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n\cdot(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \qquad 2.4$$

сумарна похибка:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{пр}^2 + \sigma_{в}^2 + \sigma_{обч}^2} \qquad 2.5$$

де $\sigma_{пр}$ - похибка приладу; $\sigma_{в}$ - похибка відліку; $\sigma_{обч}$ - похибка обчислень.

Систематична похибка не оцінювалася. При $s > 3 \cdot \sigma_{\Sigma}$ істотні лише випадкові похибки. Тоді можна розрахувати напівширину інтервалу, задавши коефіцієнт довіри α:

$$\Delta x = t_{a,n-1} \cdot s \qquad 2.6$$

де $t_{a,n-1}$ - коефіцієнт Стьюдента.

Відносна похибка вимірювання:

$$\varepsilon = \left(\Delta x / \bar{x}\right) \cdot 100\% \qquad 2.7$$

Довірчий інтервал:

$$\mu = x \pm \Delta x \qquad 2.8$$

Висновки до розділу 2.

В розділі представлена загальна схема експериментальних досліджень у вигляді сукупності підходів до вирішення поставленої проблеми, вибрані матеріали для композиційних покриттів і обладнання для їх формування, методи і методики дослідження фізико механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь деталей з композиційними покриттями.

Комплексний методологічний підхід до підвищення триботехнічних властивостей робочих органів і деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів складається з наступних етапів:

- вибір матеріалів для композиційних покриттів;

- вибір обладнання для зміцнення поверхонь робочих органів і деталей сільськогосподарських машин шляхом нанесення композиційних покриттів методом електроіскрового легування;

- металографічні і рентгеноструктурні дослідження покриттів;

- визначення мікротвердості;

- оцінка напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями;

- дослідження триботехнічних властивостей зміцнених поверхонь.

Об’єктами досліджень являлись електроіскрові покриття із композиційних матеріалів ВК8, КХН25, Х20Н80. Для нанесення покриттів використовували установку "Елітрон-22" для електроіскрового легування.

Для дослідження мікроструктури покриттів, отриманих методом ЕІЛ, використовували фізичні методи досліджень: оптичну металографію, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналіз. Визначення розподілу елементів здійснювали методом скануючої електронної мікроскопії (СЕМ). Вимірювання мікротвердості поверхні з покриттям проводилося із захопленням перехідної зони.

Оцінку напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями здійснювали шляхом використання програмного комплексу NASTRAN на основі МСЕ. При оцінці НДС враховувалися геометричні параметри зміцнюємої поверхні та покриття, властивості їх матеріалів, навантаження, що діють на поверхню деталі з композиційним покриттям.

Дослідження триботехнічних властивостей проводилися на модернізованій машині типу 2070 СМТ-1. Реєстрування триботехнічних характеристик (величини зносу, моменту тертя) здійснювалося програмно-технічним комплексом.

Випробування на абразивне зношування покриттів здійснювали при використанні абразивних частинок, що закріплені не жорстко, на спеціальній установці для стендових випробувань досліджуваного і еталонного зразків в середовищі абразивних частинок. Ваговий знос визначається аналітичними вагами АДВ-200.

Оцінку точності експериментальних результатів, які містять систематичні і випадкові похибки, проводили за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики.

РОЗДІЛ 3
ОЦІНКА НАПРУЖЕННО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОВЕРХОНЬ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ, СФОРМОВАНИМИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Параметри покриття, такі як кількість шарів, суцільність і товщина, впливають на рівень напружень, від яких залежать триботехнічні характеристики поверхонь, що зміцнюються, когезійна та адгезійна міцності покриття. Оцінка напружено-деформованого стану поверхонь з композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування, дасть можливість визначити оптимальні значення товщини і суцільності покриття, які забезпечать підвищення їх триботехнічних характеристик та ресурсу.

3.1. Характеристика та аналіз напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) поверхонь деталей з композиційними покриттями дасть можливість розробити рекомендації для нанесення електроіскрових композиційних покриттів із оптимальними товщиною та суцільністю для забезпечення заданих експлуатаційних характеристик системи.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) [178] при створенні поверхонь з електроіскровими композиційними покриттями змінної суцільності можна проводити в наступній послідовності:

- обґрунтувати доцільність використання несуцільного покриття, сформованого методом ЕІЛ, з точки зору мінімізації його напружено-деформованого стану;
- вибрати параметри ЕІЛ-покриття, які будуть гарантувати відсутність когезійного розтріскування покриття та його адгезійного відшарування;
- вибрати параметри ЕІЛ-покриття з метою мінімізації напружень в покритті та в деталі.

Поряд з експлуатаційними напруженнями свій вклад в підвищення триботехнічних характеристик зміцнюємих поверхонь з покриттями вносять залишкові напруження [80]. До розтріскування суцільних покриттів із створенням сітки тріщин призводить наявність експлуатаційних напружень розтягу в поверхнях деталей з композиційними покриттями. Покриття несуцільної структури зменшує величину залишкових напружень.

Визначити товщину і суцільність покриття можна шляхом урахування напружень, які передаються в покриття через поверхню адгезійного контакту, а також залишкових напружень в покритті [80, 180-182, 191-193].

Вибір товщини та суцільності покриття дасть можливість сформувати «раціональний» напружений стан поверхі деталей з композиційним покриттям. Для визначення розмірів електроіскрових покриттів змінної суцільності запропонований експериментально–розрахунковий метод, який враховує залишкові напруження [194, 195]. Запропонований метод базується на розрахунку величини критичного кроку тріщини, яка є вихідною для визначення параметрів несуцільного покриття. Достовірність методу підтверджена експериментально прямим виміром кроку тріщини [80, 194, 195]. При випробуванні на розтяг використовували стандартні зразки. Випробуванні на розтяг проводили на установці FM-1000. Крок тріщин C_n вимірювали за допомогою оптичного мікроскопа МИР-12.

Зміна напружень у покритті $\sigma^{еф}{}_n$ за його довжиною [80, 194, 195]:

$$\sigma_n^{еф} = \sigma^{зал}{}_n + \sigma^{експ}{}_n. \qquad 3.1$$

де $\sigma^{зал}{}_n$ – залишкові напруження в покритті, виміряні методом гнучкого зразка [80, 191-193, 195];

$\sigma^{експ}{}_n$ – експлуатаційні напруження в покритті, що виникають під дією прикладеного до поверхні з покриттям навантаження [195]:

$$\sigma^{експ}{}_п = \frac{\varepsilon_k}{h\left(\frac{1}{hE_n} + \frac{1}{HE_0}\right)}\left[1 - \frac{ch(kz)}{ch(kl)}\right], \qquad 3.2$$

де $\varepsilon_к$ – критична деформація зміцнюємої поверхні під дією зовнішнього навантаження Р; l – базовий розмір; H, h – товщина зміцнюємої поверхні та покриття; E_0, E_n – модулі пружності матеріалів зміцнюємої поверхні та покриття:

$$k^2 = 2\frac{\frac{G_0 G_n}{Hh}}{\frac{G_0}{H}+\frac{G_n}{h}}\left(\frac{1}{hE_n}+\frac{1}{HE_o}\right), \qquad 3.3$$

де G_0, G_n – модулі зсуву зміцнюємої поверхні та покриття.

Величина когезійної міцності $\sigma_f = \sigma^{експ}{}_n + \sigma^{зал}{}_n$ при z=0, із співвідношення [195]:

$$\frac{\sigma_n^{\text{експ}}+\sigma_n^{\text{залиш}}}{\sigma_f} = 0{,}9 \qquad 3.4$$

та залежності (3.2):

$$1-\frac{ch\left[k\left(l-C_n\right)\right]}{chkl}+\frac{\sigma_n^{ост}}{\varepsilon_к}\frac{1}{E_n} = 0{,}9. \qquad 3.5$$

Звідси:

$$ch\left[k\left(l-C_n\right)\right]=\left(0{,}1+\frac{\sigma_n^{ост}}{\varepsilon_к}\frac{1}{E_n}\right)ch\left(kl\right). \qquad 3.6$$

Після перетворень вираз для кроку тріщини [80, 195]:

$$C_n = -\frac{1}{k}\ln\left(0{,}1+\frac{\sigma_n^{ост}}{\varepsilon_к}\frac{1}{E_n}\right). \qquad (3.7)$$

Формула (3.7) дозволяє визначити розміри ділянки електроіскрового покриття змінної суцільності. За допомогою формули (3.7) можна побудувати залежність кроку тріщини від співвідношення залишкових напружень і когезійної міцності покриття при різній його товщині [80, 195].

Таким чином, запропонований в роботах [80, 194, 195] метод дозволяє розрахувати розмір ділянки електроіскрового покриття змінної суцільності з урахуванням залишкових напружень та проаналізувати вплив величини та знаку залишкових напружень на процес когезійного розтріскування. На основі залежності (3.7) для конкретного матеріалу покриття можна отримати співвідношення товщини

і розмір ділянки несуцільного електроіскрового покриття, що дозволить виключити його когезійне розтріскування для заданих умов експлуатації деталі.

Використання несуцільних покриттів дозволяє значно знизити рівень напружень в покритті, виключити його когезійне розтріскування та руйнування від дії контактного навантаження, а також зменшити напруження в зміцнюємій деталі при дії зовнішнього навантаження, порівняно з напруженнями в поверхні деталі з суцільними покриттями. Коефіцієнти концентрації напружень як функції об'ємного вмісту включень легуючого матеріалу при електроіскровому легуванні визначали та мінімізували за методикою, запропонованою авторами [80, 194]. При контактному навантаженні на зміцнюємій поверхні з покриттям найбільша концентрація напружень має місце на межі матеріалу покриття з матеріалом зміцнюємої поверхні.

Коефіцієнти концентрації нормальних напружень K_σ і дотичних напружень K_τ визначають за формулами [80, 194]:

$$K_\sigma = \frac{4G_o(\nu_o - \nu_в)/E_1}{2 - V_o + V_в\chi_o + V_o\dfrac{G_o(\chi_в - 1)}{G_в}} \cdot \left\{1 - V_в + 3\frac{\chi_o + 1}{\chi_o + \dfrac{G_o}{G_в}}\left[3 + 10\left(\frac{V_в}{\pi}\right)^2\right]\left(\frac{V_в}{\pi}\right)^2\right\} \qquad 3.8$$

$$K_\tau = 2\frac{\dfrac{G_в}{G_o}}{V_o + (1 + V_в)\cdot\dfrac{G_в}{G_o}}\left\{1 + 4\frac{\dfrac{G_в}{G_o} - 1}{\dfrac{G_в}{G_o} + 1}\cdot\left(\frac{V_в}{\pi}\right)^2 \cdot \left[3 + 7\left(\frac{V_в}{\pi}\right)^2\right]\right\}, \qquad 3.9$$

де $G_в$; G_o– модулі зсуву включень легуючого матеріалу при ЕІЛ та матеріалу зміцнюємої поверхні (основи); $\nu_в$, ν_o – коефіцієнти Пуассона; $\chi_в = (4 - 3\nu_в)$; $\chi_o = (4 - 3\nu_o)$; V_o, $V_в$ – відносний об'ємний вміст матеріалу зміцнюємої поверхні (основи) і включень легуючого матеріалу при ЕІЛ; $E_1 = V_в E_в + V_o E_o$, де E_o, $E_в$ – модулі пружності першого роду матеріалу зміцнюємої поверхні (основи) та включень легуючого матеріалу при ЕІЛ.

Суцільність покриття визначають згідно мінімальних значень концентрації напружень. Зв'язок співвідношення площ ділянок несуцільного покриття та площі

зміцнюємої поверхні підпорядковується принципу Кавальєрі [80]. Звідси: суцільність покриття:

$$\psi = \frac{S_в}{S_о}, \qquad 3.10$$

де $S_в$ - площа поверхні ділянок несуцільного покриття з включеннями легуючого матеріалу при ЕІЛ; $S_о$ - загальна площа зміцнюємої поверхні (основи).

Суцільність ЕІЛ-покриття залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу деталі та покриття і становить 55...80% в залежності від цих властивостей.

Параметри покриття, стійкого до розтріскування при формуванні на зміцнюємій поверхні деталі композиційного покриття, дозволяє визначити запропонована методика оцінки суцільності ЕІЛ-покриття [80].

Шляхом обмеження нормальних напружень в покритті та дотичних на межі контакту покриття зі зміцнюємою поверхнею можна досягти високих значень адгезійної і когезійної міцності кожної ділянки покриття при нанесенні покриттів змінної суцільності. Заміна суцільного покриття на покриття змінної суцільності підвищує міцність і довговічність системи «деталь – покриття» [80]. Наявність в поверхневому шарі ділянок покриття підвищеної твердості, оптимальної суцільності й товщини усуває концентрацію напружень від контактних навантажень та перериває процес тріщиноутворення.

Встановити залежності напружень, які відповідають за розтріскування покриття та його відшарування, утворення та розвиток тріщин на поверхні, від параметрів покриття можна шляхом оцінки їх напружено-деформованого стану при моделюванні деталей з ЕІЛ-покриттями [80].

3.2. Визначення товщини і суцільності електроіскрових композиційних покриттів.

Забезпечення під впливом експлуатаційних навантажень мінімального рівня напружено-деформованого стану композиційних ЕІЛ-покриттів – це основна мета проведенного моделювання. Шляхом вибору суцільності та товщини

електроіскрових композиційних покриттів можна досягти поставленої мети. Параметри електроіскрових композиційних покриттів вибираються за напружено-деформованим станом поверхонь деталей з композиційними покриттями.

Основним методом розрахунку НДС електроіскрових композиційних покриттів є чисельне моделювання [175]. Для аналізу напружено-деформованого стану поверхонь деталей з композиційними покриттями використовували метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє будувати розрахункові схеми виходячи з фізичної постановки задачі [175]. Реалізація методу скінчених елементів дозволяє візуально представляти результати моделювання НДС.

Методика розрахунку напружень полягала в тому, що будувалась скінченно-елементна модель поверхні деталі з композиційним покриттям з розподілом еквівалентних напружень по Мізесу [191-194]. Модель розбивалась на гексагональні скінченні елементи, що підвищує точність розрахунків та додає зручності при побудові графіків [175, 176].

При проведенні досліджень використовували ножі подрібнюючого барабану комбайну [195 - 201]. Схема прикладення навантаження та закріплення ножа представлена на рисунку 3.1.

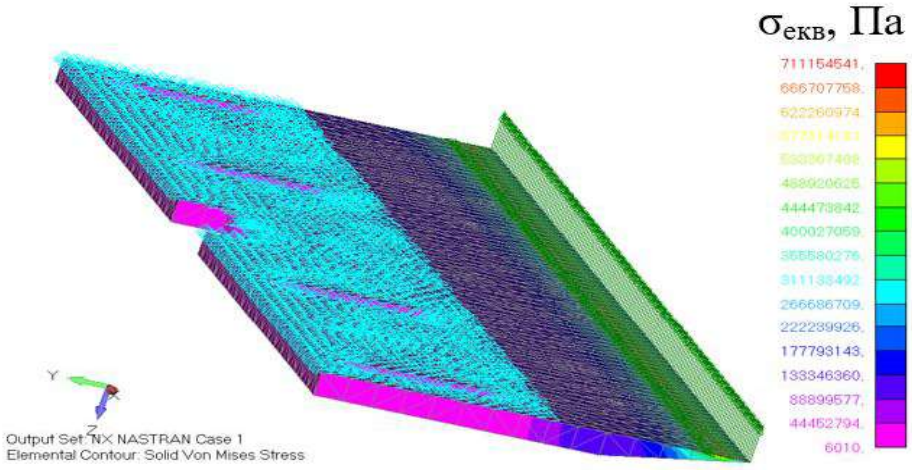


Рис. 3.1. Схема прикладення навантаження та закріплення в ріжучому лезі ножа подрібнюючого барабана комбайна.

Оскільки в ножах найбільш навантаженими є робочі кромки, то аналізу підлягала тільки різальна частина ножа, яку розбивали на гексагональні скінченні елементи. Мінімальний розмір скінчених елементів вибрали 500 мкм, при цьому модель різальної частини ножа мала 1989 вузлів і 1576 елементів. Товщина покриття 0,1…0,5 мм.

При розрахунку задавали модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для матеріалів зміцнюємої поверхні ($E_о$ = 2,15E + 05 МПа, $\nu_о$= 0,25), та покриття із ВК8 ($E_п$ = 4,40E + 05МПа, $\nu_п$ = 0,21); КХН25 ($E_п$ = 3,75E + 05МПа, $\nu_п$ = 0,26) і Х20Н80 ($E_п$ = 3,2E + 05МПа, $\nu_п$ = 0,28).

Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з покриттям ВК8 нанесеним суцільно представлена на рисунку 3.2.

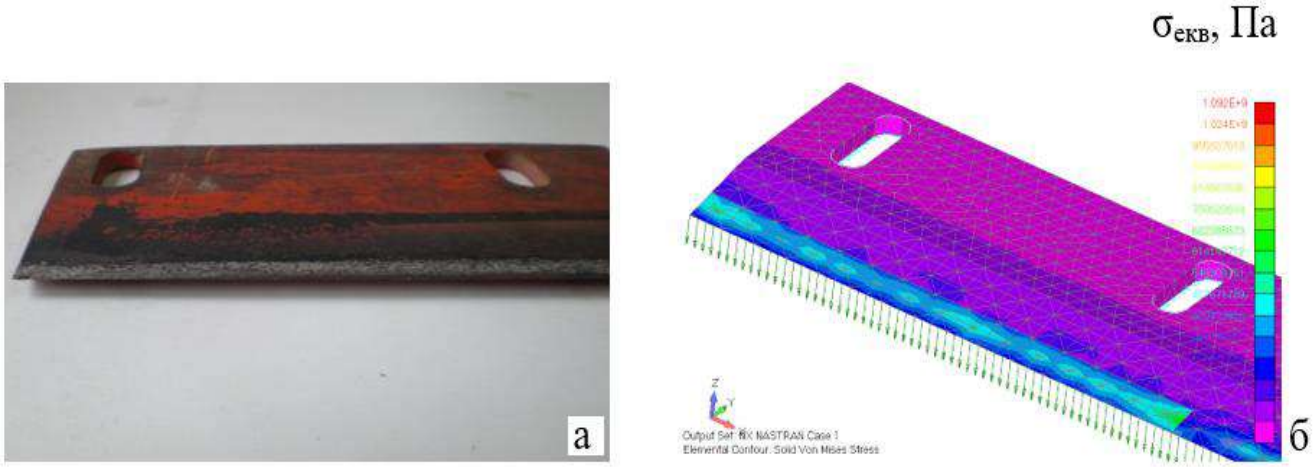
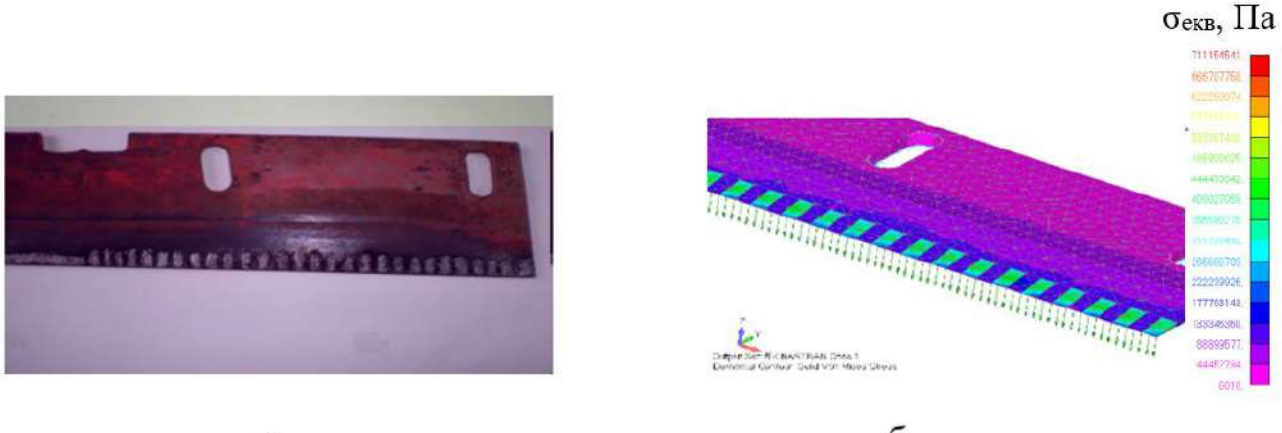


Рис. 3.2. Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з покриттям ВК8, нанесеним суцільно (а) і, розбиття її різальної частини на скінченні елементи (б).

При аналізі напружено-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування було враховано, що спосіб електроіскрового легування дискретний за своєю природою [80, 111-118].

Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з електроіскровим покриттям змінної суцільності із карбіду вольфраму ВК8 представлена на рисунках 3.3 і 3.4.



а б

Рис. 3.3. Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з покриттям змінної суцільності (а) із карбіду вольфраму ВК8 і розбиття її різальної частини на скінченні елементи (б).

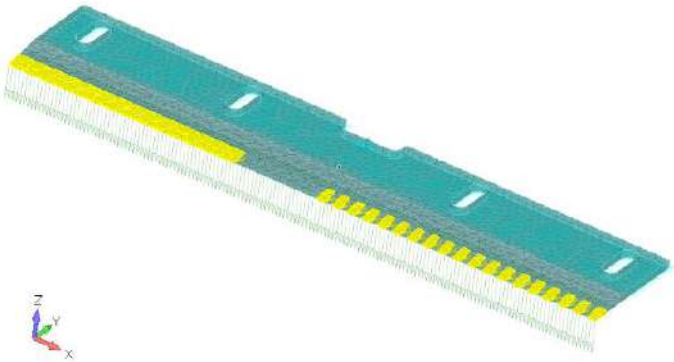


Рис. 3.4. Модель ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з електроіскровим покриттям змінної суцільності.

Розподіл еквівалентних напружень в моделі ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з суцільним електроіскровим покриттям представлено на рис. 3.5, а з покриттям змінної суцільності з карбіду вольфраму ВК8 на рис. 3.5,б.

Таким чином, покриття з змінною суцільністю створює в поверхневому шарі максимальні еквівалентні напруження за Мізесом 350 МПа, на відміну від 680 МПа для суцільного покриття ВК8.

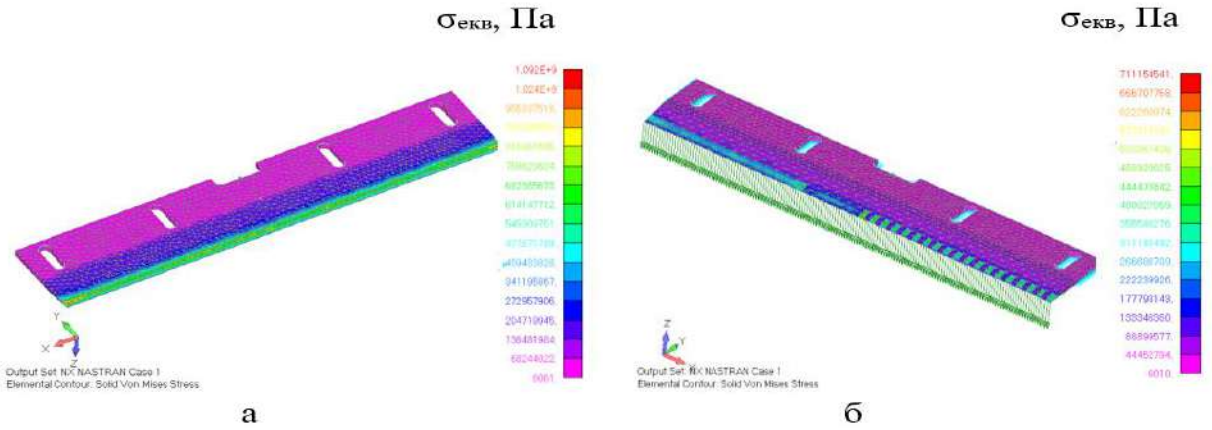


Рис. 3.5. Розподіл еквівалентних напружень в моделі ріжучого леза ножа подрібнюючого барабану комбайна з суцільним (а) електроіскровим покриттям і з покриттям змінної суцільності (б) з карбіду вольфраму ВК8.

В процесі аналізу моделі є можливість змінювати властивості матеріалу та атрибути кінцевого елемента, його розмір (масштабування), тип кінцевих елементів, додавати проміжні вузли, а також збільшувати або зменшувати ступені вільності [195-201]. В якості граничних умов на поверхні різальної частини ножа було задано навантаження.

Для спрощення розрахунків використовувалась розрахункова схема, яка представлена на рисунку 3.6.

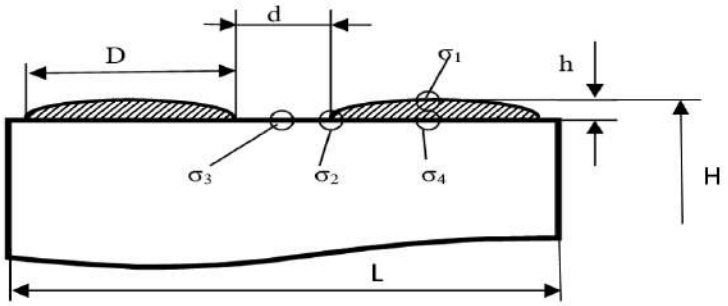


Рис. 3.6. Схематичне зображення поверхні деталі з покриттям із параметрами та зонами напружень: σ_1 – напруження в центрі покриття; σ_2 – напруження на краю

покриття; σ_3 – напруження в основі між ділянками покриття (дискретами); σ_4 – напруження в основі під покриттям.

При формуванні композиційного ЕІЛ-покриття вибір його товщини є одним із важливих питань. Товщина покриття в умовах експлуатації має функціональний зв'язок із несучою здатністю деталей.

Результати досліджень напружено-деформованого стану деталей з композиційними покриттями від дії нормального навантаження на ділянках електроіскрового покриття в залежності від товщини покриття представлено на рис. 3.7 і в додатку А.

Аналіз результатів чисельного моделювання на рис. 3.7 і на рис. А1.1 в додатку А1 показує, що зі збільшенням товщини покриття напруження σ_3 (рис. 3.6) в основі в зоні між ділянками покриття зростають. Залежність напружень деталі з композиційним покриттям від його товщини показано на рис. 3.8, а напружений стан в покритті та в поверхні деталі в залежності від товщини покриття представлений на рис. 3.9.

