

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Поліпшення зносостійкості вузлів тертя сільськогосподарських
машин електроіскровою обробкою»

КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_21
СИДОРЧУК Олександр

Керівник: докт. техн. наук, професор
САЙЧУК Олександр

Полтава – 2022 року

ВСТУП

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

Отже, підвищення зносостійкості деталей трибосистеми є актуальною науково-технічною задачею сучасного машинобудування. Ця задача відноситься до числа найбільш складних у науці і техніці, оскільки вимагає аналізу складних взаємозалежних процесів у зоні тертя, які можна вивчити і описати тільки на основі фундаментальних положень фізики, хімії, матеріалознавства.

Протягом останніх десятиліть розроблені різні методи підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя. Найбільшу актуальність набувають технології отримання зносостійких і зміцнених покриттів високоенергетичною обробкою. Кожен з відомих у даний час методів має свої переваги і недоліки, що обмежують галузь їх застосування. Тому розробка ефективного, досить простого для освоєння у промисловому виробництві та економічного методу підвищення зносостійкості вузлів тертя сільськогосподарських машин залишається актуальною науковою і практичною задачею.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зміцнення поверхонь деталей машин і технологічного обладнання широко використовується у галузі сільськогосподарського машинобудування. У промисловості залежно від умов експлуатації виробів застосовуються добре відпрацьовані та відносно нові методи поверхневого зміцнення сталей і сплавів, у тому числі поверхневе пластичне деформування, хіміко-термічна обробка, мікродугове оксидування, газополуменеве та іонно-плазмове напилення та ін. Нижче розглядається фізична основа і проводиться порівняльний аналіз названих та інших методів, що забезпечують зміцнення поверхневих шарів деталей машин і підвищення їх триботехнічних властивостей.

1.1 Поверхневе пластичне деформування

Поверхневе пластичне деформування (ППД) як метод зміцнюючої обробки деталей являє собою сукупність технологічних процесів, застосування яких дозволяє знизити шорсткість поверхні, зміцнити поверхневий шар за рахунок наклепу, нанести спеціальний рельєф і підвищити зносостійкість деталі [1].

Фізичні закономірності деформації поверхневих шарів досить складні та відмінні від кінематики макродеформації в об'ємних шарах. У цілому процес являє собою взаємне переміщення частинок тіла, що деформується. У результаті переміщення частинок у поверхневому шарі відбуваються складні фізико-механічні процеси, що призводять до істотних змін структури і властивостей поверхневого шару [2]. Завдяки цьому ППД забезпечує підвищення зносостійкості, опору втоми, контактної витривалості та інших експлуатаційних властивостей оброблюваних деталей на 20-50% [3].

Для традиційних методів зміцнення ППД, таких як накочування, розкочування, і навіть вигладжування, характерні значні деформуючі зусилля, що обмежує їх застосування при обробці нежорстких і тонкостінних деталей внаслідок

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виникаючих геометричних похибок. Тому, введення в зону обробки ультразвукових коливань сприяє зниженню опору пластичного деформування і сил тертя на контактних поверхнях, що в підсумку призводить до значного зниження статичних зусиль деформування. Зазначені особливості процесу зумовили виникнення нового напрямку ППД – оздоблювально-зміцнювальної обробки інструментом, що коливається із ультразвуковою частотою.

Ультразвукова зміцнювальна обробка (УЗО) здійснюється шляхом механічного наклепу поверхні виробу твердим інструментом, що коливається з ультразвуковою частотою ($f = 18-44$ кГц). За рахунок ущільнення при пластичному деформуванні поверхні твердість поверхневого шару значно зростає при одночасному зменшенні шорсткості поверхні. Основним фактором, що визначає перебіг процесу, є імпульсний вплив інструмента на поверхню деталі, що зміцнюється.

Цей метод застосовують для формоутворення зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей з тугоплавких металів, твердих сплавів і твердих крихких матеріалів (кераміка, скло, кварц та ін.) [4]. Точність УЗО може досягати 7-6-го квалітетів, шорсткість поверхні $Ra\ 0,1-0,4$ мкм. Внаслідок УЗО зростає твердість, зносостійкість і довговічність оброблених деталей.

Механічні методи поверхневого зміцнення дозволяють створити сприятливий для фрикційної взаємодії поверхневий рельєф і знизити висоту мікронерівностей оброблених поверхонь. Процес поверхневого пластичного деформування створює у поверхневому шарі значний рівень залишкових деформацій і напружень стиску. Однак ППД вичерпує запас пластичності й здатності поверхневого шару до подальшого накопичення деформацій, що виникають при терті, що сприяє прискоренню втомного руйнування (зношування) поверхневого шару.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Хіміко-термічна обробка

Хіміко-термічна обробка (ХТО) широко застосовується у промисловості для підвищення твердості, зносостійкості, опору втоми і контактної витривалості, а також для захисту від електрохімічної і газової корозії.

Фізичною основою методу є дифузійне насичення сталі різними хімічними елементами або їх сполуками з наступним загартуванням і відпусканням. ХТО проводиться в твердих, рідких і газових середовищах. За цільовим призначенням вона ділиться на дві основні групи: для підвищення зносостійкості деталей (цементация, азотування, борування і т. д.); для покращення антифрикційних протизадирних властивостей металів (сульфідування, сульфоціанування, селенірування тощо).

Широке поширення в промисловості отримав процес цементації низьковуглецевих сталей. Концентрація вуглецю в поверхневому шарі товщиною 0,15-2,0 мм після цементації становить 0,8–1,0%. Твердість поверхні після цементації, гартування і низького відпускання знаходиться в межах HRC 52-60. У результаті спільної дії температурних і структурних напружень після гартування в цементованому шарі виникають напруження стиску, а в осерді – напруження розтягу. Залишкові напруження викликають деформацію виробів, знижують міцність деталі в умовах експлуатації. Для підвищення геометричної точності деталей і точності взаємного розташування спряжених поверхонь здійснюється оздоблювальна обробка цементованих сталей.

