

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**СКРИНСЬКА МАРИНА ВОЛОДИМИРІВНА**

**УДК 621.78**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОКРИТТІВ  
МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

\_\_\_\_\_ М.В. Скринська

**Керівник роботи**

Куликівський В.Л.

кандидат технічних наук

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Скринська Марина Володимирівна. Оптимізація зносостійкості покриттів методом електроіскрової обробки.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі встановлено, що одним з найбільш перспективних методів є електроіскрова обробка, при якій потоками частинок високої щільності енергії забезпечується створення поверхневих структур з підвищеними механічними та триботехнічними властивостями при значній простоті технологічного обладнання та економічності процесу.

Встановлено, що товщина покриття залежить від хімічного складу матеріалу легуючого електрода та енергетичних режимів ЕІО: найбільша товщина покриття утворюється при обробці електродом ІМХ2, що в 4 рази більше, ніж при обробці серійним електродом Т15К6; підвищення енергетичних режимів ЕІО призводить до збільшення товщини покриття незалежно від матеріалу легуючого електрода, що дозволяє рекомендувати ЕІО електродами Т15К6, ІМХ2, Ш2 для підвищення зносостійкості та відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин.

Метами планування факторного експерименту та статистичної обробки отриманих даних досліджено вплив режимів ЕІО сталевих поверхонь на зносостійкість металополімерної трибосистеми, а також встановлені оптимальні режими обробки: напруга  $U = 145-150$  В, ємність конденсаторів  $C = 225-230$  мкФ, тривалість обробки  $t = 4$  хв/см<sup>2</sup>, що забезпечують найбільше зниження швидкості зношування полімерного контртіла та рекомендовані при розробці технологічних процесів електроіскрової обробки.

*Ключові слова:* електроіскрова обробка, триботехнічні властивості, зношування, поверхня

## ANNOTATION

**Skrynska Marina Volodymyrivna. Optimization of wear resistance of coatings by electrospark treatment – Qualification work on the rights of the manuscript.**

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the master's thesis it is established that one of the most promising methods is electrospark processing, in which the flow of high energy density particles provides the creation of surface structures with high mechanical and tribotechnical properties with considerable simplicity of technological equipment and process efficiency.

It is established that the coating thickness depends on the chemical composition of the alloying electrode material and EEC energy regimes: the largest coating thickness is formed during treatment with IMX2 electrode, which is 4 times more than when treated with serial electrode T15K6; increasing the EEC energy regimes leads to an increase in the thickness of the coating regardless of the material of the alloying electrode, which allows us to recommend EEC electrodes T15K6, IMX2, III2 to increase wear resistance and restore worn surfaces of parts of friction units.

The influence of EEC steel surface modes on the wear resistance of metal-polymer tribosystem was investigated by methods of factor experiment planning and statistical processing of the obtained data, and optimal processing modes were established: voltage  $U = 145-150$  V, capacitor capacity  $C = 225-230$   $\mu$ F, processing time  $t = 4$  min/cm<sup>2</sup>, which provide the greatest reduction in the wear rate of the polymer counterbody and are recommended in the development of technological processes of electrospark treatment.

*Key words: electrospark treatment, tribotechnical properties, wear, surface*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКА ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ.....	20
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ.....	26
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Надійність та довговічність більшості виробів сучасної техніки значною мірою залежить від працездатності та терміну служби численних вузлів тертя (трибосистем) різних систем та механізмів машин та їх агрегатів. Процеси руйнування деталей машин у переважній більшості випадків починаються з поверхневих зон. Поверхні деталей зазнають зношування, корозії, втомного та інших видів руйнування. Надійність трибосистем визначається головним чином зносостійкістю рухомо сполучених деталей, яка залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів цих деталей та якості обробки сполучених поверхонь. Властивості матеріалів трибосистем, як і всіх конструкційних матеріалів, залежать від хімічного складу та структури матеріалів. Для деталей вузлів тертя визначальним для надійності та довговічності трибосистеми є структура та властивості поверхневих шарів.

Отже, підвищення зносостійкості деталей трибосистеми є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування. Це завдання належить до найбільш складних у науці та техніці, оскільки вимагає аналізу складних взаємопов'язаних процесів у зоні тертя, які можна вивчити та описати лише на основі фундаментальних положень фізики, хімії, матеріалознавства.

Протягом останніх десятиліть розроблено різні методи підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя. Найбільшої актуальності набувають технології отримання зносостійких та зміцнених покриттів високоенергетичною обробкою. Кожен із відомих в даний час методів мають свої переваги та недоліки, що обмежують сферу їх застосування. Тому розробка ефективного, досить простого для освоєння у промисловому виробництві та економічного методу підвищення зносостійкості залишається актуальним науковим та практичним завданням.

На підставі викладеного сформульована **мета роботи** – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці

методом електроіскрової обробки, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя машин.

Відповідно до цього сформульовані **завдання** дослідження:

1. Проаналізувати методи і способи підвищення зносостійкості деталей трибоспряжень.

2. Розробити методику проведення експериментальних досліджень для виявлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці методом електроіскрової обробки, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя машин.

3. Провести експериментальні дослідження.

**Об'єкт дослідження:** процес електроіскрової обробки сталевих поверхонь.

**Предмет дослідження:** закономірності впливу режимів електроіскрової обробки сталевих поверхонь на зносостійкість металополімерної трибо системи.

**Методи дослідження.** Дослідження проводилися з використанням системного підходу та аналізу, логіки наукових досліджень. Застосовувалися сучасні методики лабораторних досліджень з використанням методів математичної статистики та сучасних обчислювальних комплексів. Аналіз літературних джерел здійснювався аналітико-монографічним методом.

**Перелік публікацій за темою роботи:**

1. Куликівський В. Л., Сливинський В.О., **Скринська М.В.** Аналіз процесу зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції молодих учених і науково-педагогічних працівників «Сільськогосподарські, біологічні, економічні, загальноосвітні та технічні науки», 20 травня 2021 р. м. Умань. Умань : ВПЦ «Візаві», 2021. С. 171-174.

2. Куликівський В., **Скринська М.**, Матус О., Росковинський Д. Методи створення зміцнювальних зносостійких покриттів. Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. С. 58-60.

3. Куликівський В. Л., Климчук А. А., Сливинський В.О., Скринська М.В., Дембіцький Н.В., Маркус В.І. Методика визначення розподілу тиску на поверхні робочих органів плугів. Збірник тез VII-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 174-177.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств представляє запропонована технологія обробки сталених поверхонь для покращення трибо технічних характеристик і підвищення надійності трибо спряжень.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 14 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 35 сторінок комп'ютерного тексту, містить 7 таблиць і 9 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

В даний час поширеним методом поверхневого зміцнення є створення тонких функціональних покриттів (плівок) на оброблюваних деталях. Покриття, що формується на поверхні, утворюється за рахунок хімічних реакцій та дифузійних процесів між структурними елементами матеріалу, парогазових сумішей, або струмопровідного середовища та електричного поля. У цьому структура внутрішніх шарів матеріалу залишається незмінною. Покриття можуть формуватися при електроосажденні (хромування, нікелювання, оксидування та ін) і напиленні (газополумєневим, плазмовим, детонаційним та ін) частинок матеріалів.

Поряд із традиційними способами підвищення зносостійкості різального інструменту та деталей машин електроосажденням застосовують мікродугове оксидування (МДО). Даний метод дозволяє формувати на різних металах (Al, Ti, Zr, Nb та ін) анодні шари, що містять як оксиди основного металу, так і оксиди та сполуки компонентів електроліту. Однак технологія МДО не дозволяє отримувати однакою зносостійкість за товщиною зміцнених оксидних шарів. При наближенні до поверхневих шарів їх твердість знижується, що сприяє більш інтенсивному зношуванню деталей, що контактують в умовах експлуатації.