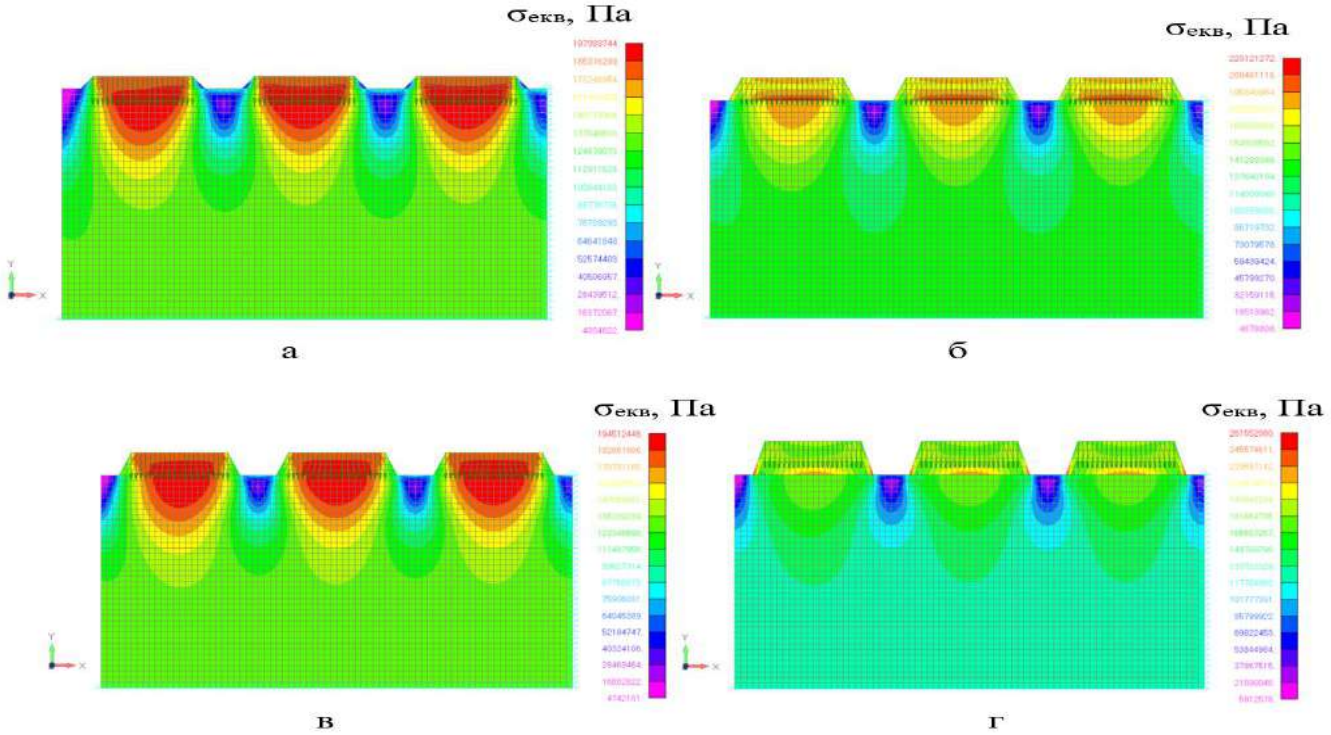
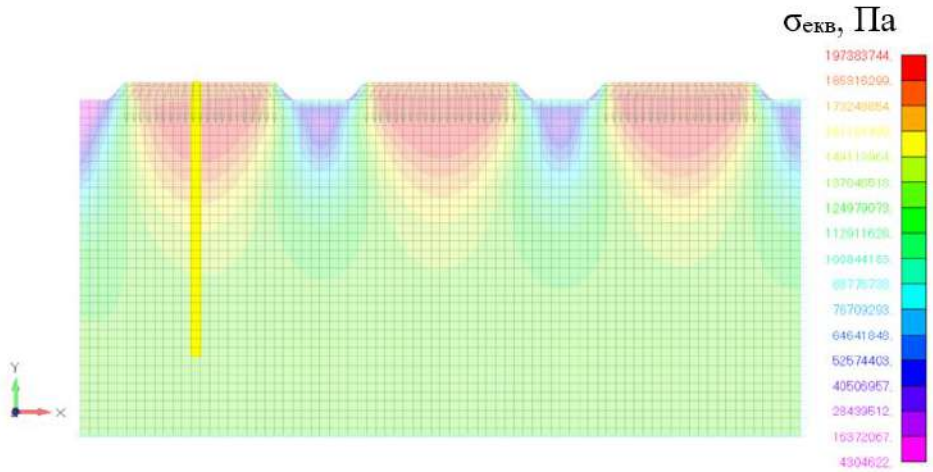


Рис. 3.7. Напружено-деформований стан поверхні деталі з композиційним покриттям від дії нормального навантаження на дискретних ділянках: а, б, в, г -

покриття з карбіду вольфраму ВК8 товщиною h = 100мкм, 200 мкм, 300мкм і 400 мкм. Зміцнюєма поверхня деталі виготовлена зі сталі 65Г.

Аналіз проведених досліджень дозволяє зробити висновок, що електроіскрові покриття доцільно наносити товщиною 200 мкм. У покритті товщиною 200 мкм змінної суцільності, сформованому методом електроіскрового легування, забезпечується обмеження зростання напружень та процесу тріщиноутворення, що багаторазово підвищує його міцність і довговічність, повністю виключаючи когезійне розтріскування та адгезійне відшарування. При оптимальній товщині покриття 200 мкм електроіскрові композиційні покриття дозволяють вирішити основне протиріччя, що виникає під час використання надтвердих поверхневих шарів - подолати їх крихкість.

Результати чисельного моделювання моделі деталі з покриттям з розподілом еквівалентних напружень по Мізесу в залежності від відстані між ділянками несуцільного покриття на поверхні представлені на рис. 3.10, 3.11 при різних товщинах покриття (50 мкм, 100 мкм, 200 мкм, 300 мкм і 400 мкм).



а

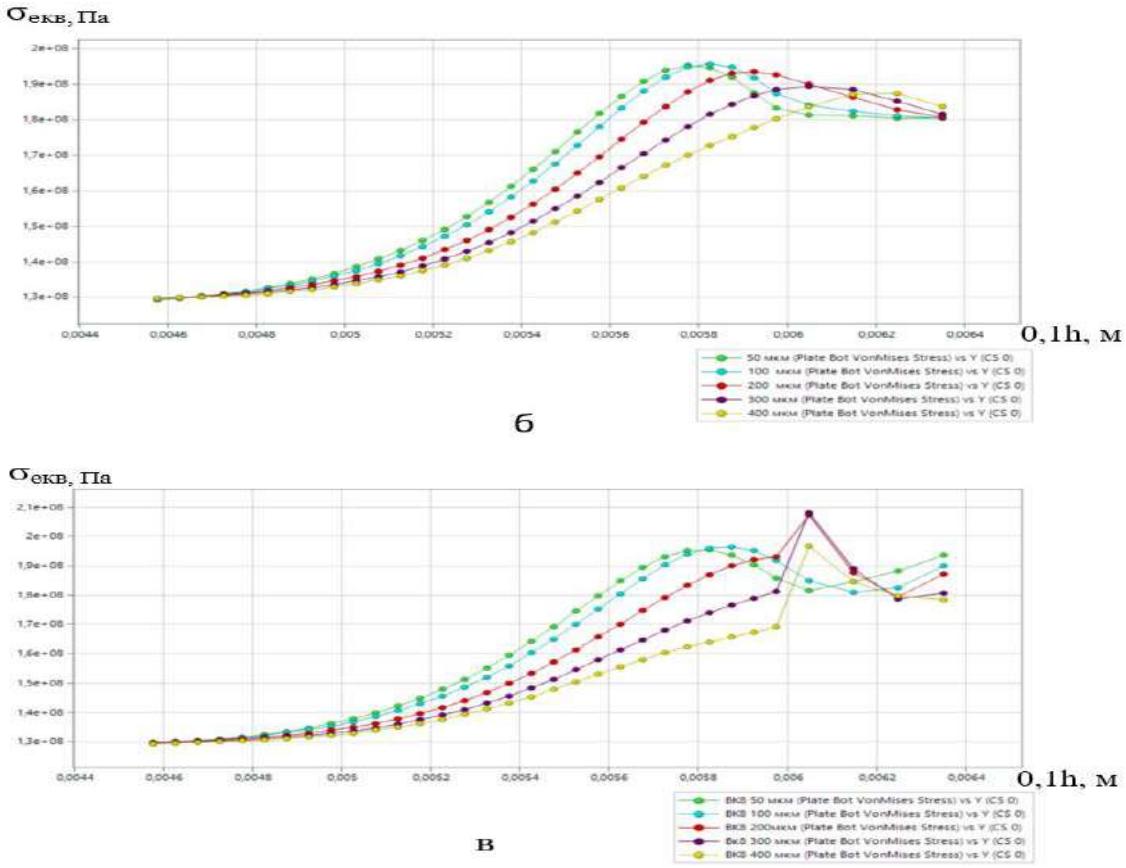


Рис. 3.8. Напружений стан в покритті та в зміцнюємій поверхні в залежності від товщини покриття: а - модель, б - без покриття, в – з покриттям ВК8.

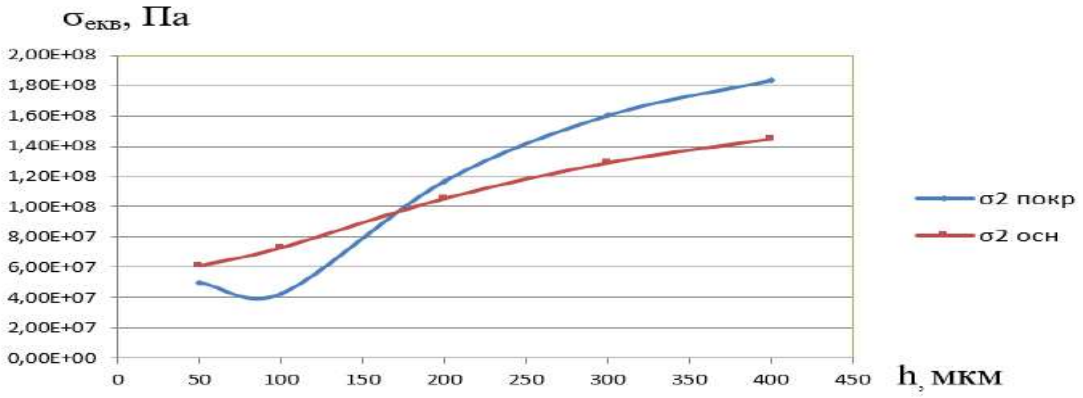


Рис. 3.9. Залежність напружень у всіх аналізованих характерних точках поверхні деталі з композиційним покриттям ВК-8 від його товщини.

Для традиційних суцільних покрить, як і для компактних матеріалів має місце локальне перенапруження контактуючих тіл за рахунок нормального і дотичного навантаження.

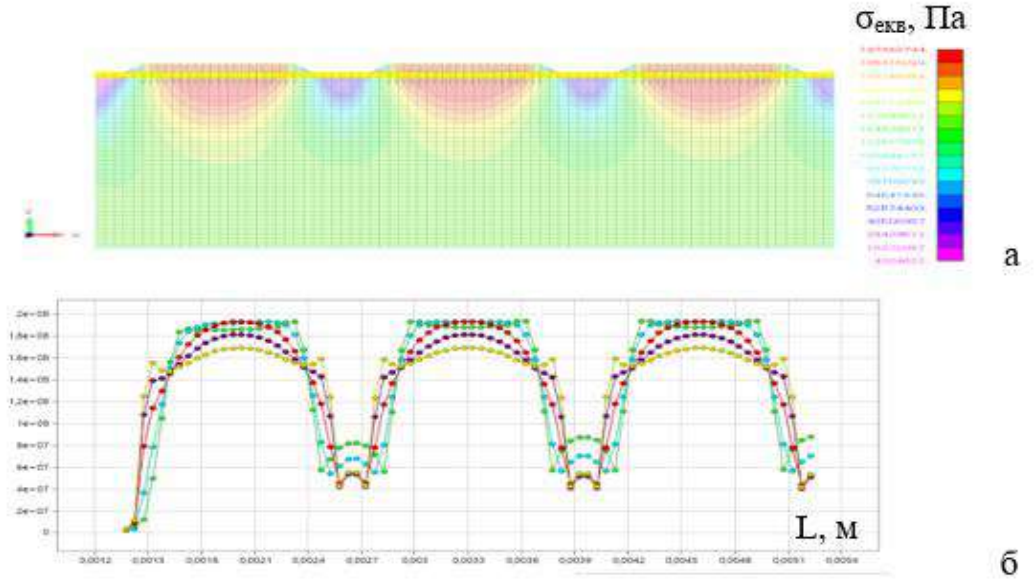


Рис. 3.10. Напружений стан в покритті (а, б) в залежності від відстані між ділянками несуцільного покриття та його товщини: а – модель (в покритті); б - залежність еквівалентних напружень в покритті.

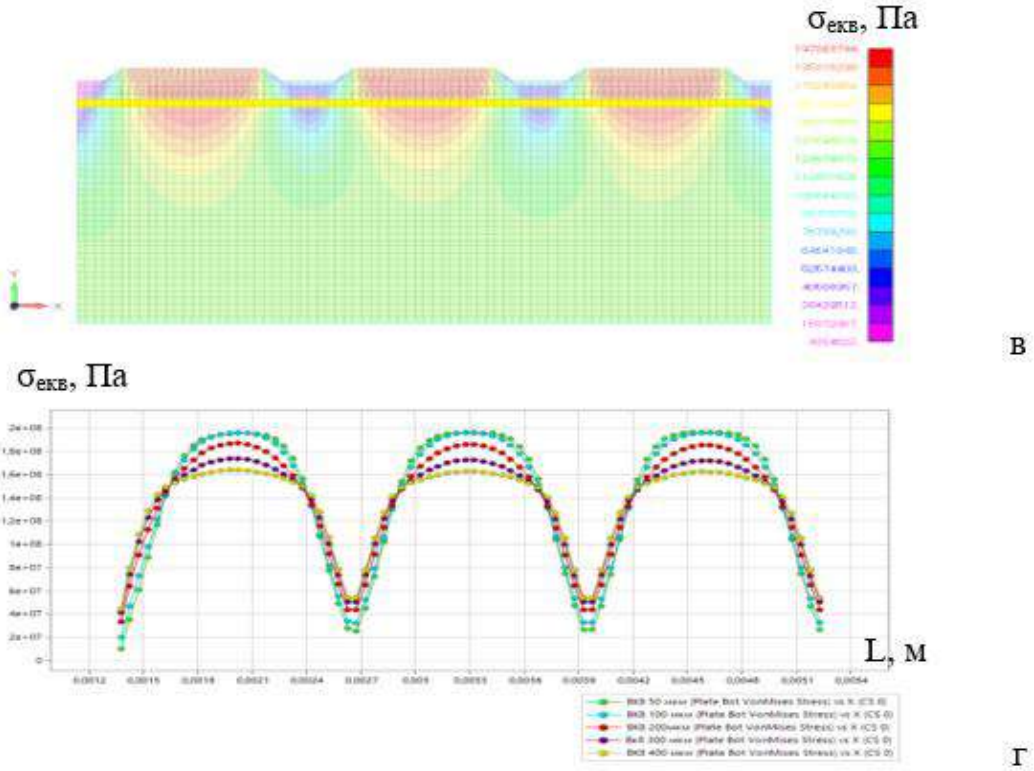


Рис. 3.11. Напружений стан на поверхні, що зміцнюється (в, г), в залежності від відстані між ділянками несуцільного покриття та його товщини: в – модель (на поверхні); г - залежність еквівалентних напружень на поверхні.

Структура несуцільного покриття обмежує його локальне перенапруження і за рахунок цього обмеження створюється оптимальний НДС покриття-основа, що підвищує його експлуатаційні властивості.

Формування шару покриття змінної суцільності обумовлене необхідністю зниження нормальних залишкових напружень в покритті та обмеження дотичних напружень в площині адгезійного контакту, що в умовах високих контактних навантажень має вирішальне значення для подовження терміну служби деталей.

На рис. 3.12, 3.13 представлено скінченно-елементну модель поверхні деталі з композиційним покриттям, її напружено-деформований стан у всіх аналізованих характерних точках композиції та розподіл дотичних напружень τ_{xy} по довжині поверхні, що зміцнюється, при відстані між дискретами d=2 мм в залежності від товщини покриття.

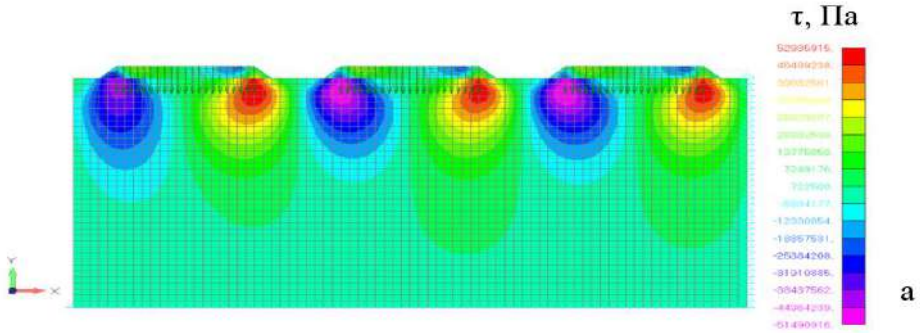


Рис. 3.12. Модель розподілу дотичних напружень τ_{xy} в покритті ВК-8 товщиною 100 мкм.

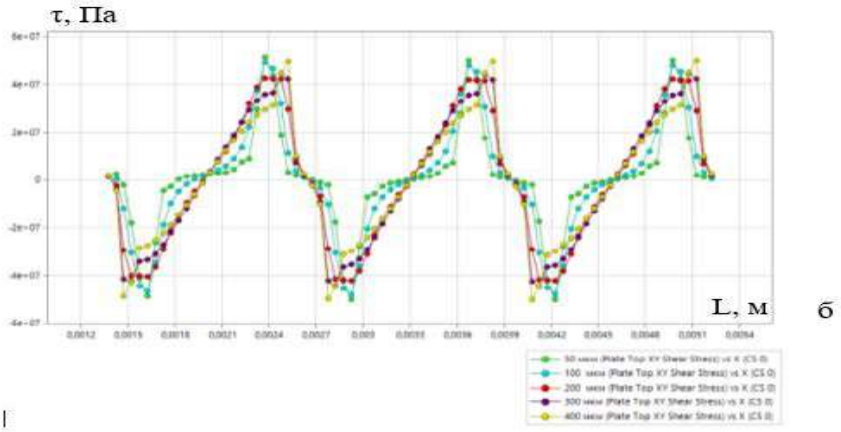


Рис. 3.13. Розподіл дотичних напружень τ_{xy} по довжині поверхні, що зміцнюється в залежності від товщини покриття.

В результаті моделювання встановлено, що дотичні напруження в покритті ВК8 товщиною 50…100 та 400 мкм і більше на 15-20 МПа перевищують дотичні напруження в покритті товщиною 200…300 мкм.

Для електроіскрових покриттів, що мають несуцільну структуру зниження дотичного навантаження в матеріалі основи можливо шляхом збільшення суцільності покриття. Підвищення суцільності покриття забезпечить локалізацію дотичних напружень в локальних ділянках покриття. До зменшення дотичної складової навантаження та оптимального розподілу питомого нормального навантаження по зоні контактування призводить зменшення розміру ділянок контакту покриття з поверхнею деталі та нанесення покриття суцільністю 60…80%. При цьому, величина питомого нормального розподіленого навантаження збільшується менше, ніж зменшується дотичне навантаження.

Зі збільшення суцільності > 80% (зменшенням відстані між ділянками покриття) та зменшення суцільності покриття < 50% зростає концентрація напружень. Для різної товщини покриттів характерно максимальне зниження напружень при суцільності покриття 60…80% (рис. 3.14, 3.15).

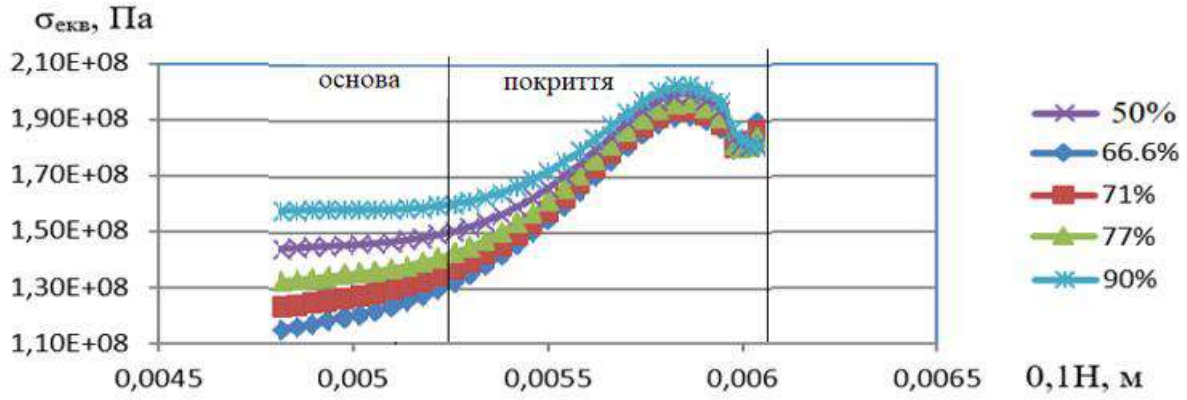


Рис. 3.14. Еквівалентні напруження по глибині від поверхні покриття в основу (сталь 65Г) в залежності від суцільності покриття ВК8 (товщина покриття 100 мкм).

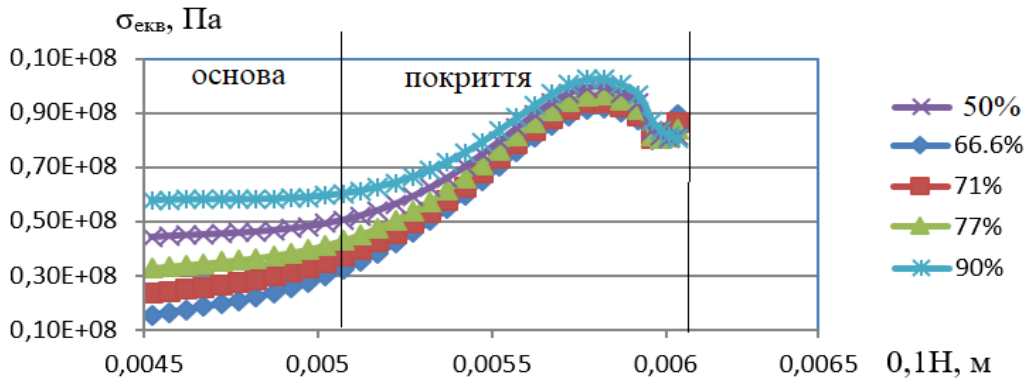


Рис. 3.15. Еквівалентні напруження по глибині від поверхні покриття в основу в залежності від суцільності покриття КХН25 (товщина покриття 100 мкм).

Встановлено, що покриття більш твердого матеріалу ВК8 формують покриття, що забезпечує локалізацію максимальних еквівалентних напружень по глибині до 30 мкм, в той же час покриття меншої твердості КХН25 забезпечує локалізацію максимальних еквівалентних напружень на глибині до 50 мкм при товщині покриття 100…300 мкм. Незалежно від типу покриття, максимальні еквівалентні напруження формуються в покритті, що знижує напружено-деформований стан основи.

Використання електроіскрових композиційних покриттів з оптимальним співвідношенням товщини та суцільності дасть можливість підвищити триботехнічні характеристики зміцнюємих і відновлюємих деталей.

3.3. Розрахунково-експериментальні дослідження впливу поверхонь ножів подрібнюючого барабану з електроіскровими покриттями змінної суцільності на ефективність подрібнення зернової сировини.

Доцільність використання робочих органів і деталей машин сільськогосподарського виробництва з композиційними ЕІЛ-покриттями змінної суцільності для підвищення ефективності процесу переробки зернової сировини показано на прикладі використання подрібнюючих ножів [202]. Процес подрібнення зерна пшениці та кукурудзи досліджували експериментально при його ударі по площині [202]. Було визначено, що ефективність подрібнення зерна істотно

залежить від кута падіння зерна при його ударі по плоскій поверхні (рис. 3.16).

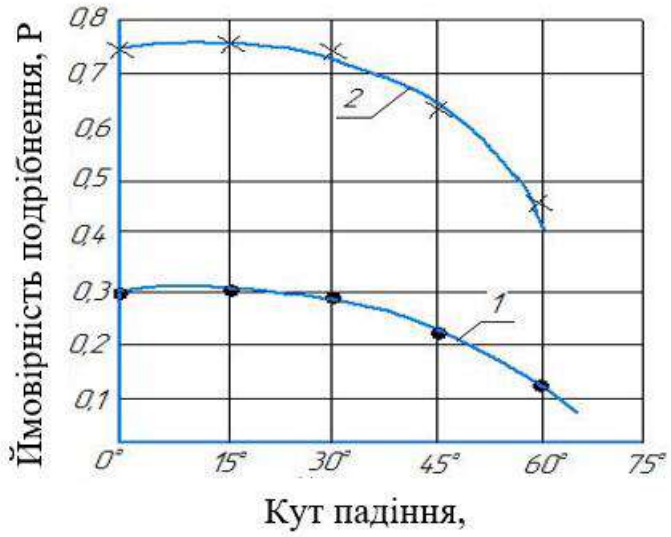


Рис. 3.16. Ймовірність подрібнення зерна в залежності від кута падіння (плоска суцільна поверхня): 1 – пшениця (швидкість удару 60 м/с); 2 – кукурудза (50 м/с).

За міру ефективності подрібнення зернової сировини прийнята вагова частка зерен, що роздробилися в подрібнюючому барабані (дробарці). Вагову частку зерна можна представили як ймовірність руйнування (Φ) у разі використання в експерименті зерна з вузьким вихідним фракційним складом. Швидкість удару зерна становила 50 м/с для кукурудзи та 60 м/с для пшениці. Як видно з графіків на рис. 3.16, ефективність руйнування зерна починає знижуватися при кутах його падіння $\beta > \pi/4$ рад (45^0).

Припустимо, що швидкість V зерна пшениці або кукурудзи величина випадкова. За час dt поверхні dS досягнуть тільки ті зерна пшениці або кукурудзи, що мають величину швидкості V:

$$dQ = V \cdot \cos\beta \cdot dS \cdot dt \qquad 3.8$$

де β - кут між нормаллю до поверхні dS і вектором швидкості V.

Поверхні dS в одиницю часу досягає кількість зерна:

$$N = \lambda \int_D V \cos\beta \cdot f(\vec{V}) \cdot d\vec{V} \cdot dS \qquad 3.9$$

де λ - середня кількість зерна в одиниці об'єму; D - область інтегрування змінних.