В роботі [5] були досліджені структура і властивості нітроцементованих шарів із високим вмістом азоту (до 0,90%). Нітроцементації піддавалися зразки з конструкційних сталей 25ХГТ і 20ХН3А в атмосфері, що складається з еногазу, аміаку та природного газу з метою підвищення комплексу механічних властивостей сталі.

Дослідження хімічного складу нітроцементованих шарів показало, що вміст вуглецю і азоту в дифузійних шарах змінюється в широких межах з варіюванням

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

витрат природного газу та аміаку. Різноманітний і розподіл вуглецю та азоту по товщині дифузійного шару.

Дослідження структури шарів, сформованих в експериментальних режимах, виявило наявність чотирьох зон, що відрізняє її від структури шарів, отриманої при класичній нітроцементзації (поверхнева зона, основна зона і перехідний шар). Основна відмінність спостерігається в зоні, розташованій між основною зоною і перехідною частиною шару. У структурі цієї зони виявлено дрібнозернистий мартенсит без ознак залишкового аустеніту і трооститу.

Спільний аналіз фізико-хімічних і фізико-механічних характеристик нітроцементованих шарів показав, що найбільшу мікротвердість і мікропластичність мають дифузійні шари з високим вмістом азоту в твердому розчині.

В роботі [6] проведено пошарове дослідження тонкої структури сталі 20Х3МВФ-Ш, підданої нітроцементзації з наступною термічною обробкою. Показано, що в залежності від виду термічної обробки змінюється фазовий склад і щільність дислокацій по глибині нітроцементованого шару. У мікроструктурі мартенситу загартованого нітроцементованого шару спостерігається висока щільність дислокацій, у той час як щільність дислокацій у мартенситі осердя і прилеглої до нього зони шару істотно нижче. Залишковий аустеніт характеризується значно меншою ступінню деформаційного зміцнення, ніж мартенсит, що виражається в істотно меншій величині щільності дислокацій і мікронапружень. Обробка холодом призводить до додаткового перетворення значних об'ємів залишкового аустеніту в мартенсит, що викликає зростання щільності дислокацій у мартенситі.

В роботах [7, 8, 9] досліджувалися процеси азотування як в «чистому» виді, так і в різних комбінаціях з іншими технологічними прийомами, такими як оксидування в газовому середовищі (оксиазотування або нітрооксидування). Викладені результати досліджень щодо оптимізації структури та фазового складу оксиазотованого шару, що забезпечує високу зносостійкість і корозійну стійкість

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробів з конструкційних сталей (штоки гідроциліндрів, шпинделі, клапани та ін.). На основі термодинамічного аналізу показано можливості оптимізації структури шару та інтенсифікації процесів.

Комбінування традиційної термічної і хіміко-термічної обробки з індукційним, електроконтактним і лазерним нагріванням підвищує експлуатаційні властивості деталей. При швидкісному загартуванні усуваються окислення і знеуглеводнення поверхні деталей, зменшуються термічні деформації, що дозволяє зміцнювати остаточно оброблені деталі без подальшого шліфування.

У роботах [10, 11] зразки зі сталі 40X нагрівали пропусканням струму зі швидкістю 50 К/с до температури 1020-1270 К і гартували у воді. Потім загартовані зразки піддавали іонно-променевому азотуванню (670, 720, 770 К). Результати досліджень показали, що із збільшенням температури нагрівання підвищується твердість зразків від 21 HRC у початковому стані до 55-57 HRC. При температурах азотування 670-720 К знижується інтенсивність зношування сталі до 2 разів порівняно з вихідним матеріалом. Однак, іонна обробка при температурі 770 К погіршує зносостійкість поверхні, що обумовлено виділенням частинок γ -Fe₄N з низькою термічною стабільністю. При терті модифікованої сталі 40X в місцях теплових спалахів відбувається дисоціація частинок γ -Fe₄N, що викликає знеміцнення поверхневого шару, локалізацію в ньому деформацій і зниження зносостійкості.

В роботі [12] розглянута технологія низькотемпературного азотування легованих сталей з різним вмістом хрому через наноксидний бар'єр, що полягає в послідовній обробці виробів у розділених атмосферах аміаку і повітря. Встановлено, що в залежності від тривалості насичення, на поверхні виробів формується модифіковане двошарове покриття з оксидної плівки нанорозмірної товщини, під якою розташовується зона внутрішнього азотування, або тришарове – з додатковою поверхневою зоною нанопорошка нітридів заліза, причому кожен з цих шарів володіє особливими функціональними властивостями.

Таким чином, методи ХТО дозволяють істотно підвищити фізико-механічні

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристики оброблюваних матеріалів. Однак більшість цих методів вимагає значних витрат часу для дифузійного насичення поверхневих шарів деталей. Для отримання модифікованого шару глибиною близько 2 мм необхідно кілька десятків годин. Для остаточного формування необхідних властивостей проводиться термічна обробка (ТО) у вигляді гартування та наступного відпускання. В процесі ТО на поверхні утворюються дефекти у вигляді окалини, а значні внутрішні напруження призводять до короблення поверхонь і зародження тріщин [13]. Крім того, після ХТО потрібне проведення опоряджувальних операцій з метою усунення дефектів, що виникли. З-за високої твердості поверхневих шарів доводиться застосовувати абразивну обробку, в результаті якої в тонкому поверхневому шарі формуються несприятливі схеми внутрішніх залишкових напружень розтягу, що сприяють зародженню мікротріщин у процесі фрикційної взаємодії і зниження зносостійкості матеріалу.