У багатьох роботах розглянуті ефективні способи підвищення зносостійкості композиційних матеріалів на основі титану та цирконію методом МДО. Показано, що варіюючи параметри МДО (щільність струму, час обробки, склад електроліту), можна змінювати коефіцієнт тертя та зносостійкість покриттів залежно від призначення виробу.

Зносостійкість оксидних покриттів, сформованих у силікатно-лужному електроліті з перманганатом калію на титані VT1-0 та цирконії E125 з подальшою термічною обробкою, зростає у 8-11 разів. Дослідниками встановлено, що залежно від параметрів МДО, коефіцієнт тертя пари виріб –



контртіло знижується у 2,5-3 рази порівняно із зразками без оксидного шару та становить 0,3-0,35. Продукти зношування оксидного шару являють собою дрібнодисперсний порошок ( $\text{SiO}_2$ ), що виконує функцію сухого мастила та дозволяє відмовитися в ряді випадків від традиційних мастил.

Електроосадженням з органічних розчинів на мідній прокатаній фользі були отримані плівки зі сплаву Ag-Ni в широкому діапазоні складів. Встановлено, що поверхневі плівки являють собою дрібнокристалічну суміш чистих елементів срібла та нікелю. При збільшенні вмісту нікелю в срібній матриці розмір зерна зменшується і при вмісті Ni більше 10% частинки в плівці мають розмір зерна менше 10 нм. Були проведені дослідження стійкості отриманих сплавів до нагрівання та механічної обробки. При нагріванні на повітрі розмір зерен збільшується і після відпалу таких зразків при  $600^\circ\text{C}$ , він дорівнює розміру зерен у плівках де концентрація нікелю мала. Подібні дрібнокристалічні сплави Ag-Ni неможливо одержати традиційними методами термічної обробки.

У багатьох роботах досліджено покриття на основі олова та міді, отримані електрохімічним осадженням на підкладці з бронзи БрОС8-12 та міді марки М1. Застосування досліджуваних покриттів дозволяє знизити зношування при нанесенні на бронзу в 1,6-14 разів, при нанесенні на мідь – в 5-49 разів, при цьому суттєво знижується інтенсивність зношування. Отримані антифрикційні покриття рекомендовані для застосування у технології виготовлення підшипників ковзання.

Покриття можуть бути утворені також напиленням – газополум'яним, плазмовим, детонаційним та іншими видами. Сутність зміцнення та відновлення газополум'яним напилюванням (ГПН) полягає в розплавленні порошкових та дротяних матеріалів газовим полум'ям та розпорошенні їх струменем стиснутого повітря або газу.

Досліджено триботехнічні властивості покриттів, отриманих ГПН порошкових та дротяних матеріалів. Результати досліджень показали

можливість застосування технології ГПН для відновлення деталей вузлів тертя ковзання і при виготовленні біметалічних вкладишів зі сталеву основою замість цільнобронзових.

В даний час широке застосування знайшли плазмові технології – осадження розплавленого в плазмовому струмені порошку на поверхню металів та сплавів. Плазмою називають газ, що у сильно іонізованому стані під впливом різних чинників: температури, електричного чи високочастотного розряду, детонації. Робоча температура плазмового струменя становить 7000-15000 °С. При плазмовому напиленні плазма утворюється пропусканням газу (аргон, азот, водень, гелій), який збуджується між двома електродами.

Процес плазмового напилення полягає у бомбардуванні оброблюваної поверхні частинками розплавленого присадного матеріалу. Для створення високоміцних захисних покриттів використовують металеві, металокерамічні (на основі твердих сплавів WC-Co, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni та ін.), керамічні порошки (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та ін.). Таким чином, можна отримати високолеговані композитні шари за рахунок швидкого загартування розплавленого стану, насичення з газового середовища азотом і вуглецем, тобто шляхом легування (перемішування у рідкій фазі з тугоплавкими металами). Іншим способом підвищення механічних властивостей є використання тільки плазмового струменя (без порошку) для оплавлення поверхневого шару деталі (плазмова загартування) .

Обробка плазмовою дугою з енергією 0,4 МДж/м дозволяє отримати в поверхневому шарі сталі 20X13 мартенсит із значною часткою (30-50%) залишкового аустеніту. Твердість поверхневого шару становить 650-700 НV, глибина зміцненої зони – 0,8 мм. На гранях зразка формували області поверхневого зміцнення двома послідовними проходами плазмової дуги з перекриттям локальних зон попереднього гарту на  $\approx 30\%$  їх ширини. Зони відпустку з дисперсною структурою та зниженою твердістю служать бар'єрами на шляху поширення тріщин, викликаючи їхню тимчасову зупинку. Періодичне чергування твердих та пластичних прошарків у структурі робочої поверхні

дозволяє ефективно збільшити довговічність деталей, що працюють в умовах динамічних та термомеханічних навантажень.

В попередніх роботах були досліджені мікротвердість, фазовий та елементний склади, щільність та структура тонких плівок, отриманих іонно-плазмовим осадженням. Іонно-плазмові методи нанесення покриттів засновані на конденсації компонентів плазмової фази з одночасною бомбардуванням поверхні частинками високих енергій. Твердість одержуваних покриттів TiN визначається, насамперед, тиском азоту і температурою підкладки (енергією частинок, що осаджуються) і залежить від числа шарів і загальної товщини. Ці параметри зумовлюють відповідний фазовий склад і дисперсність структури, що і визначає основні фізико-механічні властивості покриттів.

Тонкі покриття товщиною 5-12 мкм на основі карбонітриду титану, обложені на зразках зі сталі 12X18H10T, мають колір від золотистого до темно-синього з різною адгезією аж до можливого відшаровування. Виявлено певну кореляцію мікротвердості, параметрів атомно-кристалічної структури, щільності, обложеної маси та розмірів краплинної складової плазми.

Детонаційне напилення – це процес нанесення покриттів на оброблювану поверхню деталі розпиленням порошкоподібного матеріалу продуктами згоряння, що виникають у результаті спрямованого вибуху газової суміші. Прискорюючись продуктами згоряння, частки порошку нагріваються і при динамічній взаємодії (ударі) з поверхнею деталі утворюють високощільне покриття на ній.

Перспективним напрямом структурної модифікації поверхневих шарів деталей машин є обробка високоенергетичними концентрованими потоками енергії та речовини (КПЕ): лазерні технології, електронно-променева обробка, іонно-променева обробка, іонна імплантація, вакуумно-плазмова, імпульсно-плазмова обробка та ін.

Лазерні технології, що займають особливе місце серед високоенергетичних методів обробки металевих поверхонь, забезпечують значне зміцнення та

підвищення зносостійкості деталей. Лазерна обробка дозволяє цілеспрямовано змінити структурно-фазовий стан та елементний склад поверхневих шарів шляхом подальшої імпульсної термообробки, що забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей матеріалів. Поверхні, що піддаються лазерному зміцненню, не вимагають подальшої механічної обробки, при цьому зносостійкість деталей трибосистем може бути підвищена до 5 разів.

Впровадження методів лазерного зміцнення обумовлюється наявністю серійного високопродуктивного лазерного обладнання як імпульсної, так і безперервної дії, високою технологічністю процесу, значною номенклатурою оброблюваних деталей, що вимагають локального зміцнення, можливістю отримання заданого комплексу фізико-механічних властивостей.

У процесі лазерного модифікування розплавляється ділянка поверхні металу разом з легуючими елементами, попередньо нанесеними на оброблювану ділянку, що дозволяє в локальному обсязі отримати модифікований сплав з необхідними експлуатаційними властивостями. Результати експериментальних досліджень структури та властивостей поверхневих шарів після лазерної обробки з різними легуючими елементами показали, що раціональний вибір способу нанесення та хімічного складу покриття дозволяє підвищити мікротвердість опромінених робочих зон деталей на 30-50%, зносостійкість у 2-3 рази порівняно з об'ємно-загартованими сталями.