Із усієї кількості зерна, що досягає поверхні dS, подрібнюється його частина, що визначається за формулою (3.10):

$$n = \lambda \int_D \psi(v, \beta, \rho, c) \cdot v \cdot \cos\beta \cdot f(\vec{V}) \cdot d\vec{V} \cdot dS \qquad 3.10$$

де $\psi\ (v, \beta, \rho, c)$ - вагова функція, що характеризує ефективність подрібнення зерна, яка залежить від швидкості удару зерна v, локального кута падіння β, радіуса кривизни ρ в точці удару, можливості повторного удару c у разі рикошету.

Таким чином, кількість подрібнення зерна в одиницю часу визначається із співвідношення:

$$P = \frac{n}{N} \qquad 3.11$$

де N – кількість зерна, що досягає поверхні в одиницю часу;

n – кількість подрібненого зерна.

Вираз (3.11) може бути мірою ефективності подрібнення зерна ножами подрібнюючого барабану (дробарки) з електроіскровими покриттями заданої суцільності.

При проведенні досліджень використовували ножі з робочою поверхнею з електроіскровим покриттям, яке наносили у вигляді окремих ділянок, які мали форму півсфери, методом ЕІЛ (рис. 3.17).

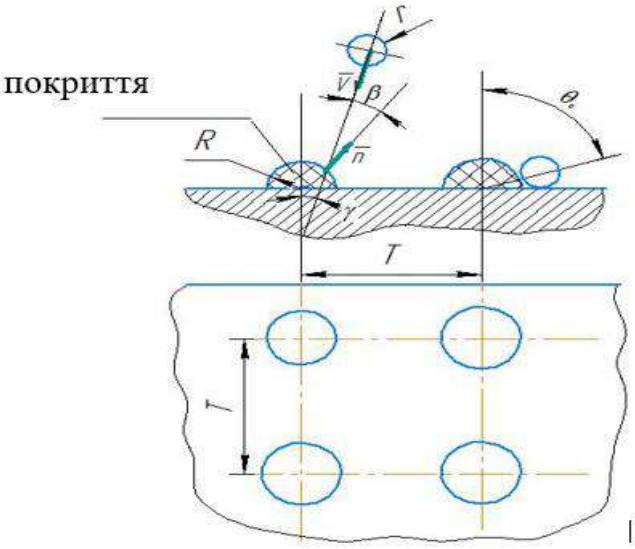


Рис. 3.17. Модель поверхні електроіскрового несуцільного покриття

З метою підвищення зносостійкості матеріал покриття повинен мати твердість, що набагато перевищує твердість матеріалу поверхні (деталі), що зміцнюється. В якості матеріалу покриття використовували карбід вольфраму ВК8, а ножі були виготовлені зі сталі 65Г. Поєднання в'язкості матеріалу ножів та високої твердості покриття забезпечують довговічність подрібнюючих ножів.

Конструкція ділянок поверхні з несуцільним покриттям характеризується радіусом півсфер R (відстанню між кінцевими краями точкового покриття - центрами півсфер). У першому приближенні ефективність такої поверхні становить:

$$K = (1\text{-}M)\,\Phi + MP_1 \qquad 3.12$$

де $M = \frac{\pi R^2}{T^2}$ - відносна частина поверхні з ділянками покриття, що мають форму півсфер; Φ – ймовірність подрібнення зерна ножами з покриттям (визначається з експерименту); P_1 – ймовірність подрібнення зерна на ділянках покриття.

Вираз (3.11) у разі подачі потоку зерна під кутом γ до поверхні з несуцільним покриттям у формі півсфер (рис. 3.18) набуває вигляду:

$$P_1 = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_0} \delta[\phi + c(1+\phi)] \cdot (\sin\theta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\gamma + \cos\theta \cdot \cos\gamma)\sin\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_0} \delta(\sin\theta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\gamma + \cos\theta \cdot \cos\gamma)\sin\theta d\theta} \qquad 3.13$$

де θ, φ - широта та довгота сферичної системи координат, θ_0 - верхня межа інтегрування за широтою.

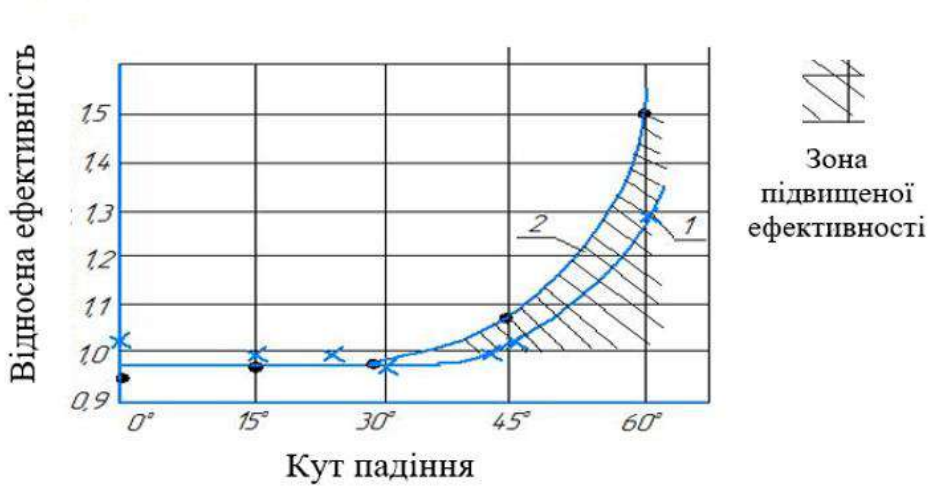


Рис. 3.18. Відносна ефективність поверхонь покриття у формі півсфер в

залежності від кута падіння (пшениця, швидкість удару 60 м/с): 1 – R = 2 мкм, T = 8 мкм; 2 - R = 2 мкм, T = 6 мкм.

Передбачається, що всі зерна, що не були подрібненні (рикошетували), відчувають повторний удар при куті падіння до несуцільної поверхні до ≈ π/2 рад (90^0) та будуть подрібненні.

Вплив конструктивних параметрів покриттів на робочих поверхнях подрібнюючих ножів на ефективність подрібнення видно з рис. 3.19, де представлена експериментальна залежність ефективності подрібнення при куті падіння $\gamma = \frac{\pi}{3}$ рад (60^0) від величини M (відносної частини площі покриття, що зайнята покриттям у вигляді півсфер). Крім поверхонь з покриттями у вигляді півсфер з геометричними параметрами, вказаними вище, тут же наводяться дані з випробування ножів із покриттями у вигляді напівсфер з параметрами R = 2 мкм і T = 6 мкм.

Із графіку видно, що ефективність подрібнення зерна ножами з несуцільними покриття у вигляді півсфер перевершує ефективність подрібнення зерна ножами з суцільною поверхнею, представленою на рис. 3.16 (крива 1). Ефективність подрібнення зерна ножами з покриттями у вигляді півсфер тим більша, чим більша частина площі покриття зайнята півсферами (чим більша суцільність покриття) і чим більший кут падіння потоку зерна.

На плоскій суцільній поверхні при куті падіння 60^0 зерня пшениці імовірність подрібнення складала лише 0,11. Формуючи електроіскрове несуцільне покриття з радіусом півсфер R = 2 мкм та проміжками між ними T = 6 мкм, можна досягти імовірності подрібнення зерна пшениці 0,57.

Таким чином, поверхня ножів із несуцільними покриттями у вигляді півсфер підвищує ефективність подрібнення зернової сировини.

Рис. 3.19. Вплив конструктивного параметра M (відносна частина площі покриття зайнята півсферами: М=0,19 при R = 2 мкм і T = 8 мкм, М=0,34 при R = 2 мкм і T = 6 мкм) на ефективність подрібнення зерна пшениці при швидкості його удару V = 60 м/с та куті падіння $\gamma = \frac{\pi}{3}$ (59^0).

Висновки по розділу 3

1. Доведено, що забезпечити мінімальний рівень НДС електроіскрових покриттів можна шляхом вибору оптимальних значень їх товщини та суцільності, що забезпечить збільшення зносостійкості зміцнюємих поверхонь. Оцінка НДС надає можливість розробити рекомендації для нанесення електроіскрових КП із оптимальними товщиною та суцільністю для забезпечення заданих триботехнічних і експлуатаційних характеристик деталі з покриттям.

2. Запропоновано оцінку НДС шляхом побудови кінцево-елементної моделі поверхні деталі з композиційним ЕІЛ-покриттям з розподілом еквівалентних напружень по Мізесу. Отримано результати чисельного моделювання, які показали:

- формування покриття змінної суцільності обумовлене необхідністю зниження нормальних залишкових напружень в покритті та обмеження дотичних

напружень в площині адгезійного контакту, що в умовах високих контактних навантажень має вирішальне значення для продовження терміну служби деталей;

- структура несуцільного покриття обмежує його локальне перенапруження;

- зростання напружень в зоні між ділянками покриття зі збільшенням товщини покриття.

3. Обґрунтовано, що несуча здатність деталі з покриттям має функціональний зв'язок із його товщиною. Визначено шляхом дослідження НДС, що товщина надтвердих покриттів, сформованих методом ЕІЛ, повинна знаходитись в межах 200 … 300 мкм, що дозволяє знизити їх крихкість. Встановлено, що дотичні напруження в покритті ВК8 товщиною 50…100 та > 400 мкм на 15-20 МПа перевищують дотичні напруження в покритті товщиною 200…300 мкм.

4. Анализ НДС дозволив зробити висновок, що при використанні ЕІЛ-покриттів має місце характер залежності напружень від суцільності покриттів. До зменшення дотичної складової навантаження та оптимального розподілу питомого нормального навантаження по зоні контактування призводить зменшення розміру ділянок контакту покриття з поверхнею деталі та нанесення покриття суцільністю 60…80%. Зі збільшення суцільності > 80% (зменшенням відстані між ділянками покриття) та зменшення суцільності покриття < 50% зростає концентрація напружень.

5. Встановлено, що покриття більш твердого матеріалу ВК8 формують покриття, що забезпечує локалізацію максимальних еквівалентних напружень по глибині до 30 мкм, в той же час покриття меншої твердості КХН25 забезпечує локалізацію максимальних еквівалентних напружень на глибині до 50 мкм при товщині покриття 100…300 мкм. Незалежно від типу покриття, максимальні еквівалентні напруження формуються в покритті, що знижує напружено-деформований стан основи.

6. Обгрунтовано, що шляхом зміни суцільності та товщини покриття, а також вибором матеріалів за фізико-механічними характеристиками можливо мінімізувати НДС зміцнюємих поверхонь і керувати ним.

7. Показана доцільність використання композиційних ЕІЛ-покриттів змінної суцільності для підвищення зносостійкості подрібнюючих ножів дробарок (барабанів) комбайнів. Доведено, що поверхня подрібнюючих ножів з несуцільними покриттями у вигляді півсфер підвищує ефективність процесу переробки зернової сировини.

8. Розраховано, що поверхня ножів із несуцільними покриттями у вигляді півсфер підвищує ефективність подрібнення зернової сировини: на плоскій суцільній поверхні при куті падіння 60^0 зерна пшениці імовірність подрібнення складала 0,11. Формуючи електроіскрове несуцільне покриття з радіусом півсфер R = 2 мкм та проміжками між ними T = 6 мкм, можна досягти імовірності подрібнення зерна пшениці 0,57.

РОЗДІЛ 4
ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ З КОМПОЗИЦІЙНИМИ ПОКРИТТЯМИ

Шляхом оцінки напруженно-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування, було визначено оптимальну товщину і суцільність покриттів, що дозволило вирішити основне питання, що виникає під час формування надтвердих покриттів – знизити їх крихкість, усунити концентрацію напружень від контактних навантажень, підвищити міцність, триботехнічні властивості та експлуатаційну надійність деталей.

Для підтвердження результатів оцінки НДС і доведення доцільності застосування методу електроіскрового легування для нанесення композиційних покриттів із метою підвищення триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин були проведені експериментальні дослідження по визначенню триботехнічних властивостей (інтенсивності зношування і коефіцієнту тертя) покриттів в умовах ковзання.

4.1. Фізичний аспект створення композиційних покриттів методом електроіскрового легування.

Процес електроіскрового легування пов'язаний з фізичною природою ерозії поверхні. Існують три точки зору на фізичну природу ерозії при ЕІЛ: електромеханічна, електротермічна і електродинамічна. В даний час більшість дослідників дотримуються гіпотези, згідно якої в електроерозійному руйнуванні металів переважають електротермічні процеси. Разом з тим необхідно вказати на роботу співробітників школи Б.Р. Лазаренко, що дотримуються електродинамічної теорії ЕІЛ [115-118]. Розуміння фізико-хімічних процесів при ЕІЛ дозволяє оптимізувати параметри процесу для досягнення бажаних властивостей покриттів [116].

Основні закономірності процесів при ЕІЛ можна представити в наступному вигляді – вага матеріалу, яка виділяється з електродів в результаті дії імпульсів струму, визначається як [116]:

$$\gamma = \text{Е} \cdot \text{к} \cdot \nu \cdot \tau, \quad (4.1)$$

де γ – кількість матеріалу, г; E – енергія одиничного імпульсу, Дж; $к$ – коефіцієнт, який визначається фізичними константами матеріалу електродів, тривалістю імпульсів та складом середовища; ν – частота проходження імпульсів, Гц, τ – час обробки, с.

Головною умовою ефективності процесу ЕІЛ є перенос матеріалу аноду на катод, який контролюється відношенням ерозії матеріалів аноду Δ_a і катоду $\Delta_к$ [116]:

$$\Delta_a >> \Delta_к \quad (4.2)$$

Необхідно відзначити, що за малий час імпульсу глибоке проникнення матеріалу анода в катод пояснюється дією високих температур під час проходження імпульсів струму, виникненням імпульсного тиску в зоні розряду і, як наслідок, виникнення температурних напружень на локальних ділянках зміцнюємої поверхні [116].

Виходячи з приведеного короткого аналізу літературних даних і висловлених міркувань [115-118] для створення покриттів доцільно використовувати метод електроіскрового легування. Метод ЕІЛ базується на використанні високотемпературних імпульсних розрядів для переносу матеріалу з електрода на зміцнюєму поверхню деталі (рис. 4.1). Процес ЕІЛ покращує фізико-механічні та триботехнічні властивості поверхонь деталей, підвищує їх твердість, зносостійкість та інші експлуатаційні характеристики [111-122].

Рис. 4.1. Процес електроіскрового легування.

Процес ЕІЛ включає наступні етапи (рис. 4.2) [115-118]:

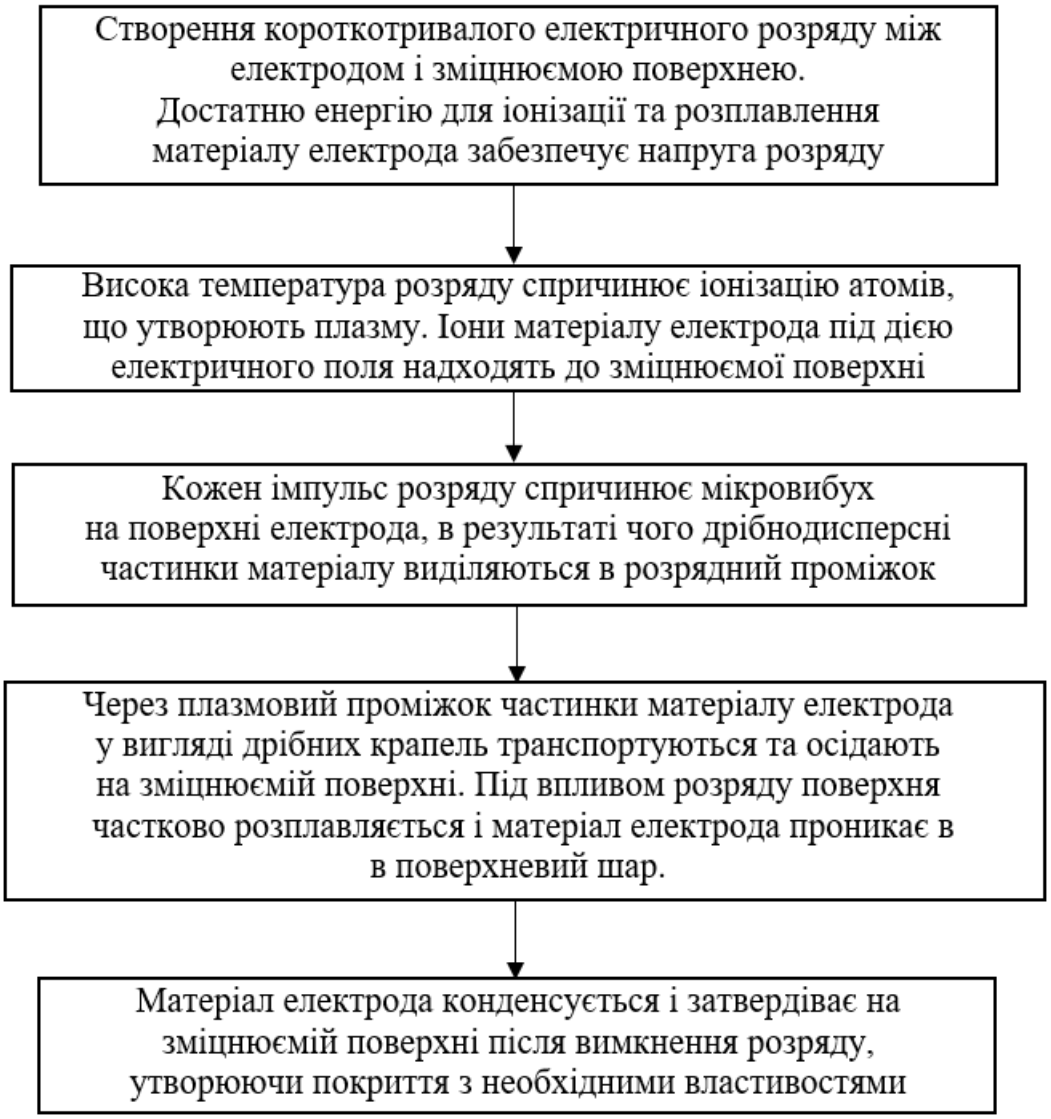


Рис. 4.2. Основні етапи процесу ЕІЛ.

1) між електродом і зміцнюємою поверхнею деталі створюється електричний розряд, що призводить до утворення іскрового каналу з дуже високою температурою до 7000…10000 °С;

2) утворюється плазма, яка містить іони, атоми та дрібні частинки матеріалу електрода, а високотемпературний розряд обумовлює інтенсивне плавлення і часткове випаровування його матеріалу;

3) іонізований матеріал електрода під впливом електричного поля переноситься через іскровий канал і осідає на поверхні зміцнюємої деталі. Висока температура сприяє утворенню покриття з високою щільністю і міцністю;

4) частинки матеріалу електрода контактують зі зміцнюємою поверхнею та обумовлюють локальне розплавлення поверхневого шару, що сприяє дифузії атомів легуючого елемента в поверхню деталі.

5) розплавлений матеріал швидко охолоджується і затвердіває на поверхні деталі після закінчення розряду та утворює покриття. Швидке охолодження підвищує механічні властивості покриття за рахунок утворення дрібнокристалічної структури [115-118].

Доцільно провести дослідження впливу режимів електроіскрового легування на міцністні властивості покриттів та експлуатаційні характеристики зміцнених поверхонь з метою визначення оптимальних режимів ЕІЛ.

4.2. Визначення впливу режимів процесу електроіскрового легування на параметри і властивості покриття.

Основними характеристиками процесу електроіскрового легування є енергія розряду W_p і частота створення розрядів ν_p. Області енергій розрядів і частот ЕІЛ: I – великі $(1\,Дж \le W_p \le 10\,Дж)$; II–середні $(0{,}1\,Дж \le W_p \le 1\,Дж)$; III – малі енергії $(W_p \le 0{,}1\,Дж)$; IV – область пропонованого розвитку ЕІЛ [115-118]. Оптимальні режими ЕІЛ на установці Елітрон-22 (рис. 4.3) представлені в таблиці 4.1.

Рис. 4.3. Установка електроіскрового легування "Елітрон-22".

Таблиця 4.1

Оптимальні режими обробки на установці Елітрон-22

режим 1	ν = 200 *Гц*, преривчаста обробка з інтервалом 10…15*с* через кожну хвилину ЕІЛ із загальним часом обробки 6 хв/см^2
режим 2, 3	ν = 200 *Гц*, преривчаста обробка з інтервалом 10…15*с* через кожну хвилину ЕІЛ із загальним часом обробки 6 хв/см^2
режим 4	ν = 100 *Гц*,, неперервна обробка із загальним часом ЕІЛ 6 хв/см^2
режим 5, 6	ν = 100 *Гц*,, неперервна обробка із тривалістю процесу 6 хв/см^2

Інтенсивність формування поверхневого шару методом ЕІЛ залежить від величини енергії розряду, яка виділяється в міжелектродному зазорі, і середнього струму джерела робочих іпульсів [115-118]. Таким чином, основні показники процесу ЕІЛ визначаються енергією розряду і робочим струмом. Енергія розряду варіюється в діапазоні від долей до 8…10 Дж, а середній струм від 0,2…0,5 до 50…80 А і більше. Ці діапазони забезпечують проведення як м'якого так і грубого процесу ЕІЛ. Чим менша енергія розряду тим менша товщина нанесеного шару. При $I_p > 10A$ на поверхні катоду можливо формування відносно товстих шарів (0,15…0,2 *мм* і більше – грубе ЕІЛ), але їх якісні характеристики (суцільність, рівномірність, мікрогеометричні параметри) різко знижуються [115-118].

В процесі розряду реалізується $\sim 0{,}5\ldots0{,}5W_u$ (W_u - енергія імпульсного розряду). Характер інтенсивності ЕІЛ, а також якісні характеристики ЕІП залежать від багатьох факторів. Найбільш суттєво впливають на процес ЕІЛ параметри імпульсного розряду (W_u, τ_u), тривалість обробки, природа матеріалів електродів, міжелектродне середовище, середній робочий струм і вид руху анода відносно катода. Під енергією імпульсного розряду $W_u = \frac{cv^2}{2}$ розуміють енергію в робочому конденсаторі [115-118].

Дослідження показали, що ЕІЛ-покриття можна отримати при наступних режимах [115]:

- напруга холостого ходу $U_{х.х.}$ (для RC-генераторів) або напруга на робочих електродах $U_p = 10 \ldots 200\, B$;

- струм короткого замикання $I_{к.з.} = 0{,}5 \ldots 10\, A$; робочий струм $I_p \cong 0{,}5 I_{к.з.}$

- ємність робочих конденсаторів $C_p = (10 \ldots 600) \cdot 10^{-6} \Phi$;

- енергія імпульсного розряду $W_u \cong 10^{-2} \ldots 10\, Дж$;

- струм в імпульсі $I_u = 0{,}05 \ldots 1{,}5 A$; тривалість імпульсу $\tau_u = 10^{-6} \ldots 10^{-3} c$

При ЕІЛ існує також границя товщини покриття (табл. 4.2). Для м'яких режимів обробки (енергія розряду менш 0,5Дж) ця границя складає 0,006…0,05 мм. При ЕІЛ з енергією розряду більше 0,5Дж товщина легованого шару складає 0,05…0,15 мм. При грубому ЕІЛ можливе отримання товщини покриття 0,1…0,6 мм і більше, але при цьому різко знижуються його якісні показники (щільність, рівномірність, ….) [115, 116].

Таблиця 4.2

Режими електроіскрового легування

Режим	Тривалість імпульсу, мкс ±20%	Амплітудне значення струму імпульсу, А ±20%	Енергія імпульсу, Дж	Товщина покриття, мм
1	20	125	0,015	0,01
2	40	125	0,09	0,03
3	80	200	0,29	0,1
4	170	200	0,61	0,15
5	350	200	1,26	0,2
6	700	200	2,52	0,3
7	1400	200	5,0	0,5

При проведенні досліджень в якості матеріалу електроду використовували твердий сплав ВК8, композиційний матеріал КХН25 і сплав нікеля з хромом Х20Н80 (табл. 4.3).

В додатку Б наведено електродні матеріали, які пройшли апробацію на промислових підприємствах України [139-151]. Розроблені електроди дозволяють

одночасно підвищити технологічність процесу ЕІЛ та збільшити ресурс деталей в 2,0…2,5 рази [139].

Таблиця 4.3

Механічні властивості електродів

Матеріал електроду	**Міцність на згин** $\sigma_{зг}$, МПа	**Тріщиностійкість** K_{1C}, МН·м$^{1/2}$
Х20Н80	450	4,95
КХН25	750	4,20
ВК8	620	4,50

Формування покриттів за допомогою ЕІЛ здійснюється за різноманітними технологічними схемами, які складаються з різних типів руху самого легуючого електроду, зміцнюємої поверхні та відносного переміщення центрів електродів один відносно іншого. При ЕІЛ можуть бути реалізовані різноманітні кінематичні схеми. В них закон руху електродів і деталі, а також їх взаємне переміщення тісно пов’язані з конфігурацією зміцнюємої поверхні. Вибір кінематичної схеми ЕІЛ обумовлюється вимогами найбільшої продуктивності процесу при досягненні максимально можливих якісних характеристик покриття (суцільності, рівномірності, шорсткості…) [115-118].

Топографію покриття на робочій поверхні деталі можна формувати шляхом переміщення електродів. Змінюючи швидкість переміщення електрода і частоту імпульсів можна регулювати суцільність покриття на робочій поверхні деталі [115-118]. При проведенні досліджень було визначено вплив амплітуди вібрації електрода на товщину покриття на еталонному зразку сталь 45 (рис. 4.4).