1.3 Методи створення зміцнюючих зносостійких покриттів

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

Поряд з традиційними способами підвищення зносостійкості різального інструменту та деталей машин електроосадженням застосовують мікродугове оксидування (МДО) [14, 15, 16]. Даний метод дозволяє формувати на різних металах (Al, Ti, Zr, Nb і ін.) анодні шари, які містять оксиди основного металу, так

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і оксиди і з'єднання компонентів електроліту. Однак технологія МДО не дозволяє отримувати однакову зносостійкість по товщині зміцнених оксидних шарів. При наближенні до поверхневих шарів їх твердість знижується, що сприяє більш інтенсивному зношуванню деталей, що сполучаються в умовах експлуатації.

В роботі [15] розглянуто ефективні способи підвищення зносостійкості композиційних матеріалів на основі титану і цирконію методом МДО. Показано, що варіюючи параметри МДО (щільність струму, час обробки, склад електроліту), можна змінювати коефіцієнт тертя і зносостійкість покриттів в залежності від призначення виробу [16].

Зносостійкість оксидних покриттів, сформованих у силікатно-лужному електроліті з перманганатом калію на титані BT1-0 і цирконії E125 з подальшою термічною обробкою, зростає у 8-11 разів. Авторами [15] встановлено, що в залежності від параметрів МДО, коефіцієнт тертя пари виріб-контртіло знижується в 2,5-3 рази у порівнянні зі зразками без оксидного шару і становить 0,3-0,35. Продукти зносу оксидного шару являють собою дрібнодисперсний порошок (SiO_2), що виконує функцію сухого змащення, що дозволяє відмовитися в ряді випадків від традиційних змащень.

У роботі [17] досліджено покриття на основі олова і міді, отримані електрохімічним осадженням на підкладці із бронзи БрОС8-12 і міді марки М1. Застосування досліджуваних покриттів дозволяє знизити знос при нанесенні на бронзу в 1,6-14 разів, при нанесенні на мідь – в 5-49 разів, при цьому істотно знижується інтенсивність зношування. Отримані антифрикційні покриття рекомендовані для застосування в технології виготовлення підшипників ковзання.

Покриття можуть бути утворені також напиленням: газополуменевим, плазмовим, детонаційними та іншими видами. Сутність зміцнення і відновлення газополуменевим напиленням (ГПН) полягає в розплавленні порошкових і дротяних матеріалів газовим полум'ям і розпиленні їх струменем стисненого повітря або газу [18, 19, 20, 21].

У роботі [19] досліджені триботехнічні властивості покриттів, отриманих

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ГПН порошкових і дрітчастих матеріалів. Результати досліджень показали можливість застосування технології ГПН для відновлення деталей вузлів тертя ковзання і при виготовленні біметалевих вкладишів зі сталеву основою натомість цільнобронзових.

В даний час широке застосування знайшли плазмові технології – осадження розплавленого в плазмовому струмені порошку на поверхню металів і сплавів. Плазмою називають газ, що знаходиться в сильно іонізованому стані, під впливом різних факторів: температури, електричного або високочастотного розряду, детонації. Робоча температура плазмового струменя становить 7000–15000⁰С [22]. При плазмовому напиленні плазма утворюється пропусканням газу (аргон, азот, водень, гелій), який збуджується між двома електродами.

Процес плазмового напилення полягає в бомбардуванні оброблюваної поверхні частинками розплавленого присадного матеріалу [23, 24, 25]. Для створення високоміцних захисних покриттів використовуються металеві, металокерамічні (на основі твердих сплавів WC-Co, Cr₃C₂-Ni і ін.), керамічні порошки (Al₂O₃, Cr₂O₃ та ін.). Таким чином, можна отримати високолеговані композитні шари за рахунок швидкого загартування з розплавленого стану, насичення з газового середовища азотом і вуглецем, тобто шляхом легування (перемішування в рідкій фазі з тугоплавкими металами). Іншим способом підвищення механічних властивостей є використання тільки плазмового струменя (без порошку) для оплавлення поверхневого шару деталі (плазмове гартування) [26, 27].

Обробка плазмовою дугою з енергією 0,4 МДж/м дозволяє отримати в поверхневому шарі сталі 20Х13 мартенсит зі значною часткою (30-50%) залишкового аустеніту [24]. Твердість поверхневого шару при цьому становить 650-700 НВ, глибина зміцненої зони – 0,8 мм. На гранях зразка формували області поверхневого зміцнення двома послідовними проходами плазмової дуги з перекриттям локальних зон попереднього загартування на ≈ 30% їх ширини. Зони відпускання із дисперсною структурою і зниженою

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

твердістю слугують бар'єром на шляху поширення тріщин, викликаючи їх тимчасову зупинку. Періодичне чергування твердих і пластичних прошарків у структурі робочої поверхні дозволяє ефективно збільшити довговічність деталей, які працюють в умовах динамічних і термомеханічних навантажень.

У роботі [28] були досліджені мікротвердість, фазовий і елементний склад, щільність і 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, передусім, тиском азоту та температурою підкладки (енергією частинок, що осаджуються) і залежить від числа шарів і загальної товщини [29]. Ці параметри обумовлюють відповідний фазовий склад і дисперсність утвореної структури, що і визначає основні фізико-механічні властивості покриттів.

Тонкі покриття [28] товщиною 5-12 мкм на основі карбонітрида титану, осаджені на зразках зі сталі 12X18H10T мають колір від золотавого до темно-синього з різною адгезією аж до можливого відшаровування. Виявлена певна кореляція мікротвердості, параметрів атомно-кристалічної структури, щільності, обсадженої маси і розмірів крапельної складової плазми.