Досліджували вплив лазерного зміцнення на коефіцієнт тертя ковзання та інтенсивність зношування сталевих зразків. Після гартування та високого відпуску зразки зі сталі 40X зміцнювалися при потужності випромінювання 1,2-1,5 кВт. На зразках формувалися доріжки гартування таким чином, щоб забезпечити зміцнення поверхні тертя на 25, 40, 50, 60, 80, 100%. В результаті проведених випробувань встановлено, що на зносостійкість зразків істотно впливає співвідношення зміцненої та незміцненої лазерним променем поверхонь тертя. При 50% зміцненні поверхні тертя сталевих зразків зносостійкість

збільшується в середньому в 2,5 рази, а при 100% - в 3,7 рази в порівнянні з незміцненим зразком.

Досліджували структуру та мікротвердість чавуну марок СЧ25 та ВЧ40 після гартування твердотілими лазерами. Мікротвердість у зоні лазерного загартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури склала 600-720 HV та 600-750 HV відповідно. Загальна глибина зміцненого шару становить 0,15-0,25 мм, що відповідає технічним вимогам (глибина гартування робочих поверхонь не менше 0,13 мм).

Досліджувався вплив інертного газу на хімічний склад, структуру та властивості покриттів з диселеніду молібдену ( $\text{MoSe}_2$ ), створюваних імпульсним лазерним осадженням при різних тисках аргону. Вибір оптимального тиску газу при осадженні дозволяє знизити коефіцієнт тертя таким покриттям приблизно в 2 рази в порівнянні з покриттями, отриманими осадженням у вакуумі. Встановлено, що варіюючи інтенсивність лазерного впливу на сталеву основу, можна отримати тонкоплівкові вуглецеві алмазоподібні покриття трибологічного призначення, що забезпечують зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості поверхонь деталей, що труться.

Широке застосування лазерних технологій стримується негативним впливом на експлуатаційні властивості деталей великого перепаду внутрішньої напруги на межі зони лазерного впливу з матрицею. Перепад напруги можна зменшити наступним нагріванням, що призводить до зниження твердості отриманих покриттів, що зменшує ефективність лазерної обробки. Отже, необхідно використовувати комбіновані методи поверхневого зміцнення із застосуванням лазерного нагрівання деталей.

Одним із відносно нових методів поліпшення експлуатаційних властивостей деталей є електронно-променева обробка (ЕПО). При дії на поверхню деталей потоку електронних пучків частина енергії відбивається від поверхні, частина поглинається в тонкому поверхневому шарі матеріалу, що призводить до його нагрівання, подальшого плавлення та випаровування

залежно від умов та режимів обробки. Поліпшення триботехнічних властивостей деталей забезпечується оптимальним вибором параметрів електронно-променевої обробки. Дослідження показали, що застосування дворазового електронно-променевого гартування з параметрами обробки: струм пучка електронів  $I = 16$  мА; швидкість переміщення зразків щодо електронного пучка  $V = 70$  мм/с; відстань від випускного вікна до зразка  $H = 130$  мм; енергія пучка  $E = 1,4$  МеВ; дозволяє значно зміцнювати поверхневі шари вуглецевих сталей У8 та 45.

Досліджено структуру та триботехнічні властивості покриттів на основі Cu-Ni-WC, сформовані методом електронно-променевого наплавлення (ЕПН) на сталевих та мідних поверхнях. Введення до складу мідного сплаву карбїду вольфраму істотно підвищує його здатність навантаження, що дозволяє застосовувати його в важко навантажених вузлах тертя. Метод ЕПН дозволяє формувати безпористе покриття з рівномірним розподілом твердої фази по всьому об'єму наплавленого шару. При цьому середній розмір карбїдних зерен залишається незмінним. Товщина покриття залежить від кількості проходів електронного пучка. Збільшення кількості твердої фази зменшує знос, збільшує здатність навантаження і час приробітку.

Були отримані покриття з високим вмістом карбїду хрому на низьковуглецевій сталі методом ЕПН. При вмісті хрому 12-14% сформовані покриття мають підвищену корозійну стійкість, яка підвищується при збільшенні питомої поверхневої енергії  $W$ . При  $W = 8,5-9,5$  кДж/см<sup>2</sup> корозійна стійкість досягає максимальних значень, порівнянних із рівнем корозійної стійкості високолегованої сталі 12X18H10T. Формування покриттів позавакуумною електронно-променевою наплавкою карбїдом вольфраму з введенням до складу наплавної суміші нікелю і карбїду титану як модифікатор дозволяє значно підвищити твердість і зносостійкість низьковуглецевої сталі за рахунок аустенізації та формування дисперсної структури наплавленого шару.

Іонно-променева обробка – іонна імплантація (ІІ) відноситься до ефективних видів модифікування поверхневих шарів при опроміненні імпульсними потужними іонними пучками, і дозволяє значно підвищити зносостійкість та корозійну стійкість деталей. Іонна імплантація заснована на впровадженні у тверде тіло іонів, прискорених у електростатичному полі, що призводить до зміни структурно-фазового та елементного складу поверхневих шарів. Як первинні частинки можуть бути використані позитивні/негативні іони і нейтральні атоми. При імплантації в металеву матрицю прискорений іон втрачає свою енергію внаслідок пружних зіткнень з атомами матриці та непружної взаємодії з електронами. Іонна імплантація дозволяє впроваджувати будь-які елементи в кількостях, що перевищують їх граничну розчинність. Незважаючи на те, що частинки, що імплантуються, проникають на невелику глибину, товщина шару зі зміненими властивостями на 2-3 порядки перевищує глибину їх проникнення внаслідок дифузійних процесів, що розвиваються, і виникаючих дефектів кристалічної структури.

ІІ супроводжується розпиленням опромінюваного матеріалу, що призводить до зменшення шорсткості оброблюваної поверхні. У процесі обробки температура деталі залишається майже незмінною. Завдяки відсутності термічних дефектів ІІ може бути використана на фінішних операціях.

Проведено дослідження зміни структурного стану, триботехнічних та корозійних властивостей поверхневих шарів сталі 25В20К20Х4Ф2М, обробленої концентрованими потоками іонів азоту. Зносостійкість поверхневих шарів, насичених іонами азоту, збільшилася у 2,1 рази порівняно з вихідним станом. Мікротвердість модифікованих азотом шарів збільшилася до 12300 МПа. Максимальна стійкість до корозійного розчинення в нейтральному соляному розчині (10% NaCl) досягається на стадіях виділення в азотованому шарі спеціальних нітридів, що зв'язують атоми ванадію та вольфраму в нітридах VN та W<sub>2</sub>N. При цьому швидкість корозії сталі знижується на 20%.

Вивчали також вплив іонного азотування з накладанням магнітного поля на мікротвердість та структурно-фазовий склад модифікованого шару інструментальних сталей Р6М5 та Х12. Результати вимірювання мікротвердості зразків показали, що після іонного азотування з накладанням магнітного поля мікротвердість поверхні сталі Х12 становить 2100 НV, а поверхні Р6М5 – 1950 НV. Високий рівень мікротвердості обумовлений утворенням тонкого поверхневого шару сталей високодисперсних частинок нітридів легуючих елементів (Cr, Mo, W, V). Нітридоутворюючі елементи, підвищуючи мікротвердість поверхні, ускладнюють дифузію азоту та зменшують товщину азотованого шару. Накладання магнітного поля помітно прискорює формування азотованого шару, збільшуючи його товщину ( $\approx 200$  мкм), що свідчить про високу ефективність процесу.