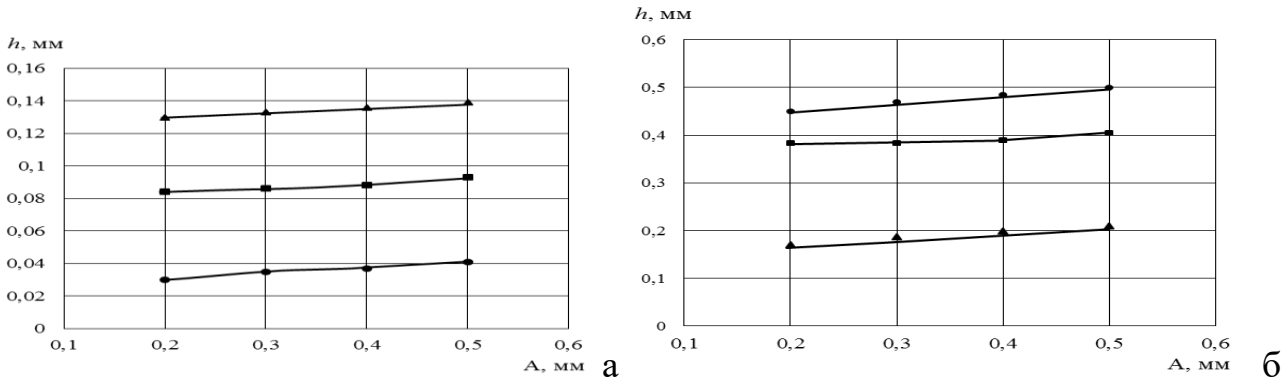


Рис. 4.4. Вплив амплітуди вібрації електрода на товщину покриття: а – ВК8; б – КХН25; ● – $I_{роб.}$ = 1…2 А; ■ - $I_{роб.}$ = 2…3 А; ▲ – $I_{роб.}$ = 3…4 А.

Для ЕІП ВК-8 на сталі 45 формування найбільшої товщини на рівні 130-140 мкм забезпечується при силі струму 3-4 А та амплітуди вібрації електрода 0,2-0,5 мм відповідно. Для покриття КХН25 при цій силі струму та амлітуді вібрації встановлено формування найменшої товщини – 180-200 мкм, формування ж найбільшої товщини 450-500 мкм відбувається при меншій силі струму, на рівні 1-2А.

Струм, напруга, тиск у розрядному проміжку, частота і тривалість імпульсів - основні параметри процесу ЕІЛ, які визначають кількість перенесенного матеріалу покриття, його товщину та адгезію до матеріалу зміцнюємої деталі [115-118].

Одиничний електричний розряд забезпечує стабільність фізико-механічних властивостей покриття. Шляхом зміни параметрів розряду можна наносити покриття різної товщини та суцільності. Частота і тривалість імпульсів визначають термічний вплив на поверхню деталі. На ефективність переносу матеріалу покриття на зміцнюєму поверхню деталі впливає тиск у розрядному проміжку. Напруга розряду впливає на глибину його проникнення і на товщину покриття [115-118].

Струм призводить до інтенсивнішого переносу матеріалу покриття та визначає енергію, що виділяється під час розряду. Більший струм може викликати термічні напруження та тріщини [115-118]. При дослідженні було встановлено, що величина робочого струму ЕІЛ дозволяє регулювати глибину проникнення покриття в зміцнюєму поверхню, товщину та суцільність покриття (рис. 4.5).

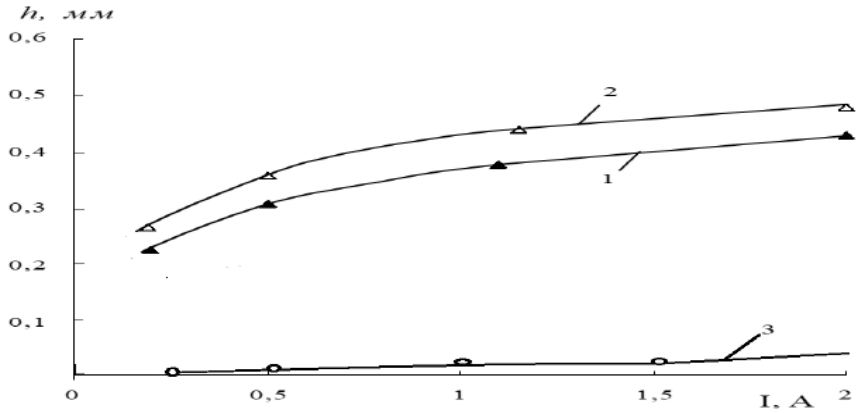


Рис. 4.5. Вплив робочого струму ЕІЛ на товщину покриття:1 – КХН25; 2 – Х20Н80; 3 – ВК8.

Залежність товщини зміцненого поверхневого шару від часу ЕІЛ при нанесені сплаву ВК8 на сталь 65Г приведена на рис. 4.6. Товщина нанесеного шару покриття тим меньша, чим менша енергія імпульсів струму. В процесі обробки виникає необхідність керування даними параметрами, що здійснюється за допомогою зміни режимів. Різні режими обробки (грубі, м'які) застосовуються в залежності від вимог, які пред'являються до зміцнюємої поверхні.

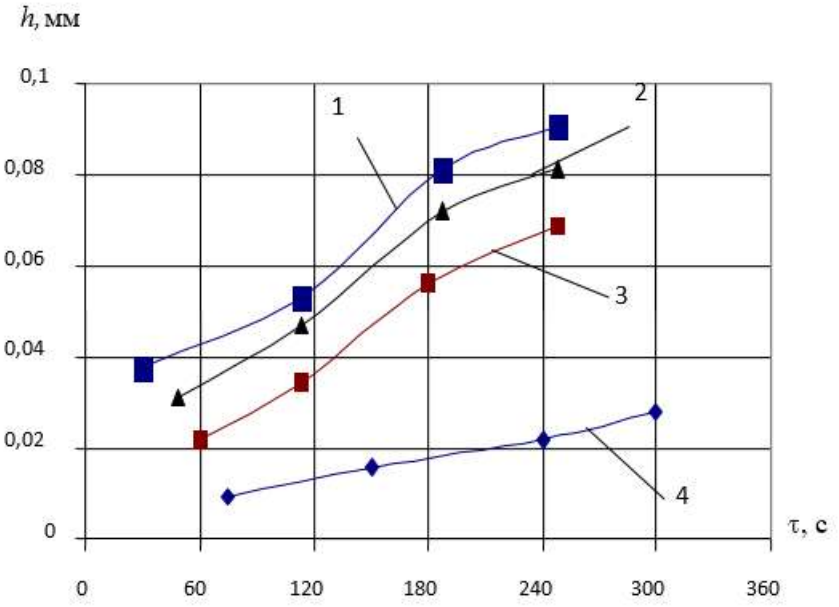


Рис. 4.6. Вплив питомого часу τ електроіскрового легування на товщину нанесеного шару покриття ВК-8 h при робочих струмах: *1* – I = 1,5 А; *2* – I = 1,0 А; *3* – I = 0,8 А; *4* – I = 0,5 А.

Змінюючи напруження та величину струму можна забезпечити співвідношення суцільності покриття до його товщини. Співвідношення розмірів суцільності та товщини ЕІЛ-покриття визначає експлуатаційну надійність зміцнюємих поверхонь деталей, підвищує триботехнічні властивості зміцненого поверхневого шару в 2-3 рази [80, 115-118, 127, 139].

Процес електроіскрового лезування проводили на установці «Елітрон-22» (рис. 4.3) при енергії розряду 0,5 Дж; робочому струмі I = 0,5...1,5 А; напрузі U = 25...55

В; перетині електроду 4...16 мм^2. В процесі формування покриття переміщення електроду відносно поверхні інструмента виконували зі швидкістю 1...5 м/с.

Час нанесення композиційного покриття з карбіду вольфраму на установці для електроіскрового легування «Елітрон-22» представлений в таблиці 4.4, а режими нанесення покриття методом ЕІЛ в таблицях 4.5 і 4.6.

Таблиця 4.4

Час нанесення композиційного покриття WC – (6…8)%Co методом ЕІЛ на установці «Елітрон -22»

Режим обробки (С=300 мкФ)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Час обробки, хв	2-8	1,5-5	1-4	1-3,5	0,5-3,0	0,5-2,5	0,4-2,0	0,3-2,0	0,3-1,5

Таблиця 4.5

Режими нанесення композиційного покриття WC – (6…8)%Co ЕІЛ

Найменування характеристики	**Значення**	
	Режим 1	Режим 2
Напруга живлення, частотою 50 Гц, В	20±10-15%	220±10%
Потужність при номінальній напрузі мережі, кВА	не більше 0,25	не більше 4,5
Кількість технологічних режимів	9 х 2	12 + 2
Частота вібрації електрода вібратора, Гц	220…500	100±10
Продуктивність на найпотужнішому режимі, см^2/хв	не менше 6	не менше 10
Товщина покриття, мм	0,01…0,08	<0,45
Шорсткість поверхні (R_a) покриття, мкм	3,2-12,5	3,2-25

При ЕІЛ електродом ВК8 на установці «Елітрон – 22» товщина зміцненого шару знаходилась в межах 50…400 мкм при мікротвердості 8700…11000 МПа. Від режиму ЕІЛ (енергетичних параметрів устаткування) залежать глибина і твердість зміцненого шару. Зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість: при W_p = 0,15 Дж H_μ = 5584 МПа, а при W_p = 4,8 Дж – 11547 МПа. При W_p = 0,13 Дж формуються тонкі і несуцільні шари. Зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина покриття (рис. 4.7).

Таблиця 4.6

Величина робочого струму в залежності від режимів ЕІЛ

Номер режиму		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Величина струму А	При С=150мкВ	0,4-0,5	0,4-0,5	0,5-0,6	0,50,-0,6	0,6-0,7	0,8-0,9	0,9-1,0	1,0-1,1	1,1-1,2
	При С=300мкВ	1,0-1,2	1,2-1,4	1,6-2,0	2,0-2,2	2,2-2,4	2,4-2,6	2,6-2,8	2,8-3,2	3,0-3,4

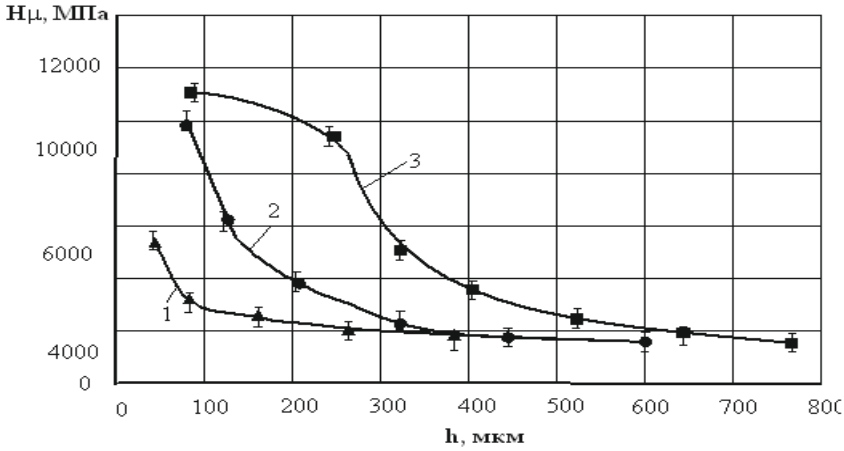


Рис. 4.7. Розподіл мікротвердості покриття із карбіду вольфраму: 1 – Wp = 0,13 Дж, 2 – Wp = 0,55 Дж, 3 – Wp = 4,9 Дж.

При ЕІЛ робочий струм впливає на твердість поверхні, що зміцнюється. Із збільшенням робочого струму при легуванні електродом ВК8 мікротвердість складає на сталі 65Г в середньому 10000 МПа, а при легуванні електродом КХН25 сталі 40Х13 – 8500МПа і має тенденцію до зниження за рахунок підвищення температури зміцнюємої поверхні деталі.

Вплив режимів ЕІЛ, матеріалу електрода та матеріалу зміцнюємої деталі на товщину та мікротвердість покриття представлено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Вплив режимів ЕІЛ, матеріалу електрода та зміцнюємої поверхні на товщину та мікротвердість покриття

№	Матеріал поверхні, що зміцнюється	Матеріал електрода	Робочий струм, А	Середня товщина зміцненого шару, *мкм*	Середня мікротвердість, МПа
1	40Х13	КХН25	2,0	90	7500
2	40Х13	КХН25	2,1	90-160	8500

Продовження таблиці 4.7

3	40Х13	КХН25	2, 5	160-200	8500
4	65Г	ВК8	3,5	55	9500-10000
5	65Г	ВК8	3,2	90-100	9500-10000
6	65Г	ВК8	3,7	160-200	9500-10000
7	Ст.45	Х20Н80	1,0	130	8000
8	Ст.45	Х20Н80	1,3	300	8500
9	Ст.45	Х20Н80	1,5	300	7500

На рис. 4.8 наведено результати вимірювання мікротвердості ЕІЛ-покриттів по глибині деталі зі сталі 65Г. Використовували композиційний матеріал WC – (6…8)%Co.

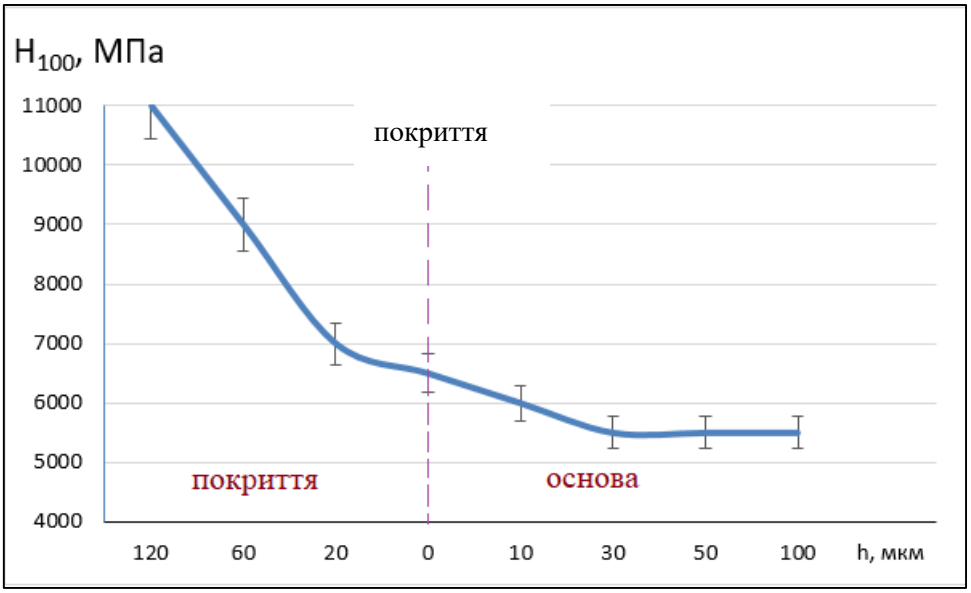


Рис. 4.8. Зміна мікротвердості за товщиною покриття ВК8.

Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів Х20Н80 (рис. 4.9, табл. 4.8) та КХН25 (рис. 4.10, табл. 4.9) свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів хромом, нікелем, залізом, вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійні зони нікелем і хромом збільшуються, причому активніше вглиб від поверхні дифундує нікель і хром.

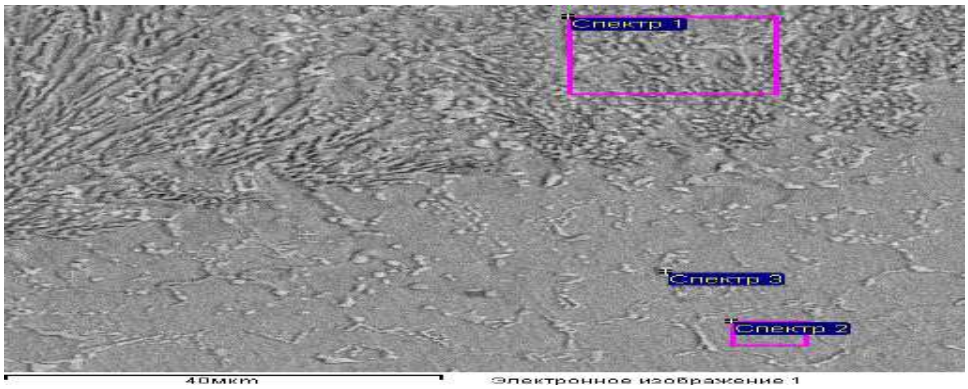


Рис. 4.9. Мікрорентгеноспектральний аналіз зразка з покриттям із сплаву Х20Н80.

Таблиця 4.8

Розподіл елементів по глибині в покритті Х20Н80

Спектр	C	F	**Cr**	Fe	**Ni**
Спектр 1	10.63	2.83	**27.49**	11.06	**40.65**
Спектр 2	6.55	2.59	**18.99**	17.89	**52.92**
Спектр 3	20.53		**13.35**	9.19	**28.04**

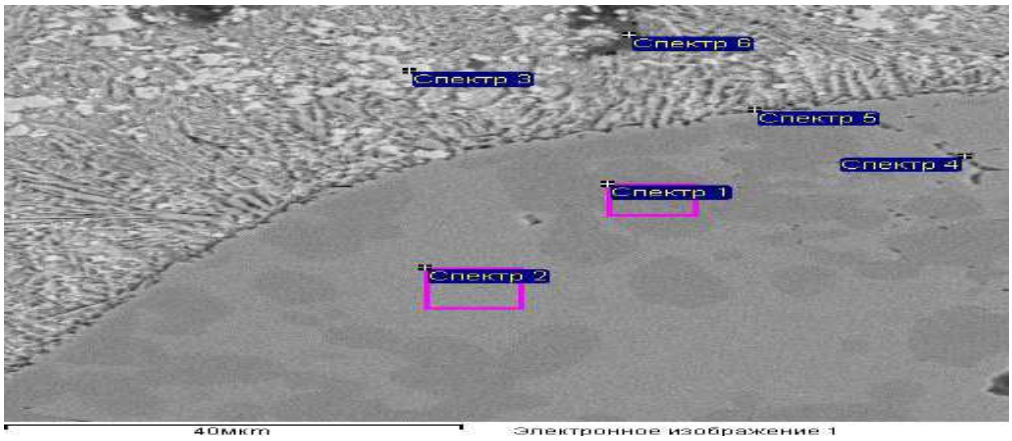


Рис. 4.10. Мікрорентгеноспектральний аналіз зразка з покриттям із композиційного матеріалу КХН25.

Таблиця 4.9

Розподіл елементів по глибині в покритті КХН25

Спектр	C	O	F	Si	**Cr**	Fe	**Ni**
Спектр 1	14.18				**74.16**		**11.66**
Спектр 2	10.53				**75.11**		**14.36**
Спектр 3	35.79	1.94			3.16		1.31
Спектр 4	18.68	13.13		0.34	**45.63**	2.05	**5.65**
Спектр 5	12.37		1.59		**37.77**	11.74	**36.18**
Спектр 6	19.97	15.86		0.34	16.53	4.37	13.12

4.3. Дослідження триботехнічних характеристик композиційних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. Вплив параметрів покриттів на зносостійкість.

Триботехнічні характеристики деталей машин із композиційними ЕІЛ-покриттями значною мірою залежать від режимів ЕІЛ і матеріалу електрода. При дослідженні триботехнічних властивостей композиційних ЕІЛ-покриттів були враховані наступні фактори: матеріал покриття; робочий струм ЕІЛ; амплітуда коливань електрода; товщина покриття; суцільність покриття; контактне навантаження; швидкість ковзання (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Основні фактори, що використовувались при дослідженні триботехнічних характеристик зміцнюємих поверхонь

Основні характеристики і режими	**Значення**		
Матеріал покриття	ВК8	КХН25	Х20Н80
Матеріал зміцнюємої поверхні	65Г	Сталь 40Х13	Сталь 45
Робочий струм, *А*	1 – 5		
Амплітуда коливань електроду, *мм*	0,2 - 0,5		
Швидкість ковзання, *м/с*	0,1 - 0,5		
Контактне навантаження, σ_{max}, *МПа*	0 – 20		

Дослідження триботехнічних характеристик проведено на модернізованій машині типу 2070 СМТ-1 з реєструванням головних триботехнічних характеристик програмно-технічним комплексом. Дослідження на абразивне зношування проведено на спеціальній установці в середовищі вільних абразивних частинок. В якості триботехнічних характеристики, що підлягають оцінці в процесі випробувань, були обрані ваговий знос і коефіцієнт тертя.

Перед випробуваннями робочі поверхні тіл, що контактують, знежирювалися спиртом і ацетоном та висушувалися. Вимірювання величини зношування зразків здійснювалося за втратою ваги при випробуваннях. З поверхні зразків перед зважуванням ретельно видалялися продукти зношування, потім промивали зразки, протиралися спиртом і просушувалися в сушильній шафі при температурі ~ 100^0С.

В результаті експериментальних досліджень на модернізованій машині типу 2070 СМТ-1 були одержані залежності триботехнічних характеристик (інтенсивності зношування ($i_п$) та коефіцієнту тертя (f)) для різних матеріалів від питомих навантажень та швидкостей ковзання (рис. 4.11-4.13). В серії цих експериментів товщина покріттів становила 200…250 мкм.

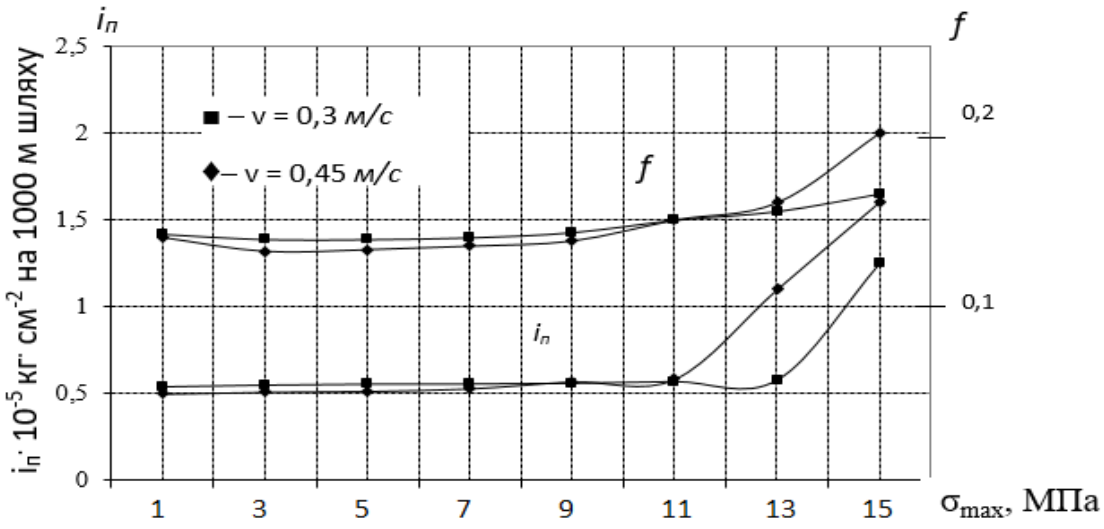


Рис. 4.11. Залежність триботехнічних характеристик від контактного навантаження та швидкості ковзання для композиційного покриття з карбіду вольфраму ВК8 (WC-6 %Co).

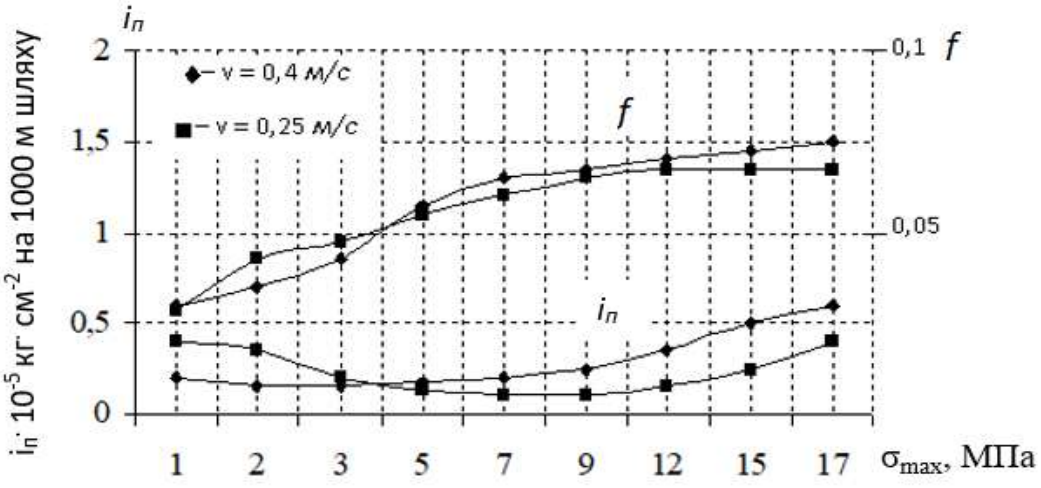


Рис. 4.12. Залежність триботехнічних характеристик від контактного навантаження та швидкості ковзання для покриття зі сплаву Х20Н80.

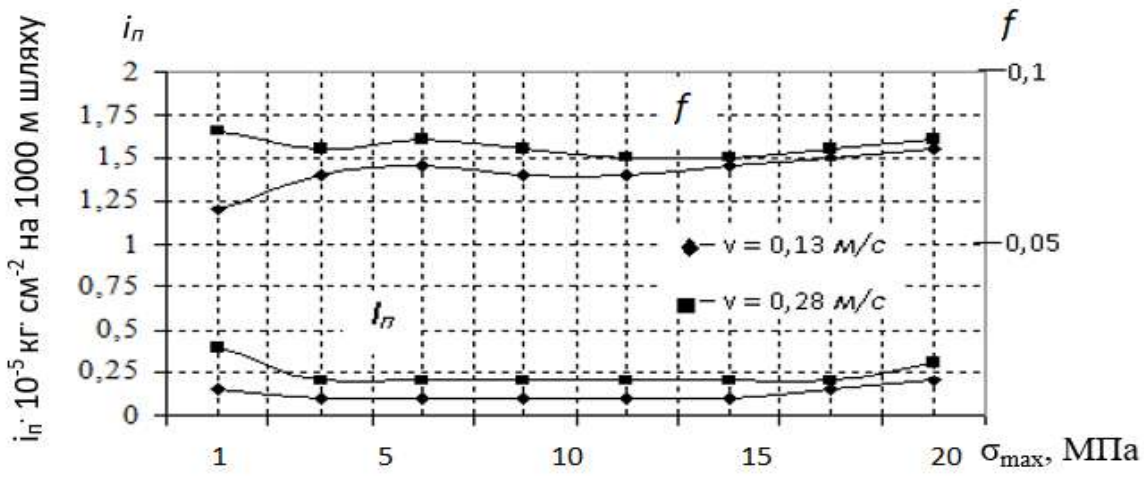


Рис. 4.13. Залежність триботехнічних характеристик від контактного навантаження та швидкості ковзання для композиційного покриття КХН25

Узагальнення результатів досліджень інтенсивності зношування та коєфіцієнтів тертя при швидкості ковзання 0,3 м/с дозволило зробити висновок, що покриття з композиційного матеріалу КХН25 має найкращі триботехнічні показники (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

Результати досліджень триботехнічних характеристик

Матеріал покриття	Матеріал зміцнюємої поверхні	Контактне навантаження σ_{max}, *МПа,*	$i_п \cdot 10^{-5}$ *кг·см^2* на 1000 *м* шляху	f
Х20Н80	Сталь 45	< 9	0,3	0,075
КХН25	40Х13	< 18	0,23	0,065
ВК8	65Г	< 11	0,51	0,15

Зменшення інтенсивності зношування покриття композиційного матеріалу КХН25, в порівнянні з покриттям твердого сплаву ВК8 обумовлено наявністю більшої частки матричної основи нікелю в структурі композиційного матеріалу (22…25%), що забезпечує ефективну здатність матриці щодо оптимального розподілу навантаження на локальних ділянках зони контакту та її високу

демпфуючу здатність в приповерхневих шарах контактних поверхонь при підвищенні контактного навантаження до 18 МПа.