Детонаційне напилення – це процес нанесення покриттів на оброблювану поверхню деталі розпиленням порошкоподібного матеріалу продуктами згоряння, що виникають в результаті спрямованого вибуху газової суміші. Прискорюючись продуктами згоряння, частинки порошку нагріваються і при динамічній взаємодії (удар) з поверхнею деталі утворюють на ній високощільне покриття [30, 31, 32, 33].

В роботі [31] досліджено формування детонаційних покриттів зі сплаву Ti-Al-V. Зміною складу газового середовища в процесі напилення, були отримані композиційні покриття з різними фазовими складами і властивостями. В якості горючого газу застосовувалася суміш ацетилену з киснем. Застосування аргону для транспортування порошку в зону горючої газової суміші призводить до

формування покриття з фізично безперервної інтерметалідної матриці та ізолюваних включень боридів титану. При використанні повітря фазовий склад покриття доповнюється домішками оксидів і оксинітриду, що призводить до зростання його твердості. Використання азоту призводить до утворення поверхневого шару, основою якого є суміш інтерметалідних та нітридних фаз TiN , AlN , з включеннями боридів, а також Al та Ti .

Розглянуті методи формування функціональних покриттів, незважаючи на незаперечні переваги, мають ряд істотних недоліків. Відносно невисокі швидкості напилюваних частинок і великий вміст окислів у покриттях, що формуються газополуменевим методом, значно знижує їх якість. Недоліками методу плазмового напилення є: низька міцність зчеплення з основою, висока шпаринність, нагрівання і короблення оброблюваних деталей, висока енергоємність процесу, значний рівень залишкових напружень, що виникають у покритті. Широке застосування плазмового методу напилення стримується не тільки високою вартістю матеріалів для нанесення, але і зниженням міцності покриттів із зростанням їх товщини, так як для успішної експлуатації покриття повинне володіти достатньою міцністю зчеплення з основою. До недоліків детонаційного напилення відносяться: високий рівень шуму при роботі установки, висока вартість застосовуваного устаткування.

Загальним недоліком покриттів незалежно від виду і способу нанесення є або слабе зчеплення з основою, що здійснюється лише за рахунок адгезійних сил, або мала товщина покриття і недостатня його зносостійкість.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуті відомі методи поверхневого зміцнення деталей з метою підвищення механічних і триботехнічних властивостей, у тому числі відносно нові методи, не відповідають повною мірою сучасним вимогам до ефективності, універсальності та економічності технологічних процесів.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Підвищення вимог до поверхневої міцності і зносостійкості деталей вузлів тертя машин призводить до необхідності вдосконалення відомих і розробки нових високоефективних технологічних методів поверхневого зміцнення конструкційних матеріалів.

Отже, **мета дослідження** – встановлення закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці методом електроіскрової обробки, що забезпечують збільшення загального терміну експлуатації. **Об'єктом** розробки є процес підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя сільськогосподарських машин, а **предметом** – оптимальні технологічні параметри електроіскрової обробки.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1. Провести аналіз відомих методів поверхневого зміцнення конструкційних сталей і сплавів, які забезпечують модифікацію їх структури, підвищення механічних і триботехнічних властивостей, і визначити напрямок досліджень у роботі.

2. Дослідити залежності мікротвердості і триботехнічних властивостей покриттів від складу матеріалу легуючого електрода і енергетичних режимів електроіскрової обробки.

3. Провести оптимізаційне дослідження режимів ЕІО і розробити практичні рекомендації щодо призначення оптимальних технологічних режимів електроіскрової обробки сталі 15ХГН2ТА, що забезпечують максимально високу зносостійкість металополімерних пар тертя.

4. Надати рекомендації щодо практичної реалізації розробок.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Високоенергетичні методи зміцнення

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

Лазерні технології, що займають особливе місце серед високоенергетичних методів обробки металевих поверхонь, що забезпечують значне зміцнення і підвищення зносостійкості деталей [34, 35, 36]. Лазерна обробка дозволяє цілеспрямовано змінити структурно-фазовий стан та елементний склад поверхневих шарів шляхом подальшої імпульсної термообробки, що забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей матеріалів. Поверхні, піддані лазерному зміцненню, не вимагають подальшої механічної обробки, при цьому зносостійкість деталей трибосистем може бути підвищена до 5 разів [35].

Впровадження методів лазерного зміцнення обумовлюється наявністю серійного високопродуктивного лазерного обладнання як імпульсного, так і безперервної дії, високою технологічністю процесу, значною номенклатурою оброблюваних деталей, що потребують локального зміцнення, можливістю отримання заданого комплексу фізико-механічних властивостей оброблюваних поверхонь за рахунок їх модифікування різними елементами при лазерному нагріванні [36].

У процесі лазерного модифікування розплавляється ділянка поверхні металу разом із легуючими елементами, попередньо нанесеними на оброблювану ділянку, що дозволяє в локальному обсязі отримати модифікований сплав з необхідними експлуатаційними властивостями [37]. Результати експериментальних досліджень структури і властивостей поверхневих шарів після лазерної обробки з різними

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

легуючими елементами, показали, що раціональний вибір способу нанесення і хімічного складу покриття дозволяє підвищити мікротвердість опромінених робочих зон деталей на 30-50%, зносостійкість в 2-3 рази у порівнянні з об'ємно-загартованими сталями.