Вивчався і вплив іонно-променевого азотування при температурах 670-870К на структуру та властивості інтерметалевого сплаву  $Fe_3Al$ . Встановлено, що іонно-променева обробка металу призводить до утворення поверхневих шарів, модифікованих азотом, завтовшки до 15-18 мкм з мікротвердістю до 13200 МПа.

Вакуумно-плазмова технологія дозволяє наносити композиційні та багатошарові покриття різних складів на конструкційні та інструментальні матеріали. Досліджували також вплив технологічних режимів вакуумно-плазмового нанесення покриттів з TiN та TiC на швидкорізальні сталі Р6М5, Р9 та тверді сплави Т15К6, ВК6, ВК8. Встановлено, що стійкість ріжучого інструменту з вакуумно-плазмовим покриттям збільшується в 1,5-3,5 рази.

Досліджувався вплив термоелектричної обробки (ТЕО) на коефіцієнт поверхневого зміцнення легованих сталей залежно від вмісту вуглецю та часу обробки, досліджували також розподіл легуючих елементів у поверхневому шарі. Встановлено, що зносостійкість зразків після ТЕО підвищується у 1,6-1,8 разів. Виконано пошаровий аналіз розподілу легуючих елементів у поверхневому шарі зміцнених зразків. Встановлено, що концентрації хрому,



нікелю, молібдену, алюмінію, кремнію, ванадію у поверхневому шарі збільшилися у 1,4-11,4 рази порівняно з обсягом. Найбільші збагачення спостерігалися для алюмінію (3,2-11,4 рази) і хрому (1,5-4,0 рази). Металографічні дослідження виявили підвищення дисперсності структурних складових поверхневих ділянках різних сталей після електричного впливу при високих температурах.

При взаємодії у вакуумі імпульсного потоку плазми з титановими зразками, покритими тонкою діелектричною плівкою (товщиною  $\approx 1$  мкм), на поверхні цих зразків збуджуються мікроплазмові розряди. В результаті мікроплазмової обробки (МПО) на зразках титану формується суцільний переплавлений приповерхневий шар товщиною до 10 мкм, який характеризується сильно зміненою структурою та підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями, що залежать від режиму обробки. МПО призводить до збільшення мікротвердості поверхні титанових зразків у 5 разів у порівнянні з вихідним станом, а інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя при цьому зменшуються у кілька разів.

Аналіз результатів досліджень структури, триботехнічних та фізико-механічних властивостей конструкційної сталі 40X після імпульсно-плазмової обробки (ІПО). Покриття, яке формується на сталі 40X методом ІПО, має високу щільність дислокацій і, як наслідок, високу твердість. У процесі ІПО утворюється аустеніт із дрібнозернистою структурою, кількість якого зростає зі збільшенням інтенсивності обробки. Після охолодження сталі формується високодисперсний мартенсит, який має поліпшені механічні властивості. Результати експериментальних досліджень зразків із сталі 40X показали, що ІПО багаторазово підвищує зносостійкість поверхонь тертя при змащуванні мастилом И-45 та емульсією (водним 3%-м розчином мастила). Відзначено, що зносостійкість обробки імпульсною плазмою поверхні підвищується зі збільшенням контактного тиску та швидкості ковзання у 5-6 разів.

До перспективних методів одержання зносостійких надтвердих покриттів належить електроерозійний синтез (ЕЕС). ЕЕС заснований на взаємодії спеціальної екзотермічної суміші з основним металом під дією електричного розряду, що супроводжується утворенням металів. Дослідження, що проводяться в галузі технології ЕЕС, спрямовані на вивчення особливостей процесу формування покриттів при впливі імпульсів електричного струму різної потужності, якості покриттів за зміни технологічних параметрів процесу, зносостійкості покриттів в умовах абразивного зношування, визначення оптимальних режимів зміцнення. Результати досліджень свідчать про перспективність ЕЕС-покриттів та можливості їх застосування для зміцнення та ремонту деталей машин. Запропоновано та досліджено процес електроерозійного зміцнення деталей у середовищі рідкого азоту, що дозволяє підвищувати експлуатаційні характеристики поверхневих шарів без нанесення на оброблювану поверхню зміцнюючого матеріалу.

Досліджувався процес обробки металів імпульсними електричними розрядами, у якому поверхневі шари металу можуть хімічно взаємодіяти з довкіллям. Встановлено, що при електроіскровій обробці (ЕІО) пар латунь (Л-59)-сталь (Ст3) та мідь-сталь (Ст3) у середовищі гасу зі збільшенням енергії в імпульсі відбувається інтенсивне розкладання середовища, яке супроводжується збільшенням виходу газоподібних продуктів:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  та ін. На основі даних про кількість та склад газоподібних продуктів були розраховані теплові ефекти сумарних реакцій розкладання та встановлено, що частка енергії, що витрачається на хімічні реакції становить 4,24-13,15%.

Найчастіше електроерозійна обробка поверхонь проводиться на повітрі, основними хімічно активними компонентами якого є кисень та пари води. Дослідження продуктів ерозії при розрядах між залізними електродами (армко-залізо) у воді показали наявність у них оксидів та гідроокислів. За інших рівних умов загальна кількість оксидів у продуктах ерозії становила для електродів з

армо-заліза приблизно 50-60%, цинку – 50%, міді – 40%, алюмінію – 10%, олова – 10%.

Одним із перспективних методів поверхневого зміцнення деталей КПЕ є електровибухове легування (ЕВЛ). Сутність методу ЕВЛ полягає у формуванні структури та зміні властивостей металів і сплавів при імпульсному впливі на поверхню багатофазним плазмовим струменем, сформованим з продуктів електричного вибуху провідників. Досліджено вплив обробки ЕВЛ металів та сплавів електровибухом різних матеріалів. Встановлено, що електровибухова обробка ВК10КС вуглеграфітовими волокнами та алюмінієвою фольгою дозволяє підвищити твердість поверхневих шарів твердих сплавів.

ЕВЛ титаном у високоенергетичному режимі при поглинаємій щільності потужності  $6,0 \text{ ГВт/м}^2$  призводить до формування двошарової зони легування. Поверхневий шар збагачений складним карбідом (Ti, W) C, проміжний – напівкарбідом  $W_2C$ . Утворення в поверхневих шарах твердого сплаву ВК10КС карбідів титану пояснює підвищення мікротвердості поверхні до 25000 МПа. Коефіцієнт тертя після зміцнення ЕВЛ зменшується на 30%.

Широке впровадження методів високоенергетичної структурної модифікації обмежується складністю та високою вартістю обладнання, серійне виробництво якого не освоєно. Процес обробки практично завжди повинен проводитися у високому вакуумі ( $10^{-3} - 10^{-5}$  Па), для створення якого потрібна складна система дифузійних чи турбомолекулярних насосів з відповідними форвакуумними або іонними гетерними насосами. До недоліків високоенергетичних методів можна також віднести низьку продуктивність процесів, малу глибину зміцнення та нерівномірність фізико-механічних властивостей модифікованих поверхонь.

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКА ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ

Як об'єкт експериментальних досліджень прийнято конструкційну леговану високоякісну сталь 15ХГН2ТА (ДСТУ), яка широко застосовується для виготовлення шестерень, осей, втулок, синхронізаторів, муфт, валів коробок передач автомобілів та інших видів техніки. Для підвищення механічних властивостей сталі 15ХГН2ТА використовують хіміко-термічну обробку з подальшою термічною обробкою, що значно ускладнює та збільшує тривалість технологічного процесу виготовлення деталей.