Вплив товщини ЕІЛ-покриття h_n, на інтенсивності його зношування i_n , наведено на рис. 4.14.

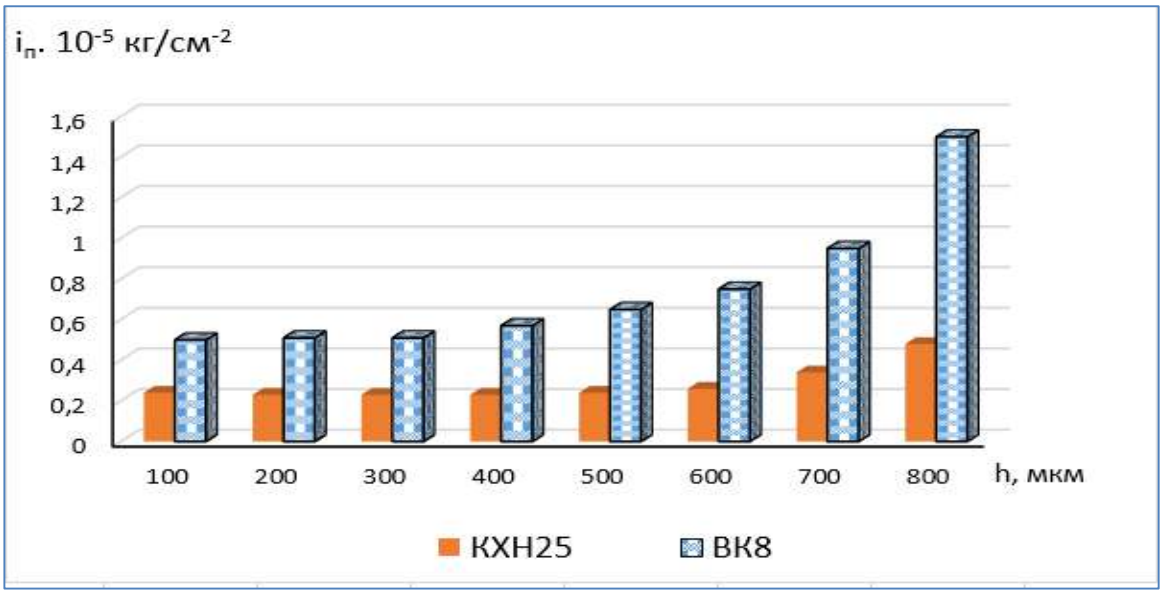


Рис. 4.14. Залежність інтенсивності зношування (i_n) ЕІП від їх товщини (h) при V=0,2 м/с, σ_{max} =10 МПа.

Для ЕІП ВК8 мінімальна інтенсивність зношування характерна при товщині покриття 100…300 мкм, надалі, при зростанні товщини покриття до 800 мкм інтенсивність зношування збільшується в 3 рази. Для ЕІП композиційного матеріалу КХН25 мінімальна інтенсивність зношування на рівні 0,0023·г/см^2 на 1000 м шляху зберігається для покриття товщиною 100…500 мкм, що в 2,5 рази менше, ніж для ЕІП ВК8. При товщині ЕІП КХН25 800 мкм, його інтенсивність зношування зростає вдвічі, але, в порівнянні з ЕІП ВК8, даний параметр менше в 3,1 рази.

Оскільки з товщиною покриття має функціональний зв'язок несуча здатність деталей з покриттям в умовах експлуатації, то при формуванні композиційних ЕІЛ-покриттів одним із основних його параметрів є товщина.

Для нормальної роботи ЕІЛ-покриттів їх товщина не повинна перевищувати 500 мкм для КХН25 та Х20Н80, в той час як для ЕІП ВК8 оптимальна товщина ЕІП

має становити 100…300 мкм. Покриття з композиційних матеріалів КХН25 і Х20Н80 мають високу протизадирну стійкість за рахунок зовнішнього пластичного шару. Це дозволяє наносити їх товщиною до 0,5…0,6 мм без зниження експлуатаційних характеристик.

Експлуатаційні показники зміцнених поверхонь з електроіскровими покриттями залежать не тільки від товщини покриття, а і від його суцільності.

Нанесення покриття змінної суцільності здійснюється шляхом зміни швидкості переміщення електрода. При ЕІЛ переміщення електрода дає можливість формувати різну топографію покриття на зміцнюємій поверхні деталі. Змінюючи величину струму і напругу можна забезпечити співвідношення суцільності покриття до його товщини. Суцільність та її співвідношення до товщини покриття визначають експлуатаційну надійність деталі, наприклад, підвищують її триботехнічні властивості.

Дослідження показали, що для підвищення триботехнічних характеристик композиційного електроіскрового покритя немає необхідності в отриманні суцільного покриття, досить виконати зміцнення окремих ділянок, розташованих певним чином на зміцнюємій поверхні з визначеною суцільністю ψ:

$$\psi = S / S_o, \qquad (4.3)$$

де S площа, займана ділянками покриття, S_o - площа зміцнюємої поверхні.

Композиційні покриття змінної суцільності формували у вигляді мікрозон (до 1,0 мм) у напрямі вектора ковзання із суцільністю ψ = (20...90)%. Суцільність покриття визначалася за методикою [123-125, 139, 194, 201], точність її визначення становила ±5%. Шляхом зміни швидкості переміщення електрода регулювали суцільність покриття.

Для вибору оптимальних параметрів ЕІЛ-покриття несуцільної структури були проведені експерименти для встановлення залежності триботехнічних характеристик від суцільності ψ. Випробуванням піддавали три варіанти покриттів: ВК8, КХН25, Х20Н80. Експерименти проводили в умовах впливу абразиву за методикою, представленою в розділі 2.

В основу вибору величини суцільності було покладено залежність зносостійкості від суцільності. На рис. 4.15 наведено залежність вагового зносу покриття від його суцільності.

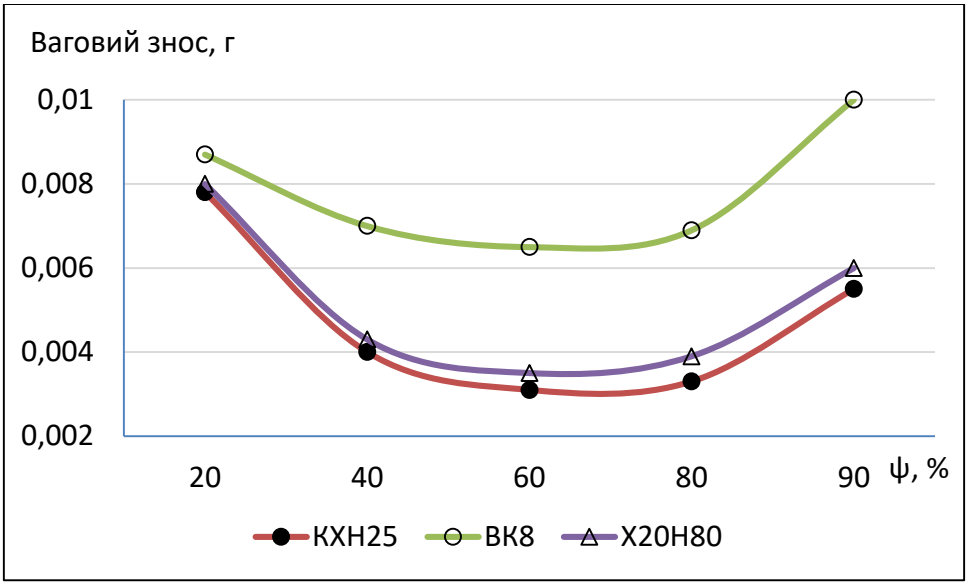


Рис. 4.15. Залежність вагового зносу експериментальних зразків з ЕІЛ покриттям від суцільності покриття (ψ).

При суцільності ψ = 55...75 % встановлено мінімальне абразивне зношування електроіскрових покриттів, незалежно від досліджуваного типу покриття. Отримані результати досліджень підтвердили дослідження авторів в роботах [123-125, 194, 201-223]. Визначено, що кращі показники якості зміцнюємих поверхонь отримані при суцільності ψ = 70% і співвідношенням зміцненої і незміцненої ділянок покриття 2/1.

Для ЕІП ВК8 ваговий знос в умовах дії незакріплених абразивних часток в 1,8-2 разів перевищує ваговий знос ЕІП КХН25 та Х20Н80. Це пов'язано з тим, що мікротвердість ЕІП ВК8 в 1,3 рази перевищує даний параметр для покриттів з КХН25 та Х20Н80, що спричинює крихкість даного покриття. Також висока мікротвердість покриття ВК8 призводить до зниження опору абразивному зношуванню внаслідок зниження дотичного опору зсуву при втіленні твердої абразивної частки, що обумовлено низькою часткою матричної складової (кобальту)

в структурі твердого сплаву ВК8. Доріжки тертя ЕІП ВК8 характеризуються наявністю великих борозен, наявні прояви викришування (рис. 4.16). Для ЕІП КХН25 доріжки тертя характеризуються однорідною структурою, що свідчить про високий ступінь опору ЕІП при впровадженні абразивних часток.

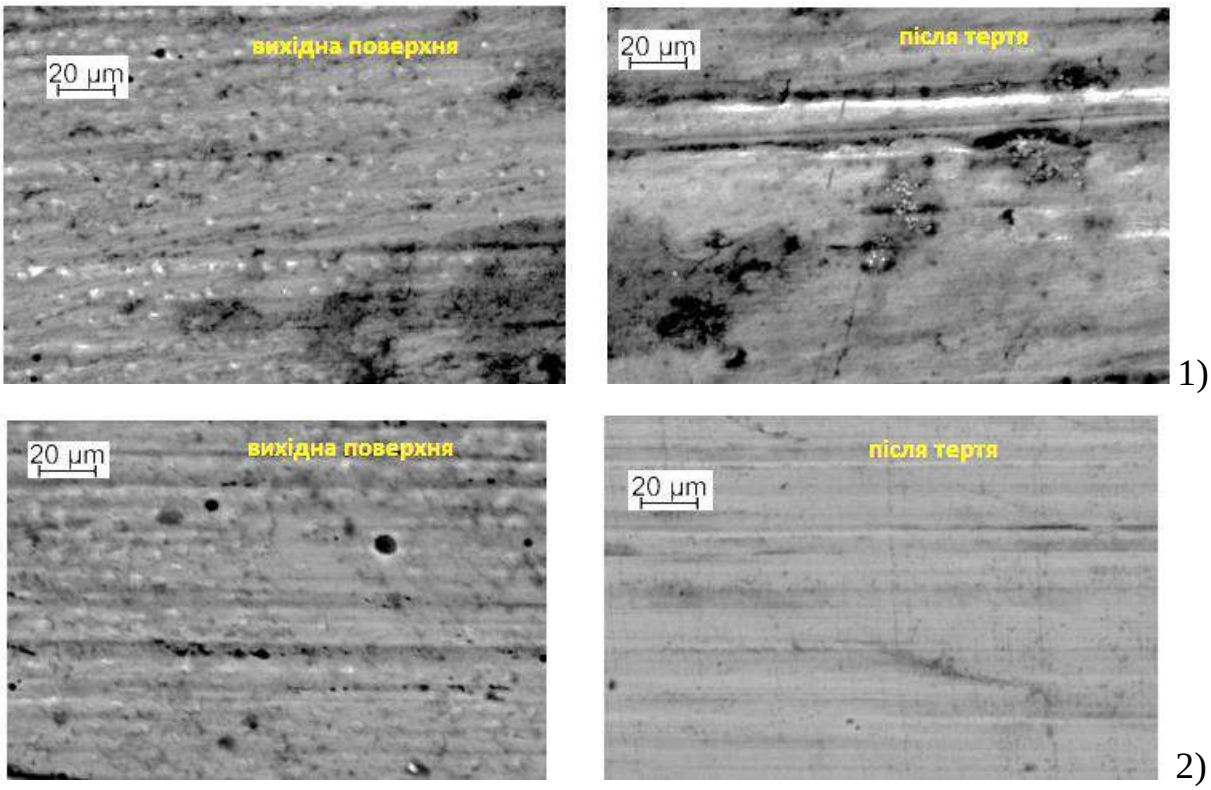


Рис. 4.16. Зовнішній вигляд вихідної поверхні та поверхні після тертя в умовах впливу незакріпленого абразиву: 1 – ВК8, 2 – КХН25.

4.4. Використання композиційних покриттів для підвищення зносостійкості робочих органів і триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин (на прикладі зміцнення ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну і валу муфти зчеплення трактора).

Результати виконаних досліджень були використані при зміцненні робочих органів і відновленні деталей сільскогосподарських машин і довели перспективність застосування композиційних матеріалів і твердих сплавів для підвищення їх триботехнічних властивостей та строку експлуатації.

Рекомендаціїї для отримання якісних композиційних покриттів методом електроіскрового легування були запропоновані на прикладі зміцнення ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну та відновлення валу муфти зчеплення та розподільного валу двигуна трактора.

Для отримання якісних покриттів методом ЕІЛ необхідно враховувати ряд наступних рекомендацій:

- -кожному заданому електричному режиму відповідає визначена максимальна товщина шару;

- чим більше інертне середовище, в якому відбувається ЕІЛ, тим товщі можуть бути покриття, які наносяться;

- для того, щоб отримати поверхні з найменшою шорсткістю, необхідно зменшити енергію одиничних імпульсів, при цьому частота імпульсів, які передаються повинна бути максимально можливою.

Практика використання методу ЕІЛ дозволяє зробити висновок, що для отримання якісних покриттів (з високою суцільністю, товщиною і низькою шорсткістю) необхідний вибір оптимальних технологічних прийомів, режимів обробки, міжелектродних середовищ, матеріалів легуючих електродів.

Формування покриття за допомогою ЕІЛ здійснюється за наступними етапами:

- здійснюється підготовка поверхні перед ЕІЛ. Перед нанесенням електроіскрового покриття поверхню деталі шліфують до Ra = 0,5 мкм;

- вибирається матеріал електродів і режими процесу ЕІЛ;

- вибираються відносні переміщення електродів;

- вибираються енергетичні параметри генератора імпульсів струму;

- вибираються додаткові види обробки.

Перед ЕІЛ поверхні не вимагають особливої підготовки із застосуванням спеціальних механічних і хімічних видів обробок. При утворенні на поверхні деталей оксидної плівки або іншого забруднення їх очищали механічним шляхом за допомогою металевої щітки або наждачного папіру. Від масляних плям поверхні

деталей промивали в 10-15% розчині каустичної соди при температурі 90^0С на протязі 10…15 хвилин, а потім у воді при температурі 80…90^0С з наступним просушуванням у потоці горячого повітря.

При зміцненні ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну необхідно враховувати їх призначення, конструктивні особливості та умови експлуатації (процес різання та подрібнення рослинної маси або зернової сировини, взаємодію абразивних часток з робочою поверхнею ножів, механізм їх абразивного зношування, загальний характер зносу лез ножів і зміна їх геометрії).

Різання – найменш енергоємний засіб подрібнення кормів, який широко використовується у сільськогосподарському виробництві. Однак, не дивлячись на розповсюдженість процесу різання сільськогосподарських рослин, це питання вивчено ще недостатньо, особливо стосовно до ріжучих апаратів.

Ріжучі апарати відрізняються конструкцією, енергоємністю та продуктивністю [120]. Зносостійкість лез ножів є одним з важливих факторів, що має суттєвий вплив на якість подрібнення кормів, питому енергоємність та довговічність машин в цілому [49, 81].

Довговічність ножів кормоподрібнюючих машин залежить від їх правильної експлуатації, своєчасного технічного обслуговування та ремонту [70, 81]. Вивчення існуючих способів підвищення довговічності ріжучих органів та аналіз вимог, що пред’явлені до кормоподрібнюючих машин, розкривають принципову залежність між ними (рис. 4.17).

Використаний в роботі спосіб підвищення зносостійкості ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну композиційними електроіскровими покриттями дозволить підвищити їх довговічність і термін експлуатації.

Сучасні високопродуктивні кормоподрібнювачі СГМ характеризується високим рівнем навантажень на робочі органи подрібнюючого апарату. Це призводить до інтенсифікації процесу зношування ріжучих елементів. Знос ріжучих елементів кормоподрібнюючих машин визначається кінематичними особливостями

процесу. Так, згідно даних виробничих досліджень, у серійного ножа (сталь 65Г, гартування СВЧ) після напрацювання 1000 год радіус закруглення складає 2,5 – 3,0 мм. В додатку Б представлена характеристика подрібнюючого апарату комбайна. Строк служби подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну лімітується зносостійкістю їх ножів.

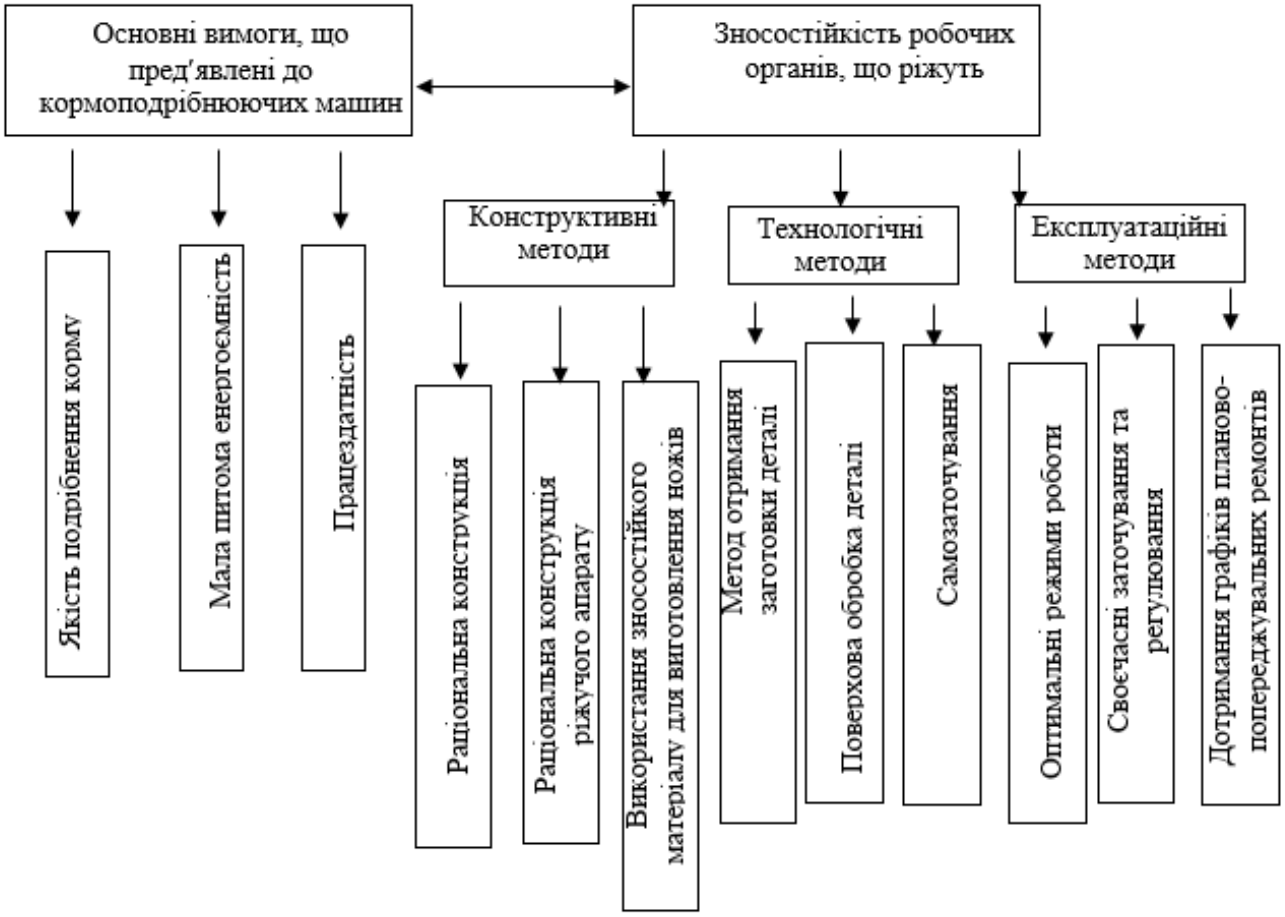


Рис. 4.17. Схема взаємозв'язку між основними вимогами, що пред'являються до подрібнюючих машинам та довговічністю їх робочих органів.

Найбільш раціональним і економічно доцільним рішенням проблеми підвищення зносостійкості і довговічності робочих органів сільськогосподарських машин є зміцнення і відновлення швидкозношуємих деталей шляхом нанесенням на їх робочі поверхні матеріалів з високими експлуатаційними властивостями.

Тому кінцевою метою дисертаційної роботи було показати доцільність зміцнення і відновлення робочих органів і деталей сільськогосподарських машин

композиційними електроіскровими покриттями на прикладі ріжучих кромок ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну.

Процес ЕІЛ при зміцненні і відновленні ножів подрібнюючого барабану кормозбирального комбайну полягає в нанесенні несуцільного покриття товщиною 0,5…0,6 мм у вигляді ділянок із зазором 1...1,5 мм на ріжучу кромку (рис. 4.18).

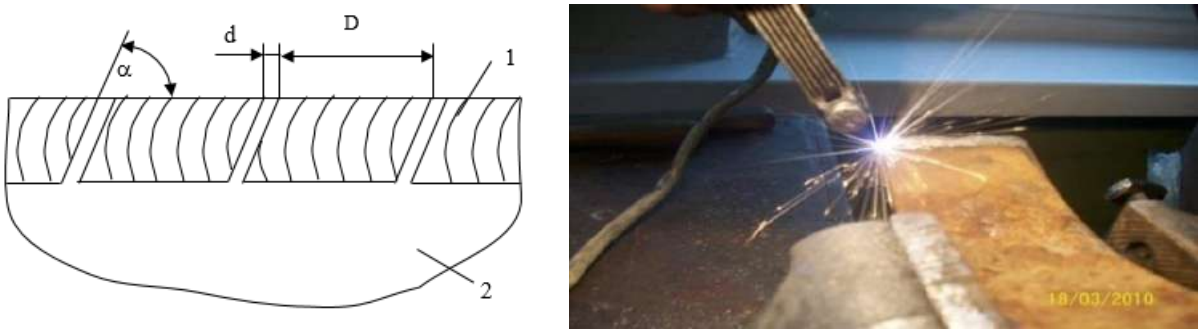


Рис. 4.18. Схема нанесення несуцільного покриття (1) на ріжучу кромку (2) ножа.

Ножі подрібнюючого барабану комбайна з різною суцільністю покриття представлені на рис. 4.19. Твердість покриття визначається твердістю його матеріалу та може досягати 62 HRC. Ресурс роботи ножів подрібнюючого барабану комбайна збільшився в 2-4 рази. Несуцільні покриття ріжучих елементів РО СГМ знизять число рикошетів сировини при його подрібненні, збільшать продуктивність і зносостійкість ріжучих елементів робочих органів, які його подрібнюють.

а) б) в)

Рис. 4.19. Приклад ножів подрібнюючого барабану (а) з покриттям із карбіду вольфраму ВК8 різної суцільної (б, в): б – суцільність покриття 85%; б – 60%

Приклади відновлених і зміцнених нами деталей робочих органів сільськогосподарських машин із композиційними покриттями, нанесеними методом електроіскрового легування представлені на рис. 4.20. Результати випробувань рабочих органов СГМ з покриттями наведено в таблиці 4.10.

а б в

г д е

Рис. 4.20. Загальний вигляд зміцнених і відновлених деталей робочих органів СГМ композиційними електроіскровими покриттями: а - культиваторна лапа; б - ножі подрібнюючого барабану; в – ніж копача і г, д - ножі бурякозбиральних машин

Таблиця 4.10

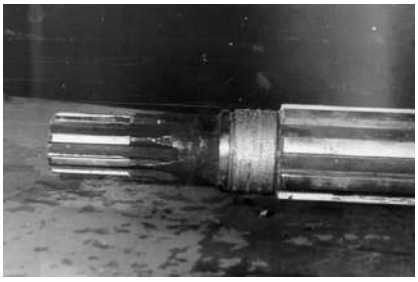
Результати випробувань рабочих органов СГМ із покриттями

Вихідний матеріал	**Деталь**	**Середнє значення величини зносу, мм**
Нові деталі без покриття	Ніж подрібнюючого барабану	
	Протиріжуча пластина	
Зміцненні з покриттям	Ніж подрібнюючого барабану	
	Протиріжуча пластина	

Експлуатаційні випробування зміцнених і відновлених деталей композиційними покриттями показали підвищення їх зносостійкості та строку

експлуатації в 2…2,5 рази, що представляє практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств.

Технологію електроіскрового легування використовували при відновлення посадкових місць під підшипники муфти зчеплення трактора та шийок розподільних валів двигунів (рис. 4.21).



а

б

Рис. 4.21. Вал 1721113-У муфти зчеплення трактора Т-170 (а) і розподільний вал 14-04-20-1 двигуна Д-160.111-1 (б) з покриттям.

Результати випробувань валів представлені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

Результати випробувань валів

Вихідний матеріал	**Деталь**	**Середнє значення величини зносу, мм**
Нові деталі	Вал муфти зчеплення	
	Розподільний вал	
Відновленні	Вал муфти зчеплення	
	Розподільний вал	

Випробування валів з електроіскровими покриттями з ніхрому (вал муфти зчеплення трактора) і композиційного матеріалу КХН25 (розподільний вал) показали підвищення строка їх експлуатації в 2,5-3 раза.

Випробування експериментальних зразків зміцнених і відновлених деталей була виконана в виробничих умовах на ВАТ «Агробудавтосервис» (м. Кропивницький) при відновлення валу муфти зчеплення трактора і деталей двигуна покриттям із ніхрому та при виготовлені робочих органів деталей сільськогосподарської техніки з покриттям із карбіду вольфраму і карбіду хрому та (Акти представлені в додатках).

Висновки до розділу 4.