В роботі [38] досліджували вплив лазерного зміцнення на коефіцієнт тертя ковзання і інтенсивність зношування сталевих зразків. Після гартування і високого відпускання зразки зі сталі 40X зміцнювались при потужності випромінювання 1,2-1,5 кВт. На зразках формувалися доріжки загартування таким чином, щоб забезпечити зміцнення поверхні тертя на 25, 40, 50, 60, 80, 100%. В результаті проведених випробувань встановлено, що на зносостійкість зразків істотний вплив справляє співвідношення зміцненої і незміцненої лазерним променем поверхонь тертя. При 50%-му зміцненні поверхні тертя сталевих зразків зносостійкість збільшується в середньому в 2,5 рази, а при 100% – у 3,7 рази порівняно з незміцненим зразком.

Результати досліджень структури та мікротвердості чавуну марок СЧ25 і ВЧ40 після гартування твердотілими лазерами наведено в роботі [39]. Мікротвердість в зоні лазерного гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури склала 600-720 НВ і 600-750 НВ відповідно. Загальна глибина зміцненого шару складає 0,15-0,25 мм, що задовольняє технічним вимогам (глибина гартування робочих поверхонь не менше 0,13 мм).

В роботі [40] досліджували вплив інертного газу на хімічний склад, структуру та властивості покриттів з диселеніду молібдену (MoSe_2), створюваних імпульсним лазерним осадженням при різних тисках аргону. Вибір оптимального тиску газу при осадженні дозволяє знизити коефіцієнт тертя з таким покриттям приблизно в 2 рази в порівнянні з покриттями, отриманими осадженням у вакуумі. Встановлено [41], 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 тертя деталей.

Широке застосування лазерних технологій стримується негативним впливом на експлуатаційні властивості деталей великого перепаду внутрішніх напружень на границі зони лазерного впливу з матрицею [42]. Перепад напружень можна зменшити подальшим нагріванням, який призводить до зниження твердості отриманих покриттів, що зменшує ефективність лазерної обробки. Отже, необхідно використовувати комбіновані методи поверхневого зміцнення із застосуванням лазерного нагріву деталей.

Одним з відносно нових методів поліпшення експлуатаційних властивостей деталей є електронно-променева обробка (ЕПО). При впливі 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 і випаровуванню залежно від умов і режимів обробки. Поліпшення триботехнічних властивостей деталей забезпечується оптимальним вибором параметрів електронно-променевої обробки. Дослідження показали, що застосування двократного електронно-променевого гартування з параметрами обробки: струм пучка електронів $I = 16$ мА; швидкість переміщення зразків відносно електронного пучка $V = 70$ мм/с; відстань від випускного вікна до зразка $H = 130$ мм; енергія пучка $E = 1,4$ МеВ; дозволяє значно зміцнити поверхневі шари вуглецевих сталей У8 і 45 [43].

В роботі [44] досліджені структура і триботехнічні властивості покриттів на основі Cu-Ni-WC, сформовані методом електронно-променевого наплавлення (ЕПН) на сталевих і мідних поверхнях. Введення до складу мідного сплаву карбіду вольфраму істотно підвищує його навантажувальну здатність, що дозволяє застосовувати його у важко навантажених вузлах тертя. Метод ЕПН дозволяє формувати безшпаринні покриття з рівномірним розподілом твердої фази по всьому об'єму наплавленого шару. При цьому середній розмір карбідних зерен залишається постійним. Товщина покриття варіюється в залежності від кількості проходів електронного пучка. Збільшення кількості твердої фази зменшує знос, збільшує навантажувальну здатність і час припрацювання.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Авторами [45] були отримані покриття з високим вмістом карбїду хрому на низьковуглецевій сталі методом ЕПН. При вмісті хрому 12-14% сформовані покриття володіють підвищеною корозійною стійкістю, яка підвищується при збільшенні питомої поверхневої енергії W . При $W = 8,5-9,5$ кДж/см² корозійна стійкість досягає максимальних значень, порівнянних з рівнем корозійної стійкості високолегованої сталі 12X18H10T. Формування покриттів позавакуумним електронно-променевим наплавленням карбїдом вольфраму із введенням до складу наплавочної суміші нікелю і карбїду титану в якості модифікатора дозволяє значно підвищити твердість і зносостійкість низьковуглецевої сталі за рахунок аустенізації і формування дисперсної структури наплавленого шару [46].

Іонно-променева обробка – іонна імплантація (ІІ) відноситься до ефективних видів модифікування поверхневих шарів при опроміненні імпульсними потужними іонними пучками, і дозволяє значно підвищити зносостійкість і корозійну стійкість деталей [47, 42, 48, 49, 50]. Іонна імплантація заснована на впровадженні в тверде тіло іонів, прискорених в електростатичному полі, що призводить до зміни структурно-фазового та елементного складу поверхневих шарів [42]. В якості первинних частинок 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 і непружної взаємодії з електронами. Іонна імплантація дозволяє впроваджувати будь-які елементи в кількостях, що перевищують граничну розчинність. Не дивлячись на те, що імплантовані частинки проникають на невелику глибину, товщина шару зі зміненими властивостями на 2-3 порядки перевищує глибину їх проникнення внаслідок розвитку дифузійних процесів і виникаючих дефектів кристалічної структури.

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

У роботі [47] проведено дослідження зміни структурного стану, триботехнічних і корозійних властивостей поверхневих шарів сталі 25B20K20X4Ф2М, обробленої концентрованими потоками іонів азоту. Зносостійкість поверхневих шарів, насичених іонами азоту, збільшилася в 2,1 рази у порівнянні з початковим 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 і вольфраму в нітридах VN і W₂N. При цьому швидкість корозії сталі знижується на ≈ 20%.