Зразки для проведення досліджень виготовляли зі сталі 15ХГН2ТА в нормалізованому стані (механічні властивості: границя текучості  $\sigma_T = 75 \times 10^3$  МПа; тимчасовий опір  $\sigma_B = 95 \times 10^3$  МПа; відносне подовження  $\delta_5 = 11\%$ ; відносне звуження  $\psi = 55\%$ ; ударна в'язкість КСУ  $\alpha_H = 10 \times 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>). Хімічний склад сталі наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад (%) та твердість сталі 15ХГН2ТА

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	HB
0,13-0,18	0,17-0,37	0,7-1	0,7-1	1,4-1,8	0,03-0,09	269

Зразки для проведення досліджень зображено на рисунках 2.1, 2.2, 2.3.

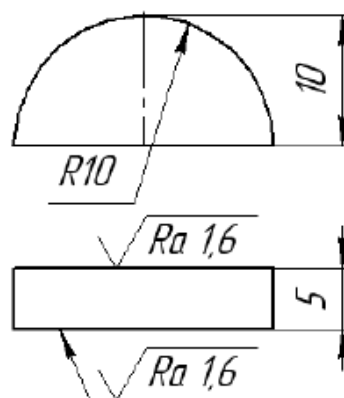


Рис. 2.1. Зразок для дослідження структури та властивостей модифікованих поверхонь після електроіскрової обробки

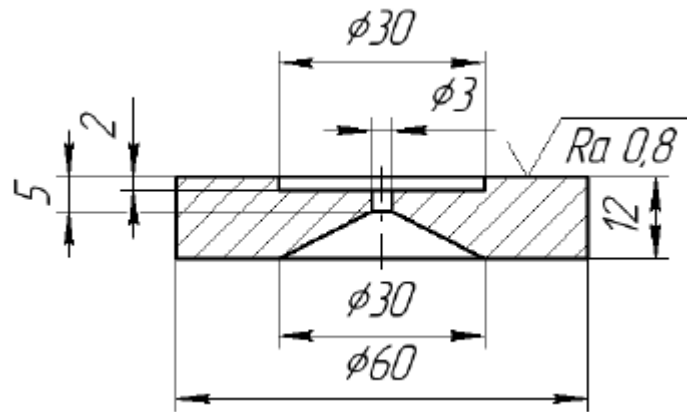


Рис. 2.2. Зразок для дослідження триботехнічних властивостей поверхонь металополімерних пар тертя після ЕІО

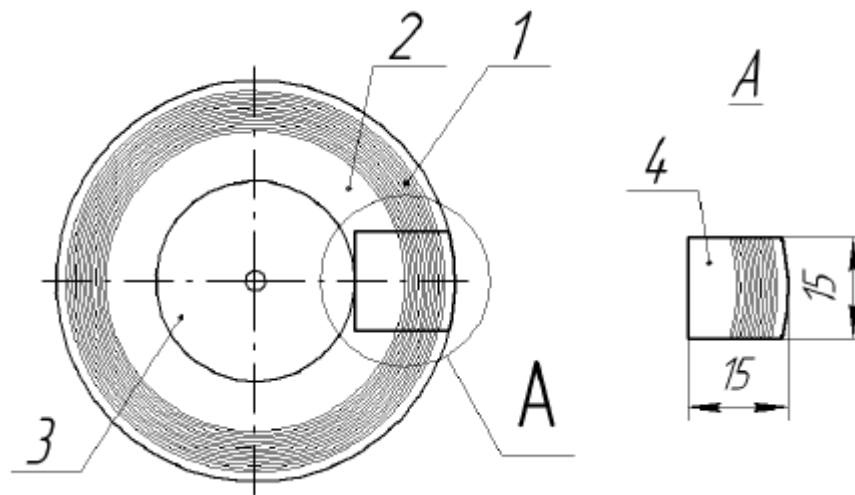


Рис. 2.3. Схема вирізки зразка для дослідження структури поверхонь, модифікованих ЕІО: 1 – доріжка тертя; 2 - ділянка поза доріжкою тертя; 3 – зразок для триботехнічних випробувань; 4 - зразок для дослідження структури модифікованих поверхонь

Електроіскрова обробка здійснювалася на установці ЕІЛ з ручним управлінням – ІМЕІ-02-2-ІМЕС та на механізованій установці ІМЕІ-1001-ІМЕС. Універсальна установка з ручним управлінням ІМЕІ-02-2-ІМЕС комплектується генератором імпульсів електричного струму, вібробудником та пристроями для закріплення деталей, що обробляються. Принципова схема монтажу легуючого електрода та вібробудника із зразком на установці з ручним керуванням показана на рисунку 2.4.

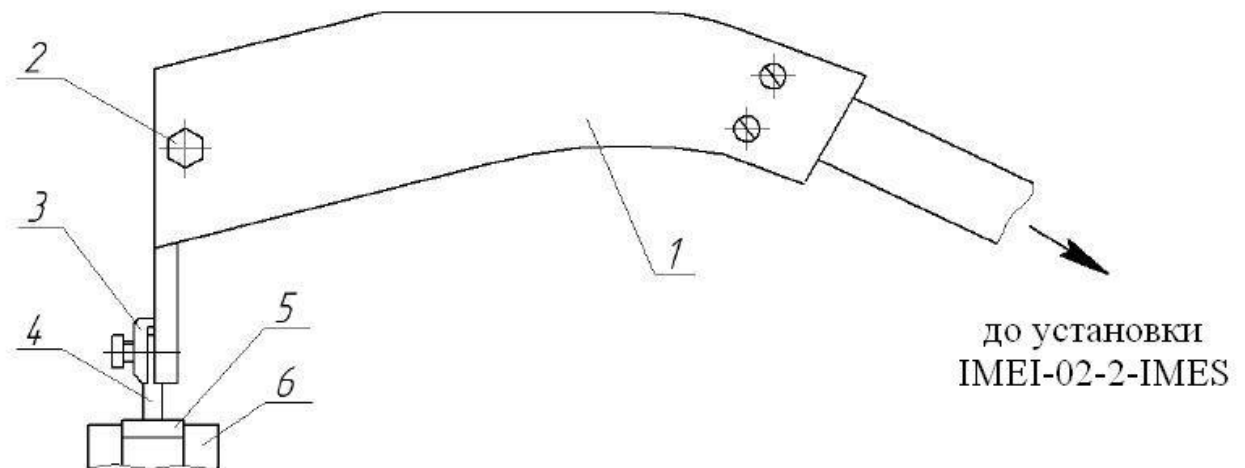


Рис. 2.4. Схема монтажу електрода та вібробудника із зразком на установці ЕІО з ручним керуванням: 1 – вібробудник; 2 – кріпильний гвинт; 3 – тримач електрода; 4 – легуючий електрод; 5 – зразок; 6 – лещата.

Спеціальна механізована установка ІМЕІ-1001-ІМЕС, призначена для ЕІО деталей типу тіл обертання та осьового (спірального) ріжучого інструменту, створена на базі токарного верстата ТВ-16 та складається з наступних блоків: генератор імпульсів електричного струму; механічний блок, що включає пристрої розміщення, кріплення та переміщення оброблюваної деталі та електрода – інструмента; електронний модуль, що забезпечує заданий міжелектродний проміжок. Принципова схема установки для механізованої ЕІО наведена на рисунку 2.5.

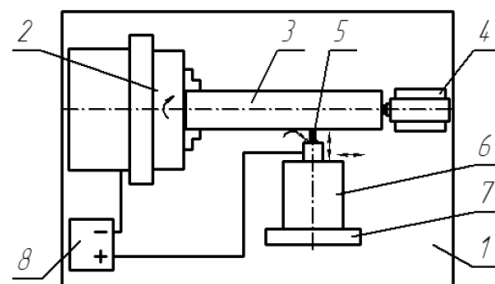


Рис. 2.5. Схема установки для механізованої ЕІО: 1 – база токарного верстата; 2 – ізолюваний кулачковий патрон; 3 – оброблювана деталь; 4 – ізолювана задня бабка; 5 – легуючий електрод; 6 – механізована головка із супортом верстата; 7 – слідкувальна система; 8 – генератор імпульсів.