1. Обгрунтовано, що найбільш суттєво впливають на процес електроіскрового легування параметри імпульсного розряду (W_u, τ_u), тривалість обробки, матеріалів електродів, міжелектродне середовище, середній робочий струм і вид руху анода відносно катода. Ці параметри визначають кількість перенесенного матеріалу покриття, його товщину та суцільність.

2. Проведені дослідження дозволили визначити, що шляхом зміни параметрів розряду можна наносити покриття різної товщини та суцільності, так при збільшенням енергії розряду товщина покриттів збільшується. Встановлено при енергії розряду менш 0,5Дж товщина покриття складає 0,005…0,03 мм, при енергії розряду більше 0,5Дж - 0,05…0,12 мм, при визначених умовах обробки можливе отримання покриття товщиною 0,2…0,5 мм і більше.

3. Визначено, що зі збільшенням робочого струму при легуванні електродом ВК8 мікротвердість на сталі 65Г складає в середньому 10000 МПа, а при легуванні електродом КХН25 сталі 40Х13 – 8500МПа, а при форсуванні режиму ЕІЛ мікротвердість покриттів має тенденцію до зниження за рахунок підвищення температури зміцнюємої поверхні та деталі.

4. Встановлено при дослідженні наступні закономірності:

- величина робочого струму ЕІЛ дозволяє регулювати глибину проникнення покриття в зміцнюєму поверхню, його товщину та суцільність;

- струм визначає енергію, що виділяється під час розряду;

- змінюючи величину струму та напругу можна забезпечити співвідношення розмірів суцільності покриття до його товщини. Величина цього співвідношення впливає на зносостійкість і експлуатаційну надійність зміцнених поверхонь деталей;

- змінюючи частоту імпульсів і швидкість відносного переміщення анода і катода можна регулювати суцільність покриття;

5. Наведено триботехнічні характеристики покриттів для різних матеріалів при різних швидкостях ковзання та питомих навантаженнях. Для нормальної роботи ЕІЛ-покриттів їх товщина не повинна перевищувати 500 мкм (КХН25 та Х20Н80) та 300 мкм (ВК8). Покриття з композиційних матеріалів КХН25 і ніхрому мають високу протизадирну стійкість за рахунок збільшення опору пластичному деформуванню. Це дозволяє наносити їх товщиною до 0,5…0,6 мм без зниження експлуатаційних характеристик.

6. Визначено, що мінімальний знос зміцнюємих поверхонь має місце при суцільності покриття близько 60…75%.

7. Виконано експлуатаційні випробування зміцнених і відновлених деталей КП, які показали підвищення їх зносостійкості та строку експлуатації в 2…3 рази, що представляє практичне значення для сільськогосподарських підприємств.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано умови експлуатації сільськогосподарських машин і вплив основних чинників на абразивне та корозійно-механічне зношування їх деталей і робочих органів. Показано, що перспективним шляхом підвищення триботехнічних властивостей деталей сільскогосподарських машин є застосування зносостійких композиційних покриттів. Визначено, що вибір методу формування композиційних покриттів визначається умовами експлуатації сільскогосподарських машин; конструкцією деталей; складом матеріалів деталі та композиційного покриття; економічною доцільністю.

2. Запропоновано загальну схему експериментальних досліджень та комплексний методологічний підхід формування зносостійких композиційних покриттів ВК8, КХН25, Х20Н80 методом електроіскрового легування з урахуванням параметрів імпульсного розряду, тривалості обробки, матеріалів електродів, робочого струму, руху анода відносно катода, що визначають кількість перенесенного матеріалу покриття, його товщину та суцільність.

3. Доведено, що забезпечити мінімальний рівень НДС електроіскрових покриттів можна шляхом вибору оптимальних значень їх товщини та суцільності. Зі збільшення суцільності > 80% (зменшенням відстані між ділянками покриття) та зменшення суцільності покриття < 50% зростає концентрація напружень. Для різної товщини покриттів характерно максимальне зниження напружень при суцільності покриття 60…80%. Обгрунтовано, що шляхом зміни суцільності та товщини покриття, а також вибором матеріалів за фізико-механічних характеристиками можливо мінімізувати НДС зміцнюємих поверхонь і керувати ним.

4. Визначено, що мінімальний знос зміцнюємих поверхонь в умовах ковзання без змащувального матеріалу має місце при суцільності покриття близько 60…75%. При суцільності ψ = 55...75 % встановлено мінімальне абразивне зношування електроіскрових покриттів ВК8, КХН25, Х20Н80. Для ЕІП КХН25 встановлено найбільш високий ступінь опору ЕІП при впровадженні абразивних часток.

5. Для ЕІП ВК8 ваговий знос в умовах дії незакріплених абразивних часток в 1,8-2 разів перевищує ваговий знос ЕІП КХН25 та Х20Н80, що обумовлено збільшенням мікротвердості ЕІП ВК8 в 1,3 рази, крихкістю покриття, зниженням дотичного опору зсуву при втіленні твердої абразивної частки, що спричинено низькою часткою матричної складової (кобальту) в структурі твердого сплаву ВК8.

6. Підвищення зносостійкості ЕІП композиційного матеріалу КХН25 обумовлено наявністю більшої частки матричної основи нікелю в структурі композиційного матеріалу (22…25%), в порівнянні з ВК-8, що забезпечує ефективну здатність матриці щодо оптимального розподілу навантаження на локальних ділянках зони контакту та її високу демпфуючу здатність в приповерхневих шарах контактних поверхонь при підвищенні контактного навантаження до 18 МПа.

7. Наведено триботехнічні характеристики покриттів для різних матеріалів при різних швидкостях ковзання та питомих навантаженнях. Визначено, що для нормальної роботи ЕІЛ-покриттів їх товщина не повинна перевищувати 500 мкм (КХН25 та Х20Н80) та 300 мкм (ВК8). Покриття з композиційних матеріалів КХН25 і ніхрому мають високу протизадирну стійкість за рахунок збільшення опору пластичному деформуванню. Це дозволяє наносити їх товщиною до 0,5…0,6 мм без зниження експлуатаційних характеристик.

8. Виконано експлуатаційні випробування зміцнених і відновлених деталей КП, які показали підвищення їх зносостійкості та строку експлуатації в 2…3 рази, що представляє практичне значення для сільськогосподарських підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г., Павх І.І. Машини сільскогосподарського виробництва: навч. посіб. Тернопіль, 2005. 228 с. https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/14777

2. Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. Машини для обробітку грунту та внесення добрив: навчальний посібник. Харків. 2016. 244 с. https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/5475.

3. Сисолін В.П., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. За ред. М.І. Черновола. Київ, Урожай. 2001. 384 с. ISBN 966-05-0070-X.

4. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т.1(4.1). Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. Харків, Око. 2001. 444 с. ISBN 966-526-069-3

5. ДСТУ ISO 4197: 2004. Грунтообробне обладнання. Лапи культиваторів. Національний стандарт України. [Чинний від 2006-06-09]. Київ, Держспоживстандарт України, 2006. 4 с. https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=91922

6. ДСТУ ISO 5680: 2004. Грунтообробне обладнання. Стояки та лапи культиваторів. Національний стандарт України. [Чинний від 2006-09-01]. Київ, Держспоживстандарт України, 2006. 6 с.

7. Офіційний сайт АТ «Ельворті» [Електронний ресурс]. https://elvorti.com/.

8. Офіційний сайт ВАТ “Уманьферммаш” [Електронний ресурс]. http://fermmash.com/corp/index.php/ru/.

9. Аулін В.В., Бобрицький В.М. Характер та інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Проблеми трибології (Problems of Tribology).* Хмельницький, ХДУ. 2004. №2. С. 107-112.

10. Денисенко М.І., Зазимко О.В., Лабунець В.Ф. Дослідження поверхонь тертя робочих органів грунтобробних сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування.* 2016. №1(70). С. 150-153.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz_2016_1_18.

11. Борак К.В., Руденко В.Г., Кравчук А.В., Добранський С.С. Фізичні, хімічні та механічні процеси в трибосистемі «робочий орган – ґрунт». *Вісник Харківського національного технічного університету сельского господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2017. Вип. 181. С. 143–147. https://elartu.tntu.edu.ua

12. Stawicki T., Kostencki P., Białobrzeska B. Roughness of Ploughshare Working Surface and Mechanisms of Wear during Operation in Various Soils. *Metals*. 2018. №8. 1042. https://doi.org/10.3390/met8121042.

13. Тихий А.А. Керування процесами зношування робочих органів грунтобробних машин в гетерогенному середовищі грунту: дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.04-Тертя та зношування в машинах. Кіровоград. 2012. 202 с.

14. Черновол М.І., Аулін В.В., Бобрицький В.М., Тихий А.А. Закономірності взаємодії різальних елементів робочих органів грунтобробних машин з ґрунтом. *Вісник інженерної академії України.* Київ. 2008. №3-4. С. 196-203.

15. Аулін В.В., Бобрицький В.М, Ауліна Т.М. Керування характером та інтенсивністю зношування різальних частин робочих органів грунтобробних машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сельского господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Вип.23. Харків. 2004. С. 270-273.

16. О.В. Козаченко, В.С. Каденко, О.М. Шкрегаль Теоретичне обґрунтування раціональної геометричної форми леза лапи культиватора. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2016. Вип. 10(1). С. 48-52. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2016_10%281%29__10

17. Савченко В.М., Куликівський В.Л., Климчук А.А., Климчук Д.А, *Жека Б.В.,* Фещук І.П Аналіз довговічності робочих органів плугів та методів визначення тиску ґрунту на поверхню тертя. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь:* збірник тез VII-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції (31 березня 2021 року, Житомир).

Житомир, ЖАТК. 2021. С. 177-179. https://zhatk.zt.ua/wp-content/uploads/2023/03/zbirnik-tez-zhitomir-2021.pdf

18. Filipovic Dubravko, Banaj Duro, Kosutic Silvio, Josipovic Marco, Simic Branimir Comparison of the protected and unprotected plough share wear by the abrasion of the soil particles. *Strojarstvo*. 2003. 45. №1-3. P. 17-23. 214.

19. Борак К.В. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації. *Біоресурси і природокористування.* 2020. Том 12, №1-2 [Електронний ресурс]. http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/13870.

20. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Блезнюк О.В., Каденко В.С. Формування зубчастого леза при зношуванні лап культиватора. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* Науковий журнал. Харків, ХНТУСГ. 2014. №1. С. 77-85.
http://ts.khntusg.com.ua/index.php/ts/article/view/396/401

21 Демидко М.О., Бондарев С.І. Вплив ступеня спрацювання лез культиваторних лап на якісні показники їх роботи. *Науковий вісник НАУ.* Київ, НАУ, 2004. Вип. 73.4.2. С. 60-64.

22. Гаврильченко А.С. Особенности износа культиваторних лап з криволинейным лезвием. *Вісник Харківського національного технічного університету сельского господарства імені Петра Василенка. З*б. наук. пр. Харків. 2006. Вип. 44. Т. 2. С. 34-38.

23. М.І. Черновол, Т.В. Ворона Умови експлуатації і основні причини виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Кіровоград, КДТУ. 2011. Вип. 24. С. 344-351. https://core.ac.uk/download/pdf/42032737.pdf

24. Водяник І.І. Експлуатаційні властивості тракторів і автомобілів. Київ, Урожай. 1994. 224 с.

25. Б.А. Ляшенко, Ю.В. Брусило, Т.В. Ворона, С.А. Довжук Анализ причин изнашивания деталей цилиндропоршневой группы двигателя. *Инженерия поверхности и реновация изделий:* материалы 11-й международной научно-технической конференции (27-29 мая 2011 г., Ялта). Киев. 2011. С. 120-124. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb2-11s.pdf

26. Аулін В.В. Напрямки побудови фізико-математичних моделей процесів тертя та зношування в машинах. *Технічний сервіс в АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні.* Вісник Харківського національного технічного університету сельского господарства імені Петра Василенка. Збірник наукових праць. Харків, 2005. Вип. 40. С. 349-354.

27. Markov D., Kelly D. Establishment of a new class of wear: adhesion initiated catastrophic wear. *Int. J. Appl. Mech. And Eng.* 2002. 7, №3. P. 887–901.

28. А.В. Бойко, В.М. Пришляк, В.Н. Яропуд, Т.В. Лопата Умови експлуатації, основні причини виходу з ладу та основні напрямки підвищення зносостійкості ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природо використання.* Київ, НУБІП. 2010. Вип. 4. №144. С. 200-208.

29. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчал. посібник. Тернопіль, Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 234 с. http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1076

30. В.В. Шевеля, В.П. Олександренко Трибохимия и реология износостойкости. Хмельницкий, ХНУ. 2006. 278 с.

31. М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут Трибологія: підручник. Київ, видавництво «НАУ-друк». 2009. 410 с.
http://elar.tsatu.edu.ua › bitstream › Триботехніка..

32. Антипенко А.М., Белас О.М., Войтов В.А. та ін. Основи трібології: підручник. Харків, ХНТУСГ. 2008. 342 с.

33. Д.П. Журавель, О.Ю. Новік, А.М. Бондар Триботехніка: курс лекцій. Мелітополь, Видавничо-поліграфічний центр «Люкс». 2019. 280 с. http://elar.tsatu.edu.ua › bitstream › Триботехніка..

34. Дворук В.І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем. Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.02.04; Нац. авіац. ун-т. Київ. 2007. 40 с.

35. Takadoum J. Wear–corrosion behaviour of some metals. *JOM: J. Miner., Metals and Mater. Soc.* 2000. 52, №11. C. 131.

36. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kovaleva I. N. Latest developments in tribology in the journal Friction and Wear. *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36, Issue 6. P. 449–453. doi: https://doi.org/10.3103/s106836661506015x

37. I V Kragelsky, M N Dobychin Friction and Wear: Calculation Methods. *Elsevier*. 2013. 474 p. https://books.google.com.ua/books/about/Friction_and_Wear.html?id=8EA0QgAACAAJ&redir_esc=y

38. Мікосянчик О.О. Шамрай В.Б. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика:* матеріали 21-ї Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 06–10 вересня 2021 р.). Київ, АТМ України, 2021. С. 53-55. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb3-21s.pdf

39. Денисенко М., Опальчук А. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. *Вісник ТНТУ.* 2011. Спецвипуск. Частина 2. С. 201-210. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1442/2/TNTUB_2011_Special1-Denysenko_M_Opalchyk_A-Wear_of_inckease_durability_and_element_tool__201.pdf

40. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. докт. техн. наук: спец. 05.02.04 - Тертя та зношування в машинах. Кіровоград, 2014. 438с.

41. Б.А. Ляшенко, Є.К. Солових, Л.А. Лопата, В.Є. Марчук Підвищення міцності та довговічності деталей машин агропромислового комплексу багатофункціональними покриттями. *Механіка деформівного твердого тіла:* доп. сесії Наукової ради з проблеми НАН України (15–16 жовт. 2008, Полтава). Полтава. С. 15-31.

42. Черновол М.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники. Киев, УМК ВО. 1989. 125 с.

43. Мікосянчик О.О. Шамрай В.Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями. *Проблеми тертя та зношування.* 2022, 4 (97). С. 44-49. https://doi.org/10.18372/0370-2197.4 (97).16958

44. Аулін В.В. Вплив зміцнюючих композиційних покриттів на зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин. *Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин:* Пр. І-ї міжнародної науково технічної конференції (DSRAM-I), (4-7 жовтня 2004 р., Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя м. Тернопіль), Тернопіль. 2004. С. 303 – 307.

45. Саінсус О.Д. Підвищення довговічності лап культиваторів композиційними покриттями перемінного складу: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.11 - Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Кіровоград. 2008. 18 с.

46. Каденко В.С. Удосконалення робочих органів культиваторів конструкторсько-технологічними методами. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортних комплексів.* Вісник ХНТУСГ. Харків. 2016. Вип. 5. С. 206-210. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalk_2016_5_33

47. Strebkov S., Slobodyuk A., Bondarev A., Sakhnov A. Strengthening of Cultivator Paws with Electrospark Doping. *Eng Rur Develop.* 2019. pp. 549-554. doi:10.22616/ERDev2019.18. N178

48. Козаченко О.В., Каденко В.С., Шкрегаль О.М., Блезнюк О.В. Дослідження процесу зношування леза лапи культиватора із періодичними ділянками локального

зміцнення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* Науковий журнал ХНТУСГ. Харків. 2016. Вип. 6. С.76-87. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tcalk_2016_6_11

49. Пугач А.М. Обгрунтування параметрів культиваторних лап, оснащених елементами локального зміцнення: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.11 - Машини і засоби механізації сільскогосподарського виробництва. Вінниця. 2010. 20 с.

50. Василенко М.А., Буслаев Д.О., Калинин А.Е. Модифицирование наноструктуры созданного поверхностного слоя культиваторных лап для эксплуатации в почвах разных типов. *Механізація та електрифікація сельского господарства*. Міжвід. темат. наук. зб. Глеваха, 2015. Вип.1. С. 196-204.

51. Солових Є.К., Аулін В.В., Бобрицький В.М. Аналіз характеру зношування лез ґрунтообробних деталей та підвищення їх ресурсу лазерними технологіями. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Кіровоград: КНТУ, 2005. Вип. 35. С. 153-157.

52. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. Динаміка зношування криволінійного леза оснащеного локальним зміцненням. *Вісник Харків. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка.* 2015. Вип. 159: Техніч. сервіс машин для рослинництва. С. 159-163. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2015_159_26

53. Козаченко О.В., Блезнюк О.В. Дослідження по зміцненню леза дискових копачів корнезбиральної машини КС-6Б. *З. наук. Пр. Вінницького держ. аграр. ун-ту.* 2005. Вип. 21. С. 185 – 189

54. Борак К.В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових знарядь методом електроерозійної обробки: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах». Житомир. 2012. 19 с.

55. Денисенко М.І. Підвищення довговічності швидкозношуваних деталей робочих органів машин шляхом нанесення дискретного покриття на їх поверхні тертя. *Науковий вісник Національний університет біоресурсів і*

природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ. 2014. Вип.196, ч.1. С.245-259. ISSN 2663-1334 e-ISSN 2663-1342 https://technicalscience.com.ua/uk/journals/196-3-2014

56. М.И. Черновол, Т.В. Ворона, А.В. Башта, Л.А. Лопата Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин и аппаратов перерабатывающей и пищевой промышленности *Инженерия поверхности и реновация изделий:* материалы 15–й международной. научно–технической конференции (1-5 июня 2015, Затока Одесской области). Киев. 2015. С. 202-205. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb2-15s.pdf

57. Василенко М. Перспективи застосування локального зміцнення при виготовленні і відновленні робочих органів. *Техніка АПК.* Київ. 2008. №1. С. 29-31.

58. П.И. Денисов, Д.Б. Зуев, В.Г. Логинов Совершенствование технологии производства ножей для кукурузоуборочных комбайнов. *Теоретические и прикл. пробл. развития наукоемк. малоотход. технол. обраб. мет. давлением:* тез. докл. Респ. науч.-техн. конф. (30 мая – 1 июня, 1991, Винниц. политех. институт). 1991. Винница, 40 с.

59. В.С. Ивашко, П.А. Дашкевич Обоснование размеров структурных составляющих при упрочнении ножей измельчающих аппаратов кормоуборочной техники. *Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте:* материалы 8-го Междунар. науч.-техн. семинара (26-28 февраля 2008, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев). Киев, ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. 2008. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-08s.pdf

60. Шамрай В.Б. Солових Є.К. Використання зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних властивостей деталей автомобільного транспорту *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика:* матеріали 21-ї Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 06–10 вересня 2021 р.). Київ, АТМ України, 2021. С. 89-91. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb3-21s.pdf

61. В.Б. Шамрай, В.І. Калініченко, Л.А. Лопата Розробка технології

відновлення та зміцнення кільцевої канавки алюмінієвого поршня ДВЗ дискретними покриттями. *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті:* Матеріали 23-го Міжнародного науково-технічного семінару (15–16 березня 2023 р., Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ). 2023. Київ, АТМ України. С. 123-125. ttps://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-23.pdf

62. Ковальчук Ю.О., Дідур В.В., Кравченко В.В. Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* Кіровоград, КНТУ. 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 74–80. https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/25_1/15.pdf

63. М.І. Денисенко., В.І. Рубльов Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* Кіровоград, КНТУ. 2011. Вип. 24, ч. 2. С. 28-35. https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/1653

64. О.В. Козаченко, О.М. Шкрегаль, В.С. Каденко. Забезпечення ефективності робочих органів культиваторів: монографія Харків, ПромАрт, 2021. 238 с. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/21300/1/zabezpechennya_efektyvnosti_robochykh_orhaniv_monhraf_2021.pdf

65. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Київ. 2007. 21 с.

66. Л.П. Середа, І.А. Бабин, В.Я. Ніколайчук, Т.В. Лопата Аналіз методів підвищення зносостійкості і довговічності робочих органів бурякозбиральної техніки. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного ун-ту. Серія: Техн. науки.* Вінниця, ВНАУ. 2010. Вип. 5. С. 28-37.

67. Аулін В.В., Тихий А.А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія. Кропивницький: 2017. 278 с.
https://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000644621

68. Черновол М.И., Златопольский Ф.И., Лопата Л.А. Современные материалы для восстановления и упрочнения деталей машин: Учебное пособие. Кировоград. 1994. 83 с.

69. Embury David, Bouaziz Olivier. Композиционные материалы на основе стали. Движущие силы и классификация. Steel-based composites: driving forces and classifications. *Annual Review of Materials Research.* Vol. 40. 2010. Palo Alto (Calif.). 2010, С. 213-241.

70. П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник Луцьк, Видавець: ФОП Теліцин О.В. 2017. 368 с. ISBN 978-617-7070-88-6
https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021.pdf
https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0057616.pdf

71. О.В. Сушко, Е.К. Посвятенко, С.В. Кюрчев, С.І. Лодяков Прикладне матеріалознавство: підручник Мелітополь, ТОВ “ Forward press ”. 2019. 352с.
http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/7209

72. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство. Підручник. Київ, Видавництво Ліра-К, 2013. 612 с.
ISBN 978-966-2393-67-5 ISBN 978-966-2609-28-8http://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/aftandilmater.pdf

73. Дяченко С.С., Дощечкіна І.В., Мовлян А.О., Плешаков Е.І. Матеріалознавство. Підручник. Харків, ХНАДУ. 2007. 440 с.
http://jnas.nbuv.gov.ua/uk/article/UJRN-0000411333

74. Способ изготовления износостойкого слоистого композита с содержащими твердосплавные частицы материалами слоев на базе железа. Verfahren zur Herstellung verschleibestandiger Schichtverbunde mit hartstoffhaltigen

Schichtwerkstoffen auf Fe-Basis. Заявка 102005059429 Германия, МПК B 22 F 7/04 (2006.01). B 22 F 7/00 (2006.01). Theisen Werner. Wever Sebastian. № 102005059429.8. Заявл. 13.12.2005. Опубл. 21.06.2007.

75. Л.А. Лопата В.Я. Николайчук, В.Н. Барановский, С.Л. Чиграй Создание износостойких композиционных покрытий на основе порошков самофлюсующихся сплавов электроконтактным припеканием *Проблемы трибологии (Problems of Tribology),* №4(78) 2015, С. 92-98.
https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/493/811

76. П.Г. Лузан, Г.Н. Мдзинарашвили, Т.В. Ворона, И.А. Бабин Упрочнение поверхности рабочих органов почвообрабатывающих машин износостойкими покрытиями на основе самофлюсующихся Fe-Cr-Si сплавов. *Соврем. проблемы подготовки производства и ремонта в промышленности и на транспорте:* материалы 11-го межд. науч.-техн. семинара (26-28 февраля 2011 г., Свалява). Киев. С. 133-135. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-11s.pdf

77. Л.А. Лопата, І.Р. Качинская, А.Є. Солових Створення зносостійких композиційних покриттів на основі порошків самофлюсуючих сплавів електроконтактним припіканням *Проблеми тертя на зношування*. 2024. 3(104). С. 15-22. DOI: 10.18372/0370-2197.3(104).18974.

78. Богданович А.И. Кинетические и энергетико-активационные характеристики износостойкости и совместимости материалов трибосопряжений. Автореф. дис… к-та техн. наук по спец. 05.02.04. Киев, 1987. 23 с.

79. М.И. Черновол, Т.В. Ворона, С.Л. Чиграй, А.В. Лопата Изготовление деталей сельскохозяйственной техники с покрытиями из сталей ферритного и мартенситного классов повышенной износостойкости. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: материалы 16–й междун. научно – практическая конференция (20-23 сентября 2016, Одесса). Киев, АТМ. 2016. С. 198-201. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb3-16s.pdf

80. Покрытия и их использование в технике. В кн. «Прочность материалов и конструкций», под ред. В.Т. Трощенко – 2-е изд. Киев, Академпериодика. 2006. С. 981–1074.

81. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.Н. Інженерія поверхні. Київ, Наукова думка. 2007. 559 с. ISBN 978-966-00-0655-3

82. Пащенко В.М., Кузнєцов В.Д., Солодкий С.П. Проблеми ефективності захисних покриттів у інженерії поверхні машин і обладнання. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». 2006. №49, С. 178-187

83. Куликівський В.Л., Климчук Д.А., Жека Б.В., Фещук І.П. Основні способи нанесення зносостійких покриттів. *Сільськогосподарські, біологічні, економічні, загальноосвітні та технічні науки:* матеріали Всеукраїнської наукової конференції молодих учених і науково-педагогічних працівників (20 травня 2021 р. м. Умань). Умань, ВПЦ «Візаві». 2021. С. 196-200.
https://lib.udau.edu.ua › bitstreams › download

84. Ambroza P., Kavaliauskiene L. Износостойкие слои, полученные наплавкой порошковых материалов на конструкционную сталь. Wear resistant layers obtained by using materials powder for overlay welding structural steel. *Mechanika* (Lietuva). 2011, №2. С. 197-202.

85. И.А. Рябцев и др. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла, упрочненного карбидами различных типов. *Автоматическая сварка*. 2015. 5-6. С. 84-88.
https://patonpublishinghouse.com › rus › journals ›

86. Lopata O., Smirnov I., Vihilianska N., Lopata V., Kulyshskyi V. Use of steel gas thermal coatings to increase wear resistance of parts. *Scientific Journal of TNTU (Tern.).* 2022. Vol. 105. No.1. 108–117.
DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.