Автори [51] вивчали вплив іонного азотування з накладенням магнітного поля на мікротвердість та структурно-фазовий склад модифікованого шару інструментальних сталей Р6М5 і Х12. Результати вимірювання мікротвердості зразків показали, що після іонного азотування з накладенням магнітного поля мікротвердість поверхні сталі Х12 становить 2100 НV, а поверхні сталі Р6М5 – 1950 НV. Високий рівень мікротвердості обумовлений утворенням в тонкому поверхневому шарі сталей високодисперсних частинок нітридів легуючих елементів (Cr, Mo, W, V). Нітридоутворюючі елементи, підвищуючи мікротвердість поверхні, ускладнюють дифузію азоту і зменшують товщину азотованого шару. Накладення магнітного поля помітно прискорює формування азотованого шару, збільшуючи його товщину (≈ 200 мкм), що свідчить про високу ефективність процесу.

У роботі [52] вивчався вплив іонно-променевого азотування при температурах 670-870К на структуру і властивості інтерметалічного сплаву Fe₃Al. Встановлено, що іонно-променева обробка сплаву призводить до утворення поверхневих шарів, модифікованих азотом, товщиною 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. У роботі [53] досліджували вплив технологічних режимів вакуумно-плазмового нанесення покриттів TiN TiC на швидкорізальні сталі Р6М5, Р9 і тверді

сплави Т15К6, ВК6, ВК8. Встановлено, що стійкість різального інструменту з вакуумно-плазмовими покриттями збільшується в 1,5-3,5 рази.

Автори [54] досліджували вплив термоелектричної обробки (ТЕО) на коефіцієнт поверхневого зміцнення легованих сталей в залежності від вмісту вуглецю і часу обробки, досліджували також розподіл легуючих елементів в поверхневому шарі. Встановлено, що зносостійкість зразків після ТЕО підвищується в 1,6-1,8 разів.

У роботі [55] показано, що при взаємодії у вакуумі імпульсного потоку плазми з титановими зразками, покритими тонкою діелектричною плівкою (товщиною ≈ 1 мкм), на поверхні цих зразків збурюються мікроплазмові розряди. В результаті мікроплазмової обробки (МПО) на зразках титану формується суцільний переплавлений приповерхневий шар товщиною до 10 мкм, який характеризується сильно зміненою структурою і підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями, що залежать від режиму обробки. МПО призводить до збільшення мікротвердості поверхні титанових зразків у 5 разів порівняно з вихідним станом, а інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя при цьому зменшуються в кілька разів.

Аналіз результатів досліджень структури, триботехнічного і фізико-механічних властивостей конструкційної сталі 40Х після імпульсно-плазмової обробки (ІПО) наведено в роботі [56]. Результати експериментальних досліджень зразків зі сталі 40Х показали, що ІПО багаторазово підвищує зносостійкість поверхонь тертя при змазуванні маслом І-45 та емульсією (водним 3%-м розчином масла). Відзначено, що зносостійкість обробленої імпульсною плазмою поверхні підвищується зі збільшенням контактного тиску та швидкості ковзання в 5-6 разів.

До перспективних методів отримання зносостійких надтвердих покриттів відноситься електроерозійний синтез (ЕЕС). ЕЕС заснований на взаємодії спеціальної екзотермічної суміші з основним металом під дією електричного розряду, що супроводжується утворенням сплавів. Дослідження, проведені в області технології ЕЕС, спрямовані на вивчення особливостей процесу

формування покриттів при дії імпульсів електричного струму різної потужності, якості покриттів при зміні технологічних параметрів процесу, зносостійкості покриттів в умовах абразивного зношування, визначення оптимальних режимів зміцнення. Результати досліджень [57, 58] свідчать про перспективність ЕЕС-покриттів і можливість їх застосування для зміцнення та ремонту деталей машин. Запропоновано та досліджено процес електроерозійного зміцнення деталей в середовищі рідкого азоту, що дозволяє підвищувати експлуатаційні характеристики поверхневих шарів, без нанесення на оброблювану поверхню зміцнювального матеріалу.

У роботі [59] досліджувався процес обробки металів імпульсними електричними розрядами, при якому поверхневі шари металу можуть хімічно взаємодіяти з навколишнім середовищем. Авторами встановлено, що при електроіскровій обробці (ЕІО) пар латунь (Л-59) – сталь (Ст3) і мідь – сталь (Ст3) в середовищі гасу із 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 і склад газоподібних продуктів були розраховані теплові ефекти сумарних реакцій розкладу і 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 і пари води. Дослідження продуктів ерозії при розрядах між залізними електродами (армко-залізо) у воді показали наявність в них окислів і гідроокислів. При інших рівних умовах загальна кількість оксидів в продуктах ерозії становила для електродів з армко-заліза приблизно 50-60%, цинку – 50%, міді – 40%, алюмінію – 10%, олова – 10%.

Одним з перспективних методів поверхневого зміцнення деталей КПЕ є електровибухове легування (ЕВЛ). Сутність методу ЕВЛ полягає у формуванні структури та зміну властивостей металів і сплавів при імпульсному впливі на

поверхню багатофазним плазмовим струменем, сформованим з продуктів електричного вибуху провідників. В роботах [60, 61, 62] досліджено вплив обробки ЕВЛ металів і сплавів електровибухом різних матеріалів. Встановлено, що електровибухова обробка ВК10КС вуглеграфітовими волокнами і алюмінієвою фольгою дозволяє підвищити твердість поверхневих шарів твердих сплавів [61].

ЕВЛ титаном у високоенергетичному режимі при поглинає мій щільності потужності $6,0 \text{ ГВт/м}^2$ призводить до формування двошарової зони легування [62]. Поверхневий шар збагачений складним карбідом $(\text{Ti}, \text{W})\text{C}$, 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 і високою вартістю застосовуваного обладнання, серійне виробництво якого не освоєно. Процес обробки практично завжди повинен проводитися у високому вакуумі ($10^{-3} \dots 10^{-5} \text{ Па}$). До недоліків високоенергетичних методів можна також віднести низьку продуктивність процесів, малу глибину зміцнення і нерівномірність фізико-механічних властивостей модифікованих поверхонь.