Загальний вигляд та робоча зона механізованої установки ЕІО ІМЕІ-1001-ІМЕС показані на рисунках 2.6 та 2.7.



Рис. 2.6. Загальний вид механізованої установки ІМЕІ-1001-ІМЕС на базі токарного верстата

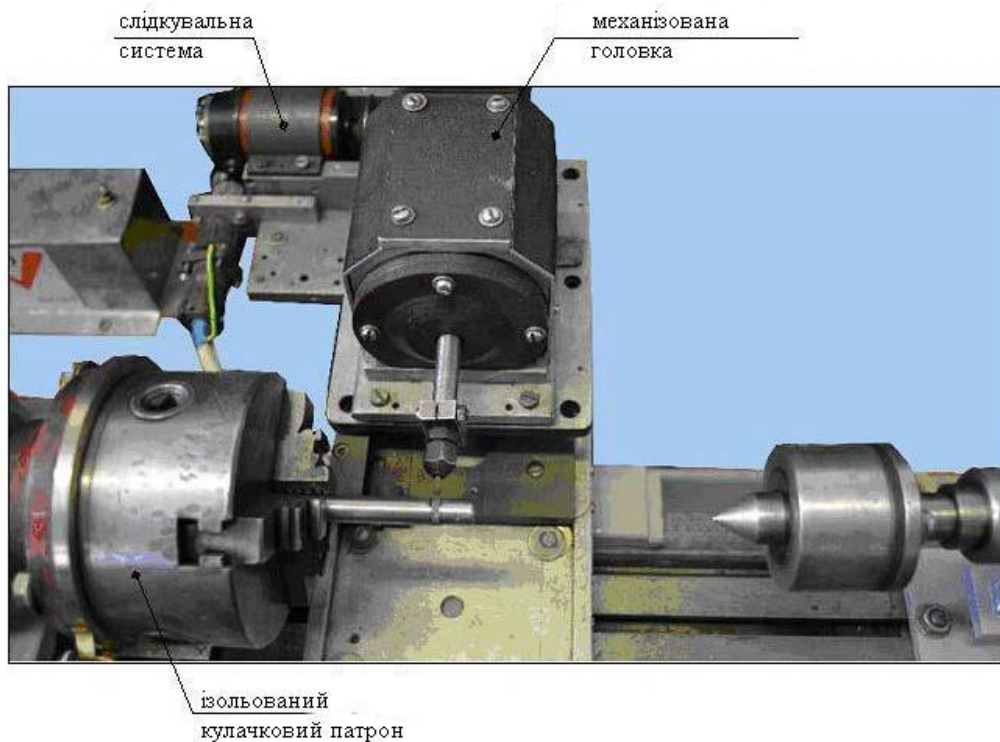


Рис. 2.7. Робоча зона механізованої установки ІМЕІ-1001-ІМЕС  
Технічні характеристики установки ІМЕІ-1001-ІМЕС наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики механізованої установки ІМЕІ-1001-ІМЕС

Характеристика	Значення
Споживана потужність, кВ×А	1,0
Джерело живлення: напруга, В частота, Гц	220 50
Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв	3
Кількість режимів обробки	75
Напруга на конденсаторах, В	40-80
Частота імпульсів, Гц	200-600
Тривалість імпульсу іскри, мкс	2-200
Значення середнього струму, А	0,1-5
Маса генератора імпульсів, кг	18
Швидкість обертання деталі, об/хв	0,5-7
Швидкість поздовжньої подачі, мм/хв	0,5-2,5
Режими роботи	ручний, напівавтоматичний

Методика підготовки та обробки зразків на установці ІМЕІ-1001-ІМЕС (ІМЕІ-02-2-ІМЕС) включає наступні операції:

1. Знежирення оброблюваної поверхні деталі (зразка) бензином або рідиною, що містить спирт.
2. Установка оброблюваної деталі (зразка) у патрон верстата (лещата).
3. Закріплення легуючого електрода (ЛЕ) у тримач віброзбудника або в механізовану головку, встановлену на супорті верстата.
4. Увімкнення генератора імпульсів та перевірка працездатності віброзбудника або механізованої головки за допомогою короткочасного торкання оброблюваної деталі (зразка).
5. Вибір та завдання необхідної частоти імпульсів віброзбудника або механізованої головки.
6. Вибір та завдання напруги в імпульсі та ємності конденсаторної батареї на генераторі імпульсів.
7. Електроіскрове оброблення поверхні на заданих режимах.

Поверхні сталевих зразків обробляли з різними електродами, що легують: стандартним електродом марки Т15К6; електродом ІМХ; електродом Ш2 з



мінеральною сировиною на основі шеєлітового концентрату. Вибір легуючих електродів проводився з урахуванням раніше проведених досліджень. Висока вартість і дефіцит вольфраму зумовили застосування безвольфрамового електроду Ш2 на основі карбіду титану з легуючими добавками і мінеральною сировиною, що містить вольфрам. Легуючий електрод ІМХ2 містить мікролеуючі елементи та самофлюсні добавки, що забезпечують при високих температурах захисну атмосферу, що перешкоджає утворенню оксидів. Хімічний склад застосовуваних електродів наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад ЛЕ для електроіскрової обробки

№ п/п	Марка ЛЕ	Хімічний склад, %
1	T15K6	TiC – 15, Co – 6, WC – 79
2	Ш2	TiC – 60, Ni-Cr-Al – 30, ШЛК (шеєлітовий концентрат CaWO <sub>4</sub> ) – 10
3	ІМХ2	WC-Co – 50, Ni-Cr-B-Si – 50

### Висновки по розділу

В другому розділі магістерської роботи представлено методику проведення досліджень та обладнання, яке використовувалося в процесі виконання досліджень

### РОЗДІЛ 3

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ

Згідно з методикою триботехнічні властивості структур, що формуються на сталевій основі при електроіскровій обробці, оцінювали за швидкістю зношування полімерних контрзразків при терті ковзання по модифікованій поверхні сталевих зразків. Сталеві зразки обробляли електродом ІМХ2. Цей електрод вибраний за результатами попередніх досліджень. Оцінку швидкості зношування проводили за величиною масового зношування полімерних контрзразків.

З метою наочного уявлення про вплив енергетичного рівня на зносостійкість (швидкість зношування) пари тертя за результатами випробувань було побудовано залежності  $J = f(E)$  (Рис. 3.1).

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що зі збільшенням енергії імпульсу при ЕІО сталевих зразків електродом ІМХ2 швидкість зношування полімерного контрзразка знижується в 12-13 рази. При цьому збільшення тривалості обробки сталевих зразків незначно впливає на швидкість зношування полімерних контрзразків (на  $\sim 3\%$ ). Також було показано, що швидкість зношування металополімерної пари тертя із зразками, модифікованими ЕІО, менше, ніж цей параметр у пари тертя із загартованим зразком, приблизно в 1,6-2 рази (табл. 3.1).

З метою оптимізації режимів ЕІО було розроблено та реалізовано план факторного експерименту  $N = 2^3 = 8$ . Відповідно до плану незалежними факторами були прийняті:  $X_1$  – анодно-катодна напруга, В;  $X_2$  - розрядна ємність конденсаторів, мкФ;  $X_3$  – тривалість обробки одиниці поверхні, хв/см<sup>2</sup>. Граничні значення вибиралися з результатів попередніх експериментів. Умови експерименту та отримані середні значення параметра оптимізації – швидкості зношування наведено у таблиці 3.1.