87. Brusilo Y.V., Cherepko A.E. Investigation of properties of coatings deposited by different arc spraying methods. Науковий журнал «Наукоємні технології №4(20) 2013. С. 366-371.

http://www.icit.nau.edu.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=282:-2013-420&catid=10:science-based-technologies

88. Ageev M., Lopata L., Smirnova T., Dudan A., A. Lopata Of combined electric arc coatings. *Problems of Tribology*. 2019, *Vol.* 24. No. 3/93. 51-56. DOI: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-56.

89. Н.В. Вигилянская, Ю.С. Борисов, И.А. Демьянов Газотермическое напыление псевдосплавных покрытий. *Автомат. сварка*. 2012, №1, С. 48-55. https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2012/01

90. Петров С.В. Газопламенное сверхзвуковое напыление. *Сварщик*. 2005. №1. С. 14-15.

91. Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos Thermal Spray Fundamentals from Powder to Part p. 1566 Springer New York Heidelberg Dordrecht London Library of Congress Control Number: 2013956523 ISBN 978-0-387-28319-7 ISBN 978-0-387-68991-3 (eBook) DOI 10.1007/978-0-387-68991-3. https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-023-01587-1/

92. Espallargas, N. Future Development of Thermal Spray Coatings.2015, Elsevier Ltd. 286 p. ISBN: 9780857097699 eBook ISBN: 978085707745 https://www.asminternational.org/edfas/uncategorized//journal_content/56/10192/2618894 1/PUBLICATION//.

93. Gildersleeve, E.J., Vaßen, R. Thermally Sprayed Functional Coatings and Multilayers: A Selection of Historical Applications and Potential Pathways for Future Innovation. *J Therm Spray Tech.* **32**, 778–817 (2023). https://doi.org/10.1007/s11666-023-01587-1.

94. Liu N., Liu Q., Li Z., Bai Y., Sun Y.W., Li Z.D., Bao M.Y., Zhan H., Guo D.G., Ma Y.S. Tribological behavior of plasma-sprayed metal based solid self-lubricating coatings under heavy load. *Wear*. 2021. vol.486-487, art. No. 204108. doi: 10.1016/j.wear.2021.204108

95. V. Hutsaylyuk, M. Student, Kh. Zadorozhna et al. Improvement of wear

resistance of aluminum alloy by HVOF method. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, Is. 6. P. 16367-16377 DOI:10.1016/j.jmrt.2020.11.102

96. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. Дніпро, НМетАУ, 2021. 89 с. https://nmetau.edu.ua/file/sposobi_zmitsnennya_metaliv.pdf

97. Варваров В.В. Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.04 - Тертя та зношування в машинах. Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2021. 192с. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/3463/1/autoref_varvarov_v_v.pdf

98. А.В. Демченко, С.І. Маркович, А.В. Рутковський Оцінка впливу мікродугового оксидування на ресурс циліндропоршневої групи ДВЗ. *Іноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ЦНТУ, Кропивницький, 22-24 листопада 2024 р.). Кропивницький , ЦНТУ, 2024, С. 36-39. https://erm.kntu.kr.ua/naukova-diialnist/konferentsii

99. Рутковський А.В., Лопата Л.А., Радько О.В. Вплив підвищення зносостійкості іонно-азотованих шарів на довговічність елементів трибосистем. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем:* матеріали доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (23–24 травня 2024, м. Чернігів). Чернігів. 2024. Т. 2. С. 108-109. https://conference-chernihiv-polytechnik.com/sektsiya-5-zvaryuvannya-ta-sporidneni-protsesi-i-tehnologiyi-materialoznavstvo/

100. І.В. Смірнов, О.В. Лопата, Рудковський А.В., Особливості зміцнення поверхневих шарів деталей транспортних засобів іонним азотуванням. *Інженерія поверхні, комплексний підхід:* матеріали VI Всеукраїнської наук. - техн. конф. студентів, аспірантів та наукових співробітників (11 грудня 2018, КПІ, ЗФ, Київ).

Київ. 2018. С. 18-22. chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ip.kpi.ua/sites/default/files/2017-04/Zbirnuk2018_2.pdf

101. Рутковский А.В., Маркович С.І. Методика планування експерименту та побудови математичної моделі процесу зміцнення поршнів автотракторних двигунів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Кропивницький. 2018. Вип. 48. С. 45-53. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmntz_2018_48_7.

102. Анатолій Рутковский, Сергій Маркович, Сергій Михайлюта. Автоматизація технологічного процесу вакуумного азотування поршнів в пульсуючому пучку плазми *Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві:* матеріали міжнародної науково-технічної конференції (10-11 листопада 2022 р., Кропивницький). Кропивницький. 2022. С. 163 -166. https://kntu.kr.ua/file/content/8118/10-tez.pdf

103. Рутковський А.В., Маркович С.І. Фрактографічний аналіз іонноазотованих зразків з алюмінієвих поршнів двигунів сільськогосподарської техніки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кропивницький. 2021. Вип. 51. С. 174-182. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.126-132

104. Калініченко В.І., Рутковський А. В., Маркович С.І. Дослідження мікроструктури поверхневого шару зразків з титанового сплаву, що модифіковані вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: матеріали* V Міжнародної науково-практичної конференції (19-21 квітня 2023 р., ЦНТУ, Кропивницький). Кропивницький, ЦНТУ. 2023. С. 96-101. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/materiali_konf._pnemps-2023.pdf

105. А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.О. Магопець, В.С. Маркович, Зносостійкість титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу. *Центральноукраїнський науковий вісник.* Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч. II С. 41- 47.
DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.41-47

106. Рутковський А.В., Буйских К.П., Маркович С.І. Зносостійкість зміцненого титанового сплаву в умовах тертя ковзання *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем:* матеріали VII ї Міжнародної науково-практичної конференції (19-21 квітня 2024 р., ЦНТУ, Кропивницький). ЦНТУ, Кропивницький. 2024. 170 с.
https://erm.kntu.kr.ua/naukova-diialnist/konferentsii

107. З.А. Дурягина, Н.В. Щербовських, С.А. Беспалов Влияние лазерного легирования порошковыми смесями на структуру и микромеханические свойства стали 12Х18Н10Т. *Металлофиз. и нов. технол.* 2011. т. 33, № 7. С. 969-975. https://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v33/i07.html

108. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko I.V., Gaponova O.P., Sarzhanov O.A., Antoszewski B. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 2020. 58(11–12), С. 703–713. DOI: https://doi.org/10.1007/s11106-020-00127-8

109. В.І. Савуляк, В.Й. Шенфельд, М.С. Дмитрієв Модифікування робочих поверхонь сталевих деталей з формуванням високовуглецевих структур. *Вісник машинобудування та транспорту* 2019. №1(9). С. 115-122.
DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2019-9-1-115-122

110. В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський Основи технологій обробки поверхонь деталей машин: підручник. Житомир, Видавець О.О. Євенок. 2017. 266 с. http://www.kgemt.org.ua › pdf › library fund

111. Новаковський С. Ю., Калганков Є. В. Електроіскрова обробка поверхонь тертя як засіб підвищення ресурсу деталей машин *Інтеграція світових наукових процесів як основа суспільного прогресу:* матер. II міжнар. наук. – практ. конф. (23–

24 лист. 2018 р., ГО «Інститут інноваційної освіти», Науково-учбовий центр прикладної інформатики НАН України, Київ). Київ, ГО «Інститут інноваційної освіти». 2019. С. 204–208.
https://novaosvita.com/wp-content/uploads/2019/03/ModScResParadigm-Kyiv-Jan2019.pdf

112. Хорольський М.О., Васильєв Л.Д. Електроіскрове відновлення та зміцнення деталей як спосіб економії ресурсів. *Актуальні проблеми розвитку науки в контексті глобальних трансформацій інформаційного суспільства:* матер. IV Міжнар. наук. – практ. конф. Київ, ГО «Інститут інноваційної освіти», Науково-навчальний центр прикладної інформатики НАН України. 2021. С. 90–94.
https://novaosvita.com/wp-content/uploads/2019/03/ModScResParadigm-Kyiv-Jan2021.pdf

113. В.Б. Тарельник, О.П. Гапонова Підвищення експлуатаційних характеристик і екологічної безпеки деталей машин та інструменту електроісковим легуванням *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2019. № 1 (55). С. 2–7. https://nfv.ukrintei.ua/view/5b1925e27847426a2d0ab414

114. Ярошенко О.В. Методи підвищення зносостійкості матеріалів методом електроіскрового легування. *Матеріалознавчі аспекти високотехнологічних виробництв.* 2017. №4. С. 53–60.

115. Є.К. Солових, О.О. Мікосянчик, А.В. Рутковський та інш. Електроіскрові антифрикційні покриття на алюмінієвих сплавах для двигунобудування. Кропивницький, Центральний національний технічний університет. 2024. 156 с. ISBN 978-617-8268-27-5.

116. А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский и др., Электроискровое легирование металлических поверхностей. Под ред. Петрова Ю.Н. Кишинев, Штиинца. 1985. 198 с.

117. А.Д. Верхотуров, И.М. Муха Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев, Техника. 1982. 184 с.

118. Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун, В.С. Сычев.

Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев, Наукова думка, 1976. 220 с.

119. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. Assessment of Hydroabrasive Wear Resistance of Construction Materials with Functional Coatings, which are Formed by Resource-Saving and Environmentally Friendly Technologies. *Key Engineering Materials*. 2020. vol 864, p. 265–277. https://doi.org/10.4028/www.scientifc.net/ kem.864.265

120. Пат. 136895 UA на корисну модель Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Коноплянченко Є.В., Тарельник Н.В., Саржанов О.А., Саржанов Б.О. Заявл. 02.04.2019. Опубл. 10.09.2019. Бюл. № 17, 2019.

121. Тарельник В.Б., Саржанов Б.О., Гапон О.О. Новий спосіб відновлення і зміцнення деталей з листової сталі, що піддаються в процесі експлуатації абразивному зносу. *Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2019. Вип. 1–2 (35–36). С. 18–24. https://repo.snau.edu.ua/xmlui/handle/123456789/8570

122. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко, Н. Р. Голуб, І. О. Мельник Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроіскрового легування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2019. Вип. 205. С. 320-329.
DOI: 10.31471/1993-9965-2022-1(52)-15-23

123. Соловьёв Е.К., Ляшенко Б.А., Посвятенко Э.К. Износостойкость алюминиевого сплава с дискретным электроискровым покрытием. *Проблеми тертя та зношування*. 2006. Вип. 46. С. 106-118.

124. В.Є. Марчук, Б.А. Ляшенко, М.В. Кіндрачук, О.І. Духота Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями. *Проблеми тертя та зношування.* 2013. № 2. С. 80-87. https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PTZ/issue/view/318

125. Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия

дискретной структуры. *Технологические системы*. 2001. №4(10). С. 17-25.

126. О.В. Ткаченко, В.Г. Федоров Електроіскрове легування: нові методи та підходи. *Прикладна механіка*. 2020. №5. С. 74–80.

127. Дмуховський, Д.М. Створення зносостійких покриттів на сталі Ст3кп методом електроіскрового легування Co, Nb, Ti: магістерська дис.: 132 Матеріалознавство. Київ. 2019. 86 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31006

128. V.B. Tarelnyk, O.P. Gaponova, G.V. Kirik et al. Cementation of steel details by electrospark alloying. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2020. Vol. 42 (5). P. 655–667. DOI: https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0655.

129. Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова, О.В. Вознюк Формування зносостійких зміцнених покриттів на поверхні сталі Ст.3 послідовним електроіскровим легуванням хромом та міддю в інертному середовищі та на повітрі. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. №2. С. 72–77 https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PTZ/issue/view/660 http://www.irbis-nbuv.gov.ua › ...

130. Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова, Н.А. Шаповалова, К.Є. Ігнасюк Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. №2(71). С. 62–66. https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PTZ/issue/view/572

131. Пат. 150385 України на корисну модель. Спосіб нітроцементації поверхонь сталевих деталей методом електроіскрового легування (ЕІЛ). Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Коноплянченко Є.В., Саржанов О.А., Тарельник Н. В., Мікуліна М. О., Лазаренко А. Д., Поливаний А.Д. Заявл. 30.08.2021. Опубл. 10.02.2022. Бюл. №6. http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/9082

132. Wang, J.; Zhang, M.; Dai, S.; Zhu, L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings* 2023, *13*, 1473. https://doi.org/10.3390/coatings13081473

133. І.І. Савчук, В.Г. Мельник Застосування електроіскрового легування для зміцнення поверхонь титанових сплавів. *Машинознавство.* 2019. №8. С. 49–55. https://ela.kpi.ua › bitstreams › download

134. О.В. Сидоренко, В.М. Пономарьов, М.М. Корнієнко Використання електроіскрового легування Ni та Al для створення функціональних покриттів на титанових сплавах. *Матеріали та технології машинобудування*. 2015. №3. С. 85–90.

135. Z. Zhengchuan, I. Konoplianchenko, V. Tarelnyk, [et al.] Iindustry application of the coatings on the bearing bush by electro spark alloying technology *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.* 2022. №1(52). P. 15-23.
DOI: 10.31471/1993-9965-2022-1(52)-15-23
http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/9082

136. Z. Zhengchuan, L. Guanjun, I. Konoplianchenko, [et al.]. A review of the electro-spark deposition technology. *Вісник Сумського національного аграрного університету.* 2021. Вип. 2(44). С. 45-53.
https://snaubulletin.com.ua › article › download

137. C. Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, G. Renna Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings.* 2022. 12 (10). P. 1536. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings12101536

138. Э. К. Посвятенко, Е. К. Соловых, Б. А. Ляшенко и др. Тенденции повышения износостойкости поршней ДВС. *Вісник Національного транспортного університету.* 2006. Ч.1, Вип. 13. С.13-21.

139. М.С. Стороженко, О.П. Уманський, В.Є. Шелудько, Ю.В. Губін Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів *Автоматичне зварювання*. 2020. №10. С. 21-25. DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.10.04

140. О.О. Мікосянчик, Шамрай В.Б. Г.Г. Голембієвський, Є.С. Горб О.О. Композиційні матеріали для зносостійких покриттів деталей сільськогосподарських

машин. Проблеми тертя та зношування. 2023, 1(98). С. 4-13. https://doi.org/10.18372/0370-2197.1 (98).17356

141. Kyrychok P. O., Roik T. A., Havrysh A. P., Shevchuk A. V. Novitni kompozytsiini materialy detalei tertia polihrafichnykh mashyn. *Vitsiuk Yu. NTUU KPI.* Kyiv. 2015. 428 p.

142. Paustovskii A.V., Tkachenko Yu.G., Khristov V.G., et al. Materials for the Electrospark Strengthening and Reconditioning of Worn Metal Surfaces. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2016. **1**, 14–22. https://doi.org/10.3103/S1068375516010117 https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375516010117

143. E.A. Levashov, P.V. Vakaev, E.I. Zamulaeva, et al. Nanoparticle dispersion-strengthened coatings and electrode materials for electrospark deposition. *Thin Solid Films.* 2006. Vol. 515, Issue 3, 23. P. 1161-1165. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.140 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040609006009606

144. Levashov, E. A., Kudryashov, A. E., Zamulaeva, E I., et al. Nanostructured Materials for Electrospark Deposition and Disperse Strengthening by Nanoparticles Diamond Tools. *Journal of Physics*: Conference Series; Bristol 2013. Vol. 416. Iss. 1. DOI:10.1088/1742-6596/416/1/012004.

145. Кириленко С.М., Паустовський О.В. Електродні матеріали на основі заліза для електроіскрового відновлення деталей. *Порошкова металургія.* 2009. №5/6. С. 69–73.

146. Тарельнік В.Б., Паустовський А.В., Ткаченко Ю.Г. Електродні матеріали, композиційні і багатошарові електроіскрові покриття зі сплавів систем Ni–Cr, WC–Co і металів. *Порошкова металургія. 2016.* **9/10**, 100–115. http://www.materials.kiev.ua/issue/138/article/2249 http://www.materials.kiev.ua/article/2249

147. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D., Syui, N.A. Generation and study of new electrode materials with self-fluxing additives to improve the efficiency of mechanical

electrospark alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2015. 51. P. 38–45. DOI: 10.3103/S1068375515010111

148. N. Radek, A. Sladek Properties of electro-spark coatings deposited on the steel substrate using the tungsten carbide-ceramic electrodes. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 22, No. 2–I, 1354–1362 (2016). https://www.researchgate.net/publication/308453286_Properties_of_electro-spark_coatings_deposited_on_the_steel_substrate_using_the_tungsten_carbide-ceramic_electrodes

149. Пат. 79775 України. Керамічний електродний матеріал на основі нітриду алюмінію для електроіскрового легування алюмінію та його сплавів. А.Д. Панасюк, І.О. Подчерняєва, О.М. Григорьєв та ін. Бюл. №11. 2007. 4с.

150. Chang-bin, T., Dao-xin, L., Zhan, W., Yang, G. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications. *Applied Surface Science*. 2011. Volume 257, Issue 15, P. 6364-6371. DOI:10.1016/j.apsusc.2011.01.120

151. Ткаченко Ю.Г., Юрченко Д.З., Тимофєєва І.І. Вплив складу електродів зі сплавів системи TiC–(FeCr–Al–Si) на формування, фазовий склад і властивості зносо- і жаростойких електроіскрових покриттів на сталі *Порошкова металургія.* 2018. **7/8**, 119–129. http://www.materials.kiev.ua/issue/159/article/2635 http://www.materials.kiev.ua/article/2635

152. Л.Ф. Руденко, Т.П. Говорун Леговані сталі та сплави: навч. посіб. Суми, Сумський державний університет. 2012. 171 с. https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstreamdownload/123456789/29513/3/Rudenko_legovani%20stali.pdf

153. Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Дніпропетровськ, НМетАУ. 2008. 348 с.

154. Приминение стали марки 40Х13. http://www.promgroupchel.ru/

155. Справочник химика. Стали марки 40Х13. http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stn/40X13/

156. Марочник стали и сплавов. http://www.splav-kharkov.com/main.php

157. В.А. Мерзляков, С.В. Новиков База данных физико-механических свойств материалов и ее использование в пакетах прикладных программ. *Пробл. прочн.* 1997. №4. С. 90-94.

158. Дурягіна З.А. Фізика та хімія поверхні. Монографія. Львів, Видавництво «Львівська політехніка». 2009. 208 с.
Код: 978-966-553-826-**4.** https://vlp.com.ua/node/3087

159. Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк, О.В. Мельник, В.Г. Нікітін Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів: підручник. Київ, НТУ. 2019. 184 с. URI**:** http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/20844.pdf

160. В.В. Холявко, І.А. Владимирський, О.О. Жабинська Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство. Київ, Центр учбової літератури. 2016. 156 с.
ISBN 978-617-673-517-5 https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0e2218e8-7e13-4a89-84a8-d2d438d1dffb/content

161. А.І. Дегула, Т.П. Говорун Методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи з теми "Визначення твердості матеріалів" із дисципліни "Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів" для студ. спец. 132 "Матеріалознавство". Суми, СумДУ. 2022. 23 с.

162. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Закиев В.И. Определение микромеханических характеристик поверхности материалов с использованием наноиндентометра. *Вестник ХНАДУ.* 2008. №42. https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-mikromehanicheskih-harakteristik-poverhnosti-materialov-s-ispolzovaniem-nanoindentometra-mikron-gamma.

163. В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко та ін. Методи та засоби мікроскопії: монограф. Київ, НТУУ "КПІ", 2013. 336 с. https://www.twirpx.com/file/2450836/

164. Навчально-наукова лабораторія електронної та оптичної мікроскопії. Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
https://imz.kpi.ua/uk/8-laboratoriya-optichnoji-mikroskopiji.html

165. Т.І. Бутенко, С.О. Колінько, Ващенко В.А. Конспект лекцій з дисципліни «Контроль структури, елементного та фазового складу матеріалів» для здобувачів освітнього ступеня бакалавр за спеціальностями галузі знань 13 “Механічна інженерія”. Черкаси, ЧДТУ. 2021. 75 с.
https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/2942/1/ Контроль структури.pdf.

166. А.Я. Красовский, В.А. Степаненко Применение растровой электронной микроскопии для количественной стереофрактографии усталостных изломов. *Проблемы прочности,* 1977. №6. С. 35-38.

167. А.Я. Красовский Применение стереоскопической фрактографии. *Проблемы прочности.* 1978. №II. С. 101-108.

168. И.В. Крамаренко К анализу стереоизображений поверхности разрушения при стереофрактографических исследованиях. *Проблемы прочности.* 1985. №3. С. 84-87.

169. В.А. Степаненко Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов. *Проблемы прочности*. 1979. 12. С.89-91.

170. S. Seal, T. Warwick, N. Sobczak et al. Растрово-фотоэмиссионный микроскоп (SPEM) для исследования границы раздела в системе AlTi/C. *J. Mater Sci Let*. 2000. 19, №2. С. 123-126.

171. S. Wilhelm Time-and Coat-Saving Method for the Preparation of Stereoacopic Pairs of SEM Micrographe *Practical Metallography*. 1980. №17. P. 554-559.

172. J. Chermant, M. Coster Обзор по количественной фрактография. Review quantitative fractography. *“J. Mater. Sci.”* 1979. 14. №3. С. 509-534.

173. D. Broek Some contributions of electron fractography to the theory of fracture. *Inter. Met. Rev.* 1974. №19. P. 135-182.

174. A. Boyde, H.F. Ross Photograjnmetric Record. *Journal of Mikroacopy,* 1975. №8. 46 p.

175. Сахаров А.С., Альтенбах И. Метод конечных элементов в механике твердых тел. Киев, Вища шк. 1982. 480 с.

176. Рудаков К.М. Геометричне та скінчено-елементне моделювання конструкцій у MSC. visualNastran for Windows. Посібник. Киев, НТУУ "КПІ". 2005. 218 с.

177. В.В. Токарук, О.О. Мікосянчик, Р.Г. Мнацаканов Оцінка напружено-деформованого стану трибоконтакту за зміною усередненої потужності акустичної емісії. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. №3(96). С. 30-40. DOI: 10.18372/0370-2197.3(96).16833

178. Е.Б. Сорока Повышение самоорганизации в системе основа-покрытие на основе управления НДС. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика:* матер. 10-й межд. науч.-практ. конф. Киев: АТМ Украины, 2010. С. 124-126. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb3-10.pdf

179. В.В. Токарук, О.О. Мікосянчик, Р.Г. Мнацаканов та ін. Аналіз міцностних характеристик електроіскрових покриттів. *Проблеми тертя та зношування.* 2021. №3(92). С. 47-53. DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15936

180. Дмитриев Ю.В. Методологический подход к исследованию механических характеристик материалов с покрытиями: дис. канд. техн. наук: 05.02.09. Київ. 1990. С. 61-92.

181. Б.А. Ляшенко, С.Ю. Шаривкер, О.В. Цыгулев и др. Методика определения механических характеристик композиции металл-защитное покрытие. *Проблемы прочности*.1989. №8. С. 113-115.

182. Г.С. Писаренко Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 515 с.

183. А.И. Райченко, К.Э. Гринкевич, З.П. Шуригина Триботехническая оценка износостойких покрытий. *«Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях»:* материалы V-й Промышленной конференции (21 – 25 февраля 2005 г., Славское). Киев, УИЦ, «Наука. Техника. Технология», 2005. С. 286 - 288.

184. В.В. Запорожець, В.М. Стадниченко, В.В. Токарук Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями. *Проблеми трибології*. 2010. №4. С. 25-31. http://lib.khnu.km.ua/pdf/TRIBOL/2010/4/zmist.html

185. Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик, О.Є. Якобчук, В.В. Токарук Прогнозування лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 4 (81). С. 4-12. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz_2018_4_3

186. Ваги лабораторні «AXISAD50-5-00034» https://vagi-axis.ua/uk/product/vesy-laboratornyead50-ahis/

187. А.И. Духота, В.Ф. Лабунец, В.В. Жигинас и др. Абразивная стойкость электроискровых и комбинированных лазерно- электроискровых покрытий на легких сплавах. *Проблеми тертя та зношування*. 2007. Вип. 48. С. 185-195.

188. О.В. Нікулін Конспект лекцій з дисципліни “Триботехніка та основи надійності машин” для спеціальності 131 “Прикладна механіка” Кам′янське, ДДТУ. 2017 р. 84 с. https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/5/1-5-kl21.pdf

189. М.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик Триботехніка та основи надійності машин. Навч. посібник Київ, Інформавтор. 2006. 216 с. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Dmitrichenko_2006_216.pdf

190. Ю.А. Толбатов, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і программах. Київ, Вища школа. 1994. 399 с.

191. Ляшенко Б.А., Антонюк В.С., Сорока О.Б. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Пулюя.* Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя. 2005. Том 10. № 1. С. 54-59. https://library.tntu.edu.ua/visnyk/2005-2/1-2/

192. Антонюк В.С, Сорока О.Б. Забезпечення міцності поверхонь із зносостійкими покриттями. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*: Зб. наук. праць ЖДТУ. 2007. Вип. 5. Ч.1. С. 197–206. http://pmo.ztu.edu.ua/issue/archive

193. Н.А. Долгова Определение напряжений в двухслойном покрытии. *Проблемы прочности*. 2005, №4. С.121-1323.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=JRN&P21DBN=JRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=njuu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21COLORTERMS=0&S21P03=I=&S21STR=%D0%9661773/2005

194. Ляшенко Б.А., Антонюк В.С, Сорока О.Б., Лопата Л.А. Оптимизация дискретных структур электроискровых покрытий. *Артилерийское и стрелковое вооружение*: Международный научно-технический сборник. Киев. 2004. Вип. 4(13). С. 30 – 34.

195. В.Б. Шамрай Оцінка напруженно-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 1 (106). С..

196. Антонюк В.С., Сорока О.Б, Солових Є.К. Калініченко В.І. Аналітичні та чисельні методи проектування покриттів дискретної структури на інструментальних матеріалах. *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур* . Львів. 2006. Т. 1. С. 121 - 122.
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D1%96%D1%82%20%D0%93$

197. Антонюк В.С., Калініченко В.І., Аналіз робочої поверхні різального інструменту методом скінчених елементів. *Новые процессы и их модели в ресурсо- и энергосберегающих технологиях*: материалы Международной научно-технической конференции (25-26 сентября 2003 г., г. Одесса). Киев, АТМ Украины. 2003. С. 3-6.

198. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Панівко В.В. Розрахунковий метод визначення параметрів зносостійкого покриття. *Вісник СумДУ.* 2005. №11(83) С.13 – 18. https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/195?null&offset=180

199. Diekhana Norbert Elnsatz moderner Rechenmethoden mit Finiten Elementen (FEM) bel der Knstruktion von Landmaschinen, dargestellt am Belspiel der Schneider Werksentwicklung (Внедрение современного расчетного метода конечных элементов (МКЭ) при конструировании сельскохозяйственных машин на примере режущего рабочего органа). *Grundlagen Landtechn*, 1986. 34, №1, 9-17.