2.2 Комбіновані методи поверхневого зміцнення

Комбіновані методи поверхневого зміцнення дозволяють створювати покриття з високими заздалегідь заданими експлуатаційними властивостями [20, 63, 64, 65, 66]. Так поверхнєве легування з подальшим азотуванням низьколегованих сталей дозволяє підвищити характеристики механічної міцності вище рівня властивостей високолегованих сталей. В роботі [67] розглянуто проблеми підвищення зносостійкості протяжного інструменту методом комбінованого зміцнення, що включає азотування та нанесення покриття $(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Al})\text{N}$. Виробничі випробування показали, що комбіноване зміцнення протяжок за

пропонованими режимами дозволяє в 2-4 рази підвищити їх стійкість у порівнянні з незміцненими.

Комбінація методів фізичної катодно-дугового та хімічного осадження із газової фази при обробці плунжерних пар паливних насосів високого тиску, виготовлених із сталі 25X5MA, дозволяє отримати покриття з високою твердістю, зносостійкістю і корозійною стійкістю [68, 69].

Сутність методу полягає в деструкції молекул газу, що містить вуглець та водень, в результаті їх зіткнення з високоенергетичними іонами, що генеруються високоточним імпульсним катодно-дуговим розрядом на поверхні мішені з графіту. Продукти такої взаємодії, осідають на підкладці і формують зносостійке покриття. Встановлено, що коефіцієнт тертя поверхонь з таким покриттям в умовах граничного змащення становить 0,10-0,12 і практично не змінюється при наявності в ній домішок води і дрібнодисперсних абразивних частинок, в той час як для поверхонь без покриттів коефіцієнт тертя зростає в 1,4 рази в присутності домішок.

Іонно-променеве азотування газотермічних покриттів, отриманих методом гіперзвукового розпилення дротяних сталей феритного (Св-08Г2С), мартенситного (40Х13) і аустенітного (06Х19Н9Т) класів, забезпечує підвищення зносостійкості покриттів з феритної сталі від 2 до 80 разів; з мартенситної сталі від 2 до 13 разів; з аустенітної сталі від 10 до 35 разів [70].

У роботі [71] показано, що попереднє нанесення на поверхню деталі легуючого підшару з шеєлітовим концентратом методом електроіскрового легування з подальшим його переплавом електричною дугою в середовищі вуглекислого газу дозволяє значно змінювати експлуатаційні характеристики сталі Ст3 в потрібному напрямку.

Електроіскрова обробка сталі 45 твердим сплавом ВК6М, хромом і молібденом з подальшим лазерним зміцненням дозволяє знизити інтенсивність зношування покриттів, сформованих твердим сплавом на 70%, а покриттів, сформованих Cr і Mo – відповідно в 3,5 і 3 рази, порівняно з необробленою

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сталлю [72].

У роботі [73] проведено експериментальне дослідження процесу мікродугової цементації сталевих виробів в порошкових середовищах. Застосування порошку кам'яного вугілля інтенсифікує процес дифузійного насичення вуглецем і формування дифузійного шару глибиною до 0,3 мм відбувається на протязі 2...3 хвилин, що в сотні разів скорочує процес цементації.

Цементация в плазмі електроліту зворотної полярності [21, 74, 75] – електролітно-плазмова обробка – при температурі 850⁰С тривалістю 3-6 хвилин призводить до утворення в сталі 30ХГСА модифікованого шару глибиною 30-40 мкм, що складається з зерен фериту (α -Fe), на межах яких розташовані карбіди заліза (Fe_3C). Значення мікротвердості поверхневих шарів сталі, модифікованої електролітно-плазмового цементацією, складає 7500 МПа.

Останнім часом перспективним напрямком є поєднання електричного впливу на поверхню з механічною обробкою або зміцнення методом електродеформаційної обробки [76, 77, 78, 79]. В роботі [79] проведено аналіз експериментальних даних з дослідження мікротвердості поверхневих шарів вуглецевих сталей, підданих електромеханічному зміцненню з ударом. Розглянуто також деякі особливості тонкої структури зміцненого поверхневого шару («білого шару») матеріалу, отриманого в області імпульсного температурно-силового впливу.

Ефективним способом зміцнення вуглецевих сталей також є обробка, що поєднує вплив на зміцнювану поверхню іскрового розряду і подальшу пластичну деформацію з одночасним легуванням [80]. Обробка поверхонь можлива як ексцентрично встановленим електродом, так і обертовим диском-електродом з роликками, які виконують функції розриву і замикання ланцюга анод-катод при поверхневому деформуванні. При замиканні ланцюга забезпечується перенесення легуючого матеріалу на оброблювану поверхню і його розрівнювання електродом. При цьому легуючий матеріал заповнює вм'ятини і подряпини на поверхні оброблюваної деталі, змінюючи її топографію, сформовану після проходу

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрода і підвищуючи мікротвердість.

Авторами [81] досліджено один з перспективних методів підвищення зносостійкості – комбінована фрикційно-електрична обробка (ФЕО) з високоенергетичним впливом через проміжне середовище – модифікатор, що містить поверхнево-активну речовину (ПАР). Вивчено вплив поверхневого модифікування сталевих зразків дисперсними добавками в суміші з ПАР (гліцерин) і режимів комбінованої ФЕО на мікротвердість поверхневого шару та зносостійкість пари тертя «сталь-бронза». В якості модифікаторів застосовувалися: дисульфід молібдену, графіт, мідь, бронза.