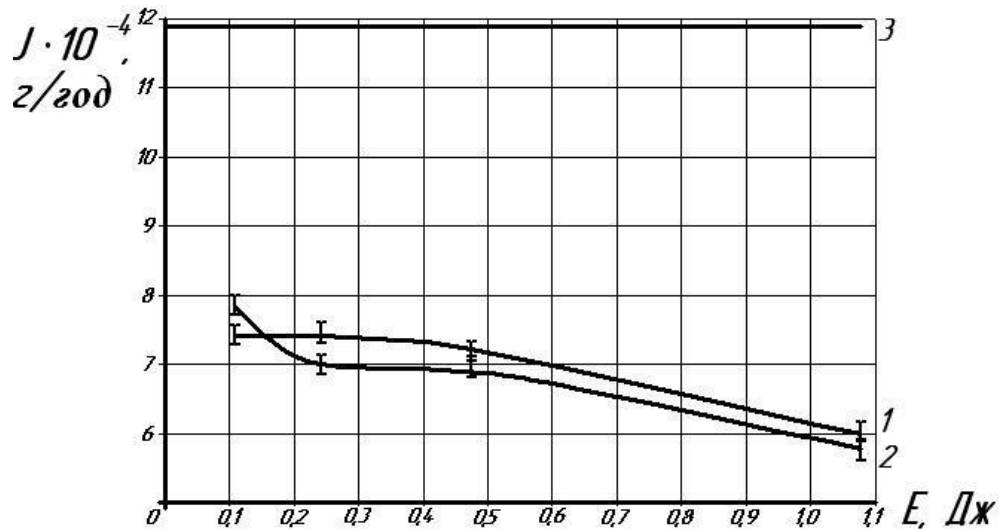


Рис. 3.1. Залежність швидкості зношування полімерних контрзразків від енергії імпульсу при ЕІО зразків із сталі 15ХГН2ТА: 1 - зразки з тривалістю ЕІО 4 хв/см<sup>2</sup>; 2 – зразки з тривалістю ЕІО 5 хв/см<sup>2</sup>; 3 – зразок загартований без ЕІО (табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Умови експерименту та середні значення швидкості зношування

№ досліджу	Технологічні режими (незалежні фактори)			Досліджуваний параметр оптимізації
	Анодно-катодна напруга U, В	Ємність конденсаторі в С, мкФ	Тривалість обробки t, хв/см <sup>2</sup>	Швидкість зношування J×10 <sup>-4</sup> , г/год
1	80	34	4	7,4
2	120	34	4	7,4
3	80	150	4	7,2
4	120	150	4	6
5	80	34	5	7,8
6	120	34	5	6,8
7	80	150	5	6,9
8	120	150	5	5,8
0	загартований (без ЕІО)			11,9

При обробці результатів експериментів було прийнято математичну модель як полінома другого порядку, враховує головні ефекти та ефекти взаємодії:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_{ij}, \quad (3.1)$$

Коефіцієнти рівняння регресії розраховані за експериментальними даними, наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти рівняння регресії

b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>12</sub>	b <sub>13</sub>	b <sub>23</sub>	b <sub>123</sub>
6,91	-0,41	-0,44	-0,09	-0,16	-0,11	-0,04	0,14

Для параметра оптимізації J – швидкості зношування, отримано рівняння регресії у кодових значеннях параметрів:

$$Y = 6,91 - 0,41X_1 - 0,44X_2 - 0,09X_3 - 0,16X_1X_2 - 0,11X_1X_3 - 0,04X_2X_3 + 0,14X_1X_2X_3 \quad (3.2)$$

Перевірка значимості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента показала, що при рівній значимості 0,05 коефіцієнти b<sub>3</sub>, b<sub>13</sub>, b<sub>23</sub>, b<sub>123</sub> незначні. Отже, остаточне рівняння регресії для параметра оптимізації Y має вигляд:

$$Y = 6,91 - 0,41X_1 - 0,44X_2 - 0,16X_1X_2 \quad (3.3)$$

Аналіз отриманого рівняння дозволяє зробити такі висновки про вплив технологічних режимів ЕІО на швидкість зношування. При збільшенні напруги X<sub>1</sub> та розрядної ємності конденсаторів X<sub>2</sub> швидкість зношування зменшується. Спільний вплив напруги та розрядної ємності також викликає зменшення швидкості зношування. Отже, зменшення швидкості зношування необхідно збільшувати розрядну ємність конденсаторів і анодно-катодну напругу. При цьому можна відзначити, що найбільший вплив на швидкість зношування має ємність конденсаторів X<sub>2</sub> установки ЕІО. Вплив анодно-катодної напруги X<sub>1</sub> трохи менше X<sub>2</sub>, а тривалість обробки X<sub>3</sub> мало впливає на швидкість зношування, так як коефіцієнт b<sub>3</sub> виявився незначним. Незначний вплив коефіцієнта b<sub>3</sub> на швидкість зношування в отриманому рівнянні регресії корелює з експериментальними залежностями (рис. 3.1) впливу енергії імпульсу на швидкість зношування за різної тривалості ЕІО сталевих зразків.

З метою визначення оптимальних значень технологічних режимів проведено оптимізаційне дослідження методом «крутого сходження». Цей метод передбачає рух градієнтом в область оптимуму.

Аналіз результатів першої серії дослідів показує, що найефективнішими енергетичними параметрами є анодно-катодна напруга та ємність конденсаторів установки ЕЮ. За цими параметрами обрано напрямок руху в область оптимуму. Рух у багатовимірному просторі виробляється дискретно, кроками. Для знаходження оптимуму використовували один із градієнтних методів оптимізації – метод «крутого сходження» (Бокса-Уілсона), у якому використовується градієнтний метод оптимізації у поєднанні з факторним експериментом для локального опису поверхні відгуку.

Відповідно до методу «крутого сходження», на першому етапі поверхня відгуку апроксимують поліноміальною моделлю першого порядку, на основі якої визначають напрямок руху по градієнту незалежних факторів у зону оптимуму. Потім шляхом постановки дослідів з урахуванням напрямку факторному просторі, обраного з допомогою градієнта, досягають майже стаціонарної області, тобто області оптимуму.

На рисунку 3.2 показана геометрична інтерпретація визначення напрямку руху за методом «крутого сходження» для функції типу  $y = f(x_1, x_2)$ .

Поверхню відгуку на контурах деякої точки, досить віддаленої від точки екстремуму, можна апроксимувати гіперплощиною:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (3.4)$$

Значення коефіцієнтів рівняння  $b_0$  та  $b_1$  отримано при обробці результатів експерименту, проведеного за планом повного факторного експерименту (табл. 3.1). Величини коефіцієнтів визначають нахили гіперплощини, тобто складові градієнти за відповідними координатними осями:

$$b_i = \frac{dy}{dx_i}, \quad (3.5)$$

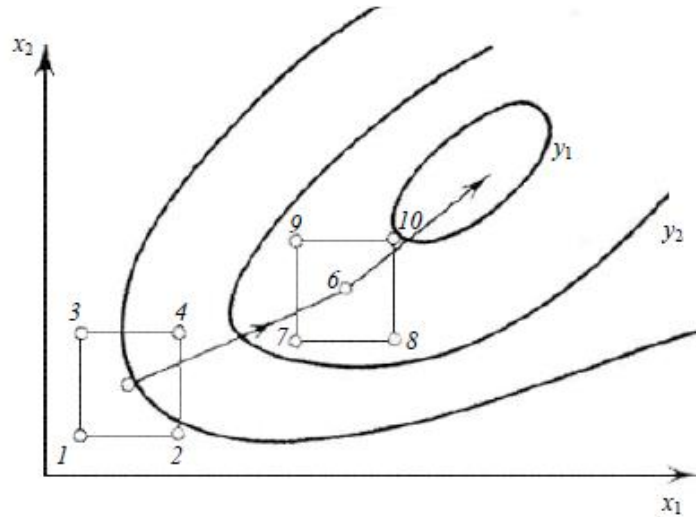


Рис. 3.2. Геометрична інтерпретація визначення напрямку руху в область оптимуму методом «крутого сходження»