200. В.Б. Шамрай, В.І. Калініченко Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки покриттями дискретної структури. Технологічне забезпечення покриттів дискретної структури електроіскровим легуванням. *Проблеми тертя та зношування*. 2024, 2 (103), С. 146-155. https://doi.org/10.18372/0370-2197.2 (103).18697

201. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мірненко В.І., Рутковский А.В. Определение оптимальной структуры диференциальных покрытий. *Инженерия поверхности:* Материалы 4-й международной научно-технической конференции (25 – 27 мая 2004 г., г. Ялта). Киев, АТМ Украины. 2004. С. 20 – 24. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb2-04.pdf

202. Шамрай В.Б. О.О. Мікосянчик, В.І. Калініченко Підвищення ефективності дроблення зерна шляхом використання ріжучих елементів робочих органів із зносостійкими покриттями дискретної структури
*Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: м*атеріали IV–ії Міжнародної науково-практичної конференції (13-15 квітня 2022 р., ЦНТУ, м. Кропивницький). Кропивницький, ЦНТУ. 2022. С. 59-64.
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/programa_konf._pnmo-2022_1.pdf

203. П.М. Присяжнюк, Я.А. Криль Розроблення електроіскрових покриттів на основі карбідосталей NbC-сталь Гадфільда. *Науковий вісник Івано-Франківського*

національного технічного університету нафти і газу. 2013. № 2. С. 155-164. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2013_2_18

204. Уманський О.П., Стороженко М.С., Тарельник В.Б. та ін. Особливості формування електроіскрових покриттів системи NiFeCrBSiC–MeB_2 на сталі. *Порошкова металургія*, 2020. 1/2. 86–95. http://www.materials.kiev.ua/science2.0/publications/issue.jsp?id=178

205. V.V. Mikhailov, A.E. Gitlevich, A.D. Verkhoturov at all. Electrospark alloying of titanium and its alloys: The physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013. Vol. 49(5). 373-395. DOI:10.3103/S1068375513050074

206. Umanskyi, O., Storozhenko, M., Tarelnyk, V. et al. Electrospark Deposition of Fenicrbsic–Meb2 Coatings on Steel. *Powder Metall Met Ceram 59*, 57–67 (2020). https://doi.org/10.1007/s11106-020-00138-5

207. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Tarelnyk N. V., Myslyvchenko O. M. Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying. *Progress in Physics of Metals*. 2023. 24. No. 2. pp. 282–318. https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282

208. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Myslyvchenko O.M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2019. Vol. 41. No.10. P. 1377–1394.
https://doi.org/10.15407/mfint. 41.10.1377.

209. Martsynkovskyy V., Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Antoszewski B., Kundera C., Dyadyura K., Tarelnyk N., Sarzhanov B., Mikulina M., et al. New Process for Forming Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying Method. *Springer Proc Phys*. 2020. Vol.240, PP. 135-149. doi:10.1007/978-981-15-1742-6_13

210. Y. Mashkov, D. Korotaev The effect of electric –spark treatment on the structure and properties of modified friction surfaces. *Friction and wear*. 2016. V.37. № 1. 83-88. DOI:10.3103/S1068366616010116
esearchgate.net/publication/299499548_The_effect_of_electric-spark_treatment_on_the_structure_and_properties_of_modified_friction_surfaces2

211. Гапонова О.П., Охріменко В.О., Тарельник Н.В. Аналіз впливу параметрів електроіскрового легування на структурний стан алітованих поверхонь. *Вісник ХНАДУ*. 2023. Вип. 103. С. 66-71.
URL: https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6.
http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/294391

212. S.V. Nikolenko, A.D. Verkhoturov, N.A. Syui et al. Influence of Electrospark Discharge Parameters on Roughness and Microabrasive Wear of Steel 45 Surface after ESA by TiC-Based Electrodes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Issue 4/2016 P. 342-349 https://www.springerprofessional.de/en/influence-of-electrospark-discharge-parameters-on-roughness-and-/10653514

213. V.V. Tokaruk, O.O. Mikosianchyk, R.G. Mnatsakanov, N.O. Rohozhyna Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state. *Problems of Tribologyy*. 2020. №4 (98). С. 33-39. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-33-39
https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/775/1251

214. Lešnjak A., Tušek J. Processes and properties of deposits in electrospark deposition. Science and Technology of Welding and Joining 2002.Volume 7, Issue 6.pp. 391–396. https://doi.org/10.1179/136217102225006886

215. W. Depczynsky, N. Radek Properties of electrospark deposited Stellite coating on mild steel. The Centre for Laser Technologies of Metals Faculty of Mechatronics and Machine Design, Kielce University of Technology. Kielce, Poland, EU. 1000-lecia pp. 7. 25-314 (2013).
https://www.academia.edu/81373673/Properties_of_elektro_sparc_deposited_stellite_coating_on_mild_steel

216. В.В. Токарук, О.О. Мікосянчик, Р.Г. Мнацаканов, О.Ю. Жосан, Д.В. Долот Аналіз міцностних характеристик електроіскрових покриттів. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 3 (92). С. 47-53. DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15936

217. Haponova O.P., Tarelnyk V.B., Tarelnyk N.V., Myslyvchenko M., Nano structuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method. *The Journal of the Minerals.* 2023. pp.1-13. DOI:10.1007/s11837-023-05940-1

218. Holubets V.M., Pashechko M.I., Borc J., Tisov O.V., Shpuliar Y.S. Wear Resistance of Electrospark-Deposited Coatings in Dry Sliding Friction Conditions. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 2021. Vol. 60/ pp. 90-96. doi:10.1007/s11106-021-00218-0.

219. Al-Quraan T. M.A., Tokaruk V.V., Mikosianchyk O.A., Mnatsakanov R.G., Kichata N.M., Kuzin N.O. Influence of Continuity of Electric Spark Coatings on Wear Resistance of Aluminum Alloy. *Tribology in Industry.* 2021. Vol. 43, № 4. P. 603-614. DOI:10.24874/ti.1170.08.21.10

220. Патент на корисну модель № 62928 Україна. Пристрій для вимірювання величини лінійного зносу без зупинки машини: В.В. Запорожець, В.М. Стадниченко, В.В. Токарук Бюл. №18. 2011. 3 с.

221. Кирик Г. В. та ін. Аналіз якості алітованних поверхневих шарів, отриманих методами електроіскрового легування *Порошкова металургія.* 2017. № 12. С. 97–107. URL: https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6.

222. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P., Myslyvchenko O.M., Tarelnyk N.V. Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials* 2021, 14, 6332. https://doi.org/10.3390/ma14216332

223. Б.А. Ляшенко, Е.К. Соловых, В.И. Мирненко, А.В. Рутковский, М.И. Черновол Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости. Под ред. В.В. Харченко. Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. 2010. 193 с.

https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe92.239.

224. Д.Д. Марченко Ремонт машино-тракторного парку: методичні рекомендації. Миколаїв, МНАУ. 2021. 95с. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10081/1/remont-mashino-traktornogo-parku-prakt.pdf

ДОДАТКИ

Додаток А. Дослідження напружено-деформованого стану композиції «зміцнюєма поверхня-покриття» від дії нормального навантаження на ділянках електроіскрового покриття в залежності від товщини покриття

Додаток Б. Фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалів покриття та зміцнюємих поверхонь

Додаток. В. Характеристика подрібнюючого апарату комбайна КСК

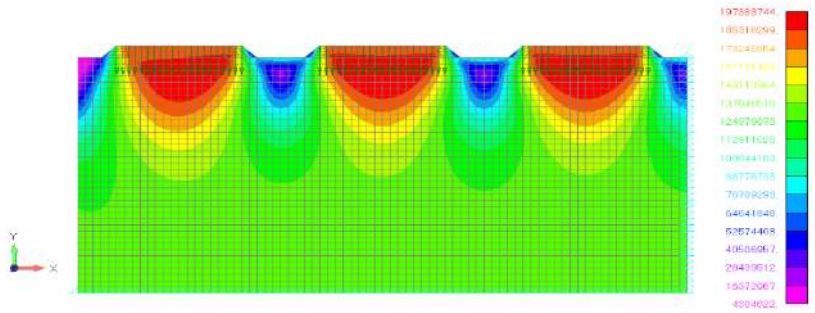
Додаток Г. Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень

Додаток Д. Список публікацій здобувача за темою дисертації

ДОДАТОК А

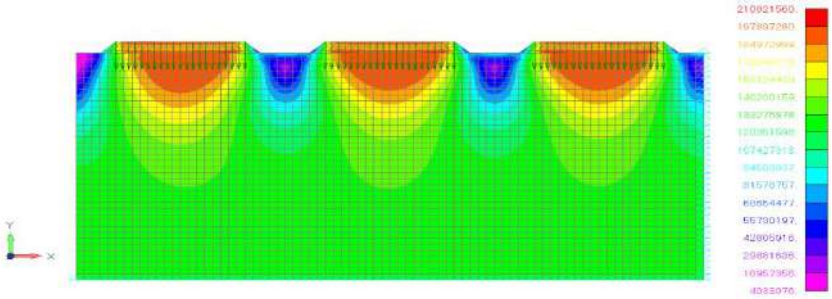
Дослідження напружено-деформованого стану композиції «зміцнюєма поверхня-покриття» від дії нормального навантаження на ділянках електроіскрового покриття в залежності від товщини покриття

100мкм $\sigma_{екв}$, Па



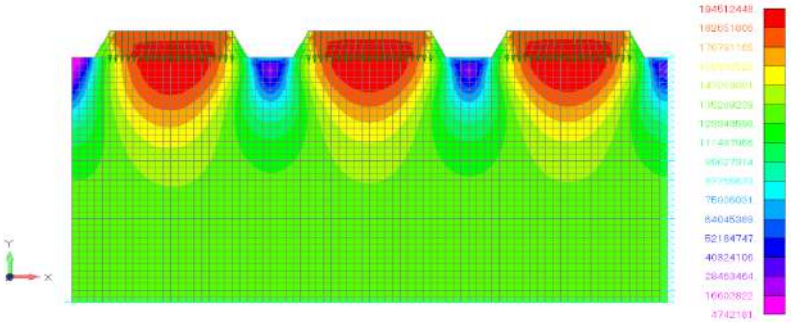
а

$\sigma_{екв}$, Па



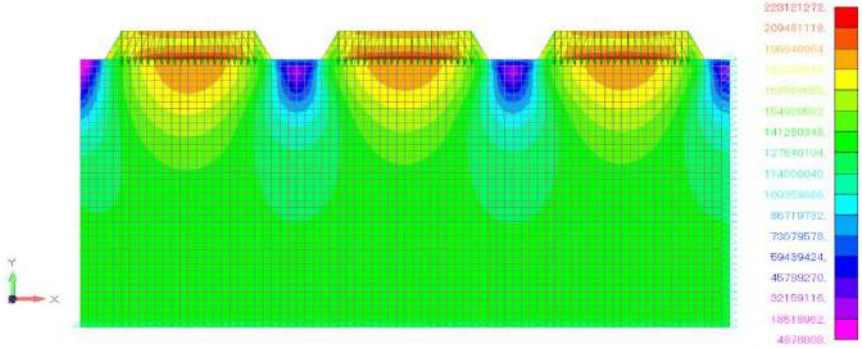
б

200мкм $\sigma_{екв}$, Па



в

$\sigma_{екв}$, Па



г

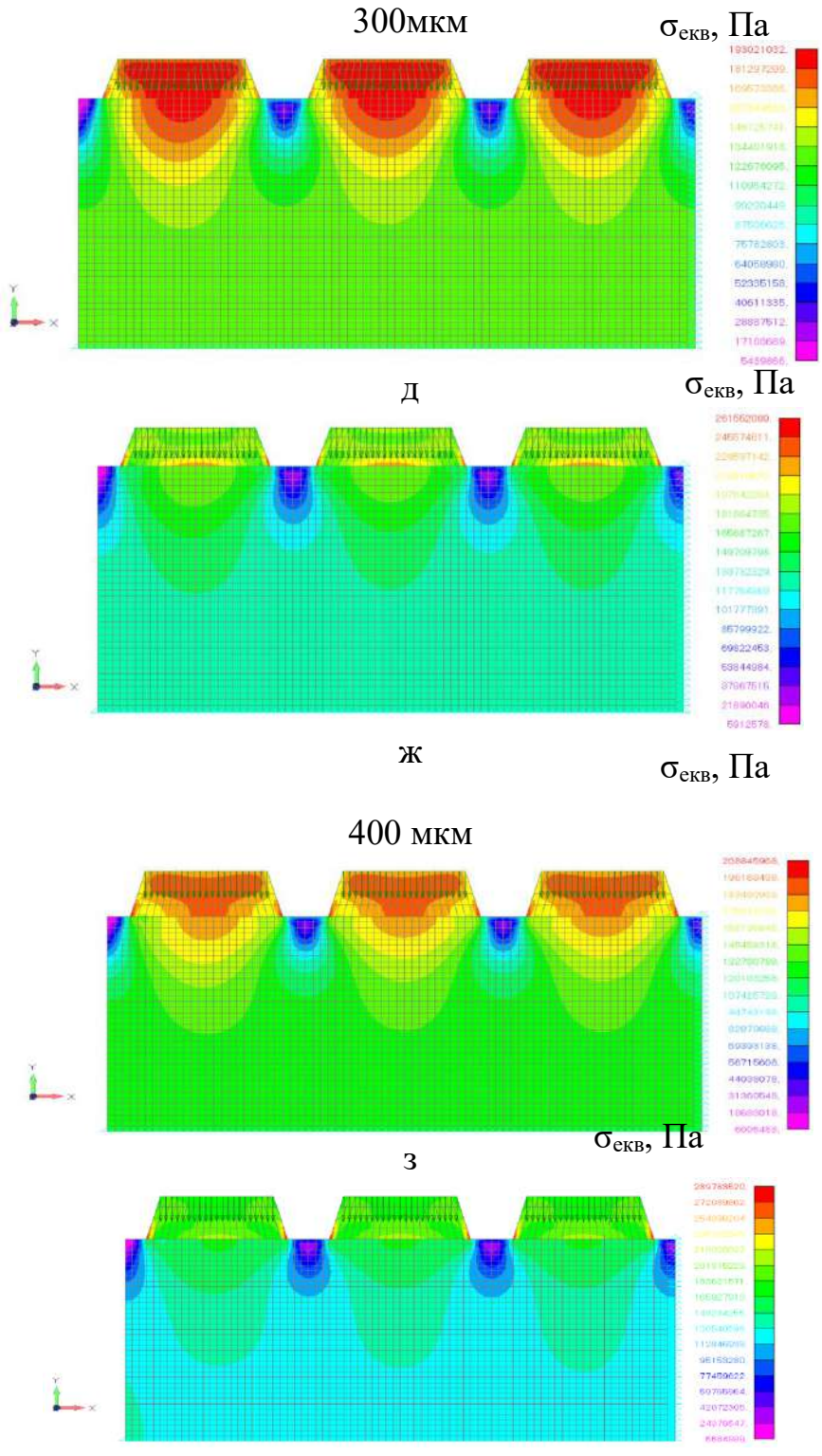


Рис. А1. Напружено-деформований стан композиції основа-покриття від дії нормального навантаження на ділянках несуцільного електроіскрового покриття з карбіду вольфраму ВК8: а - покриття товщиною h=0.0001 м (100 мкм); в –

товщиною h = 0.0002 м (200мкм); д – товщиною 0,0003 (300 мкм) і з – товщиною 0,0004 (400 мкм), б, г, ж, к – покриття з ніхрому.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б1

Фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалів покриття та зміцнюємих поверхонь

Матеріал	Модуль пружності E x10^5, МПа	Модуль зсуву G x10^5, МПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Мікро твердість НВ, МПа	Межа міцності при згині σ, МПа	Межа міцності при стиску σ, МПа	Температура плавління Т, ^{0}С
65Г	2,15	82	0,25-0,33	241			
Ст. 45	2,0	79,3	0,25-0,33	207	640		
ВК8	4,4-6,0	1,8-2,0	0,18-0,21	13,6	1666	6000	
КХН25	3,7			15ГПа			1895

Таблиця Б2

Фізико-механічні і теплофізичні властивості матеріалів покриття та зміцнюємих поверхонь

Матеріал	Модуль пружності E x10^5, МПа	Модуль зсуву G x10^5, МПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Мікро твердість НВ, МПа	Межа міцності при згині σ, МПа	Межа міцності при стиску σ, МПа
65Г	2,15	82	0,25-0,33	241		
Ст. 45	2,0	79,3	0,25-0,33	207	640	
ВК8	4,4-6,0	1,8-2,0	0,18-0,21	13,6	1666	6000
КХН-25	3,7	1,27	0,26	15ГПа		
Х20Н80			0,28	140…150		

Таблиця Б.3

Фізико-механічні параметри зміцнюємої поверхні і покриття

Основа Р6М5			Покриття ВК8		
E_o, МПа	G_o, МПа	H, мм	E_n, МПа	G_n, МПа	h, мкм
2,3x10^5	9,5x10^4	0,5	7,2x10^5	2,5x10^5	100…500

Використовуємі матеріали електродів для досліджень:

1) карбід вольфраму ВК8 (WC – 8%Co);

2) композиційний матеріал КХН-25 (тип: Cr-Ni-C) ТУ У 322-19-12-99, його склад - 75% Cr_2C_3 + 25% Ni.

ДОДАТОК В

Характеристика подрібнюючого апарату комбайна КСК

Комбайн самохідний кормозбиральний КСК-100 призначений для скошування зелених і підбирання із валків підв'ялених сіяних і природніх трав, скошування кукурудзи та інших високостеблових культур з одночасним подрібненням і навантаженням маси в транспортні засоби для приготування сінажу, брикетованих і гранульованих кормів, трав'яної муки, силосу, зеленого корму для безпосереднього вигодуванню скоту і приготування подрібненого сіна і соломи.

Комбайн може використовуватись в усіх грунтово-кліматичних зонах з помірним кліматом, крім гірських районів перезволожених зон. Комбайн самохідний кормозбиральний включає: самохідний подрібнювач, який складається із рами, моста ведучих коліс, моста керуємих коліс, моторної установки, кабіни, живильно-подрібнюючого апарату, силосопроводу, приводів і механізмів керування, гідро- і електрообладнання; підборщик; жатку для збирання трав; жатку для збирання кукурудзи; транспортий візок для перевезення жаток; змінний подрібнюючий апарат (рис. В.1).

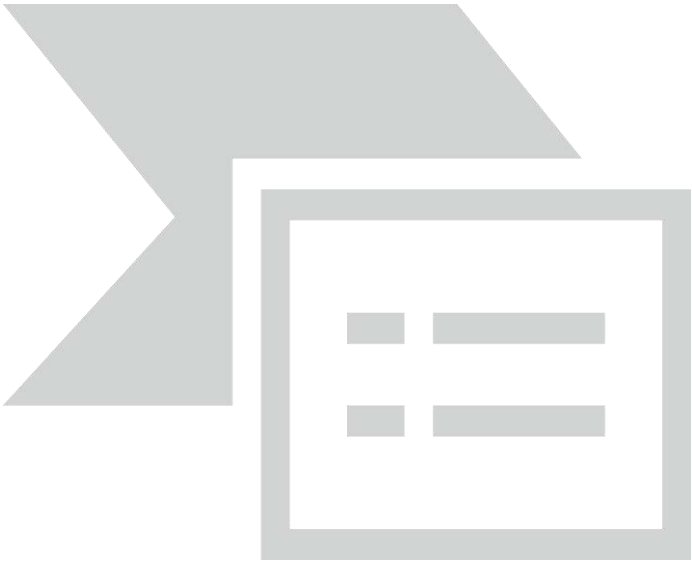


Рис. В.1. Подрібнюючий барабан комбайну КСК

Працездатність подрібнюючого апарату (рис. В.1) залежить від зазору між лезом ножа і ріжучою кромкою протиріжучого брусу. В процесі роботи протиріжучий брус зношується і потребує заміни.

Ножі та протиріжучі бруси використовуються у подрібнюючому барабані комбайна КСК-100 для обробки (подрібнення) кормів при їх збиранні. В залежності від необхідної довжини різання в барабані можуть встановлюватись від чотирьох до дванадцяти ножів, число яких визначає величину навантаження на брусі. Так, при експлуатації на підбиранні трав і довжини різання 17 мм для швидкості переміщення комбайну 5 км/год робота подрібнюючого барабану характеризується наступними параметрами: частота обертання 1000...1050 об/хв, крутний момент – до 60 кгс·м, максимальна потужність – 25...26 кВт. В цілому, на подрібнення кормів затрачається до 1/3 загальної потужності комбайна, при цьому витрати потужності на подрібнення кормів різко зростають по мірі затуплення ріжучих кромок брусів [45, 65].

Таким чином, підвищення зносостійкості ріжучих кромок дозволить суттєво скоротити енергетичні втрати на здійснення технологічних процесів подрібнення кормів.

ДОДАТОК Г

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор КАТП «Агробудавтосервіс»,
м. Кропивницький, Україна
Володимир КИРИЧЕНКО
05 жовтня 2024 року

АКТ
про використання результатів наукових досліджень
аспіранта кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів
Державного університету «Київський авіаційний інститут»
Шамрая Віталія Борисовича

Результати наукових досліджень, які отримані особисто аспірантом кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Державного університету «Київський авіаційний інститут» Шамраєм Віталієм Борисовича були реалізовані в технології електроіскрового легування та використані у КАТП «Агробудавтосервіс», м. Кропивницький при відновленні та підвищенні строку служби робочих органів і деталей аграрної техніки.

Запропоновані аспірантом Шамраєм В.Б. технологія електроіскрового легування та технологічні інструкції по підвищенню зносостійкості ножів бурякозбиральної техніки та протиріжучих платин подрібнюючого барабану комбайна, а також по відновленню та підвищенню характеристик міцності розподільчих валів двигунів і валу муфти зчеплення трактора дозволили підвищити строк служби робочих органів і деталей сільськогосподарської техніки та продовжити термін їх використання.

Випробування показали, що відновлення опорних шийок розподільчих валів і валів муфт зчеплення дозволило підвищити їх строк служби в 2 ... 2,5 рази.

Використання робочих органів сільськогосподарської техніки зі зносостійкими покриттями з карбіду вольфраму сприятливо позначається на їх експлуатаційних характеристиках за рахунок підвищення на 50% поверхневої твердості та зносостійкісті.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Від «Державного університету
«Київського авіаційного інституту»
Оксана МІКОСЯНЧИК
Дар'я ЛЕУСЕНКО

Від КТП «Агробудавтосервіс»
Володимир КИРИЧЕНКО
Ігор ЯРОЩУК

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукових досліджень та трансферу технологій
_____ Сергій ГНАТЮК
"__" _____ 2025 року

АКТ

Комісія у складі:
голови – завідувача кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, д.т.н., професора Мікосянчик Оксани Олександрівни;
членів комісії: – доцента кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, к.т.н., доцента Башти Олександра Васильовича;
– доцента кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, к.т.н., доцента Шевченка Олега Анатолійовича

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут» Шамрая Віталія Борисовича на тему: "Поліпшення триботехнічних властивостей деталей сільськогосподарських машин шляхом формування композиційних покриттів" на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка впроваджені в навчальний процес Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Зокрема, у процесі підготовки курсів лекцій та практичних занять з дисциплін «Інженерія поверхні» та «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» розглянуто сучасні порошкові зносостійкі композиційні матеріали та метод електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; підготовки тем кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 131 Прикладна механіка.

Голова комісії доктор технічних наук, професор _____ Оксана МІКОСЯНЧИК

Члени комісії кандидат технічних наук, доцент _____ Олександр БАШТА

кандидат технічних наук, доцент _____ Олег ШЕВЧЕНКО

ДОДАТОК Д

Список публікацій здобувача за темою дисертації

У фахових виданнях:

1. Мікосянчик О.О., Шамрай В.Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. 4 (97). С. 44-49. https://doi.org/10.18372/0370-2197.4 (97).16958

2. Шамрай В.Б., Мікосянчик О.О., Лопата Л.А., Голембієвський Г.Г., Горб Є.С. Композиційні матеріали для зносостійких покриттів деталей сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 1(98). С. 4-13. https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17356

3. Шамрай В.Б., Мікосянчик О.О., Забойкіна Н.П. Зміцнення та підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин композиційними покриттями дискретної структури. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 4 (101). С. 60 - 72. https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18080

4. Шамрай В.Б., Калініченко В.І. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарської техніки покриттями дискретної структури. Технологічне забезпечення покриттів дискретної структури електроіскровим легуванням. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. 2 (103). С. 146-157. https://doi.org/10.18372/0370-2197.2 (103).18697

5. Шамрай В.Б. Оцінка напруженно-деформованого стану поверхонь із композиційними покриттями, сформованими методом електроіскрового легування. *Проблеми тертя та зношування*. 2025. 1 (106). С. 87-97. https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(106).19836

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Мікосянчик О.О., Шамрай В.Б., Кулижський В.М., Бурлаченко О.М., Лопата В.Н. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика:* матеріали 21-ї Міжнародної

науково-практичної конференції (06–10 вересня 2021 р., м. Одеса). 2023. Київ, АТМ України. С. 53-55. https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb3-21s.pdf

7. Мікосянчик О.А., Шамрай В.Б., Дудан О.В., Філоненко Д.В., Каліні-ченко В.І., Кобзарь В.Л. Підвищення ефективності дроблення зерна шляхом використання ріжучих елементів робочих органів із зносостійкими покриттями дискретної структури. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем* (13-15 квітня, 2022 р., ЦНТУ, м. Кропивницький)*: м*атеріали IV–ії Міжнародної науково-практичної конференції (19-20 травня 2022 року, ЦНТУ, м. Кропивницький). Кропивницький: 2022. С. 59-64.
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/programa_konf._pnmo-2022_1.pdf

8. Шамрай В.Б., Калініченко В.І., Лопата Л.А. Розробка технології відновлення та зміцнення кільцевої канавки алюмінієвого поршня ДВЗ дискретними покриттями. *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті:* Матеріали 23-го Міжнародного науково-технічного семінару (15–16 березня 2023 р., Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ). Київ, АТМ України, 2023. С. 123-125. ttps://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-23.pdf

9. Мікосянчик О.А., Шамрай В.Б. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей сільскогосподарської техніки композиційними покриттями. Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали 25-го Міжнародного науково-технічного семінару (25–26 березня 2025 р., Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ). Київ, АТМ України, 2025. С. 118-121.