Таким чином, завдання визначення найкоротшого шляху до екстремуму функції відгуку полягає в знаходженні розташованої на гіперплощині відрізка лінії  $l$ , що виходить з початкової точки  $i$  і забезпечує швидку зміну функції відгуку:

$$\frac{dy}{dl} \rightarrow ma, \quad (3.6)$$

Іншими словами, зміна функції відгуку буде найбільшою у напрямку градієнта функції:

$$\left(\frac{dy}{dl}\right)_m = |q_a y_x| = r \sqrt{a\left(\frac{dy}{dx_1}\right)^2 + d\left(\frac{dy}{dx_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{dy}{dx_k}\right)^2}, \quad (3.7)$$

Якщо фактори  $X_i$  змінювати пропорційно значенням відповідних їм коефіцієнтів, то буде забезпечено рух уздовж лінії крутого сходження. Значення факторів оптимізаційного дослідження наведено у таблиці 3.3.

З метою руху по лінії «крутого сходження» визначали крок  $z$  руху по кожному фактору та розраховували величину  $\Delta X$ :

$$z = b_i \Delta X_i \lambda, \quad (3.8)$$

$$\Delta X_i = \frac{(x_{max} - x_{min})}{2}, \quad (3.9)$$

Таблиця 3.3 – Значення факторів оптимізаційного дослідження

Параметри дослідження	Незалежні фактори	
	X <sub>1</sub> Анодно-катодна напруга, В	X <sub>2</sub> Розрядна ємність конденсаторів, мкФ
Коефіцієнти рівняння, b <sub>i</sub>	-0,41	-0,44
Рівність b <sub>i</sub> ΔX <sub>i</sub>	8,2	25,52
Крок (округлений), z	8	23

Далі проводили досліди «уявні», які полягали у обчисленні значень функції відгуку в точках факторного простору, що лежать на шляху до оптимуму, тобто здійснювали уявний рух до оптимуму. У таблиці 3.4 представлені результати руху лінією «крутого сходження», тобто результати розрахунків параметра оптимізації – швидкості зношування. Для зручності виконання розрахунків кодові значення незалежних факторів були переведені в натуральні шляхом декодування, а значення параметра оптимізації у «уявних» дослідах визначали за формулою:

$$J = (8,39 - 0,0078U + 0,0062C - 0,000138UC) \times 10^{-4} \text{г/год}, \quad (3.10)$$

де U – анодно-катодна напруга, В;

C – розрядна ємність конденсаторів, мкф.

Таблиця 3.4 – Умови та результати оптимізаційного дослідження при русі по лінії «крутого сходження»

Досліди на лінії крутого сходження	Незалежні фактори		Параметр оптимізації J×10 <sup>-4</sup> , г/год
	X <sub>1</sub> Анодно-катодна напруга, В	X <sub>2</sub> Розрядна ємність конденсаторів, мкФ	
1) Уявний	108	115	6,55
2) Реальний	116	138	6,13
3) Реальний	124	161	5,67
4) Реальний	132	184	5,15
5) Уявний	140	207	4,59
6) Уявний	148	230	3,97
7) Уявний	156	253	5,44

«Круте сходження» було припинено при ємності  $C \approx 253$  мкФ у уявному досліді №7. Як видно з таблиці 3.4, параметр оптимізації (швидкість зношування) у досліді №7 починає зростати при подальшому збільшенні напруги. Мінімальне значення параметра оптимізації отримано в 6-му (уявному) досліді, а в 7-му (уявному) досліді швидкість зношування вже зростає. Це дає підставу вважати, що область оптимуму досягнуто, і подальше дослідження слід припинити.

Отже, для досягнення мінімальної швидкості зношування полімерного контрзразка при терті без мастила по модифікованій поверхні сталі 15ХГН2ТА оптимальними режимами електроіскрової обробки є режими: напруга  $U \approx 145-150$  В, ємність конденсаторів  $C \approx 225-230$  мкФ.

### **Висновки по розділу**

Таким чином, вищезазначений технологічний режим доцільно рекомендувати для електроіскрової обробки деталей металополімерних пар тертя як оптимальний. Отримуване при цьому значення швидкості зношування при одночасному збільшенні мікротвердості сталі є мінімальним для заданих умов тертя і забезпечує значне підвищення зносостійкості металополімерних вузлів тертя з металевими деталями модифікованими методом ЕІО.



## ВИСНОВКИ

На основі критичного аналізу переваг та недоліків відомих методів поверхневого зміцнення деталей з метою підвищення їх механічних та триботехнічних властивостей встановлено, що одним з найбільш перспективних методів є електроіскрова обробка, при якій потоками частинок високої щільності енергії забезпечується створення поверхневих структур з підвищеними механічними та триботехнічними властивостями при значній простоті технологічного обладнання та економічності процесу.

Встановлено, що товщина покриття залежить від хімічного складу матеріалу легуючого електрода та енергетичних режимів ЕІО: найбільша товщина покриття утворюється при обробці електродом ІМХ2, що в 4 рази більше, ніж при обробці серійним електродом Т15К6; підвищення енергетичних режимів ЕІО призводить до збільшення товщини покриття незалежно від матеріалу легуючого електрода, що дозволяє рекомендувати ЕІО електродами Т15К6, ІМХ2, Ш2 для підвищення зносостійкості та відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин.

Методами планування факторного експерименту та статистичної обробки отриманих даних досліджено вплив режимів ЕІО сталевих поверхонь на зносостійкість металополімерної трибосистеми, а також встановлені оптимальні режими обробки: напруга  $U = 145-150$  В, ємність конденсаторів  $C = 225-230$  мкФ, тривалість обробки  $t = 4$  хв/см<sup>2</sup>, що забезпечують найбільше зниження швидкості зношування полімерного контртіла та рекомендовані при розробці технологічних процесів електроіскрової обробки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баранчиков В. И. Обработка специальных материалов в машиностроении : справочник Москва : Машиностроение, 2002. 439 с.
2. Залого В. А. Курс лекций "Инструментальные материалы для лезвийных инструментов": учеб. пос. Сумы : СумГУ, 2007. 234 с.
3. Григорьев С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол : ТНТ, 2011. 327 с.
4. Равська Н.С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці: Навчальний посібник. Житомир : ЖІТІ, 2000. 167 с.
5. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. Москва : Машиностроение. 1982. 567 с.
6. Новиков Н. В. Инструменты из сверхтвердых материалов. Москва : Машиностроение. 2005. 258 с.
7. Якимов А. В. Теплофизика процессов механической обработки: учеб. пособие. Київ : Либідь, 1991. 179 с.
8. Воронцов А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 231 с.
9. Кіндрачук М.В. Трибологія: підручник. Вид-во НАУ «НАУ – друк», 2009. 345 с.
10. Лопата Л. А. Расчет параметров дискретной структуры покрытий на режущем инструменте и деталях машин. Вестник Полоцкого государственного университета, 2005. С. 18-24.
11. Харламов Ю. А. Методы модифицирования поверхностных слоев деталей машин и инструментов. Сучасне машинобудування, 2000. №3-4(5-6). С. 112-118.
12. Зенин Б. С. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 431 с.

13. Корбут Е. В. Современные методы поверхностного упрочнения инструментов. Проблемы тертя та зношування, 2010. Вип. 54. С. 54-59.

14. Лабунець В. Ф. Тенденції створення захисних структур триботехнічного призначення. Проблемы тертя та зношування, 2006. Вип. 45. С. 32-37.