В роботах [81, 82] показана роль дисперсних поверхнево-активних модифікаторів в механізмі зміцнення поверхневого шару. На підставі результатів досліджень встановлено, що найбільша ефективність запропонованого методу ФЕО сталевих поверхонь досягається при використанні в якості модифікатора ультрадисперсного графіту і дисульфиду молібдену в суміші з гліцерином. При цьому швидкість зношування трибосопряження мінімальна в порівнянні із застосуванням інших модифікаторів і з обробкою за традиційною технологією поверхневого зміцнення. В умовах фрикційно-електричного впливу на поверхню, що модифікується, в присутності ПАР розвиваються процеси деформаційно-термічного зміцнення, зумовлені структурно-фазовими перетвореннями та дифузією модифікаторів у поверхневий шар. Одночасно в зоні контакту сталевого зразка з бронзовим контртілом протікають фізико-хімічні процеси виборчого переносу з формуванням найтоншої плівки міді на сталевій поверхні. Сукупність цих процесів забезпечує істотне підвищення твердості сталевого зразка і зносостійкості трибосопряження.

При використанні комбінації методів електродугового випаровування та іонного азотування в роботі [83] отримано високоефективні зносостійкі покриття. Встановлено, що найкращою зносостійкістю володіє покриття ZrHfN, отримане за комбінованою технологією: нанесення підшару ZrHf – азотування виробу з підшаром в плазмі пульсуючого струму – формування на азотованій поверхні

покриття з нітриду ZrHfN.

Авторами роботи [84] запропоновані технології комбінованого зміцнення і відновлення деталей з титанових сплавів плазово-дуговим методом у вакуумі. Для деталей, підданих інтенсивному зношуванню, найбільш ефективно нанесення шару товщиною до 1 мм комбінованим способом, об'єднуючим дугове порошкове наплавлення з подальшим газовим легуванням вуглекислим газом в одну технологічну операцію.

В роботі [85] досліджено деформаційне зміцнення, стійкість до знеміцнення при нагріванні, зносостійкість при абразивному впливі і терті ковзання без змащування вуглецевих і низьколегованих сталей, підданих обробці комплексним методом: лазерне загартуванням і додаткове ППД твердосплавним індентором. Показано, що фрикційна обробка ковзаючим індентором забезпечує істотне підвищення міцнісних і трибологічних властивостей сталей, попередньо загартованих лазером. Поліпшення міцнісних і трибологічних властивостей обумовлено формуванням в поверхневому шарі загартованих сталей при пластичній деформації тертям ультрадисперсної структури α -мартенситу, що зазнав деформаційного динамічного старіння.

Авторами роботи [86] запропонована оптимальна комбінована деформаційно-термічна обробка загартованої конструкційної сталі 50, що включає фрикційну обробку з відпусканням при 350°C, що забезпечує значне підвищення твердості, зносостійкості і опір поверхні деформацій порівняно з загартованою і відпущеною при цій же температурі сталлю. Встановлено, що фрикційна обробка загартованої сталі 50 обумовлює істотне (в 1,5-3,0 рази) зниження інтенсивності зношування в умовах абразивного впливу, а також при терті ковзання по сталевій пластині в присутності мастила і без змащення. Зазначене підвищення зносостійкості сталі, зміцненої фрикційною обробкою, зберігається і може значно зрости після відпускання при 100-600°C в умовах абразивного зношування при терті з мастилом.

Перспективним напрямком у технології поверхневого зміцнення є механічне

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

легування з метою отримання високостійких композиційних дисперсно-зміцнених покриттів. Структура дисперсно-зміцнених матеріалів являє собою матрицю з металу або сплаву, в якій рівномірно розподілені дисперсні частки зміцнюючої фази. У якості останньої застосовують термодинамічно стабільні сполуки з високим значенням модуля зсуву – оксиди, карбіди, нітриди, бориди, інтерметаліди. Граничного зміцнення можна очікувати у матеріалів з максимально розвиненою поверхнею меж зерен і субзерен, закріплених і стабілізованих дисперсними частинками зміцнюючої фази. Оптимальною є структура мікрокристалічного типу з розміром зерен 0,2-0,5 мкм. Частки зміцнюючої фази повинні мати розмір до 0,05 мкм, а загальний обсяг не перевищувати 10%. Дисперсне зміцнення має очевидні переваги перед іншими методами в інтервалі температур $(0,60-0,95)T_{пл}$ [63].

Комбіновані методи характеризуються досить високою складністю і вартістю вживаного устаткування, а також трудомісткістю виконання комплексу технологічних операцій.

2.3 Основні фізичні процеси під час електроіскрової обробки

Зміна властивостей сталі можлива двома способами: зміною хімічного складу сталі, або зміною її структури під впливом зовнішнього енергетичного впливу різними методами (механічними, тепловими, енергетичними або їх комбінаціями), включаючи електроіскровий метод обробки (ЕІО).

Цей метод, відомий під назвою «електроіскрового легування», (розроблений Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко у 1938-1940 рр.) заснований на явищі електричної ерозії при іскровому розряді матеріалу анода і його полярного масопереносу на катод-деталь [87]. При цьому на поверхні оброблюваної деталі формується шар, що складається з матеріалу катода, модифікованого частинками матеріалу анода і міжелектродного середовища. Фазовий склад і структура покриття, сформованого при ЕІО, визначаються складом і властивостями матеріалів легуючих електродів і

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічними режимами обробки.

Формування зміцненого поверхневого шару покриття при ЕІО відбувається в результаті складних плазмохімічних, теплофізичних і механотермічних процесів, що відбуваються на локальних ділянках поверхні оброблюваної деталі під впливом енергії іскрового розряду. При зближенні легуючого електрода-анода з оброблюваною поверхнею деталі (рисунок 2.1) відбувається іскровий розряд тривалістю 10^{-6} - 10^{-3} с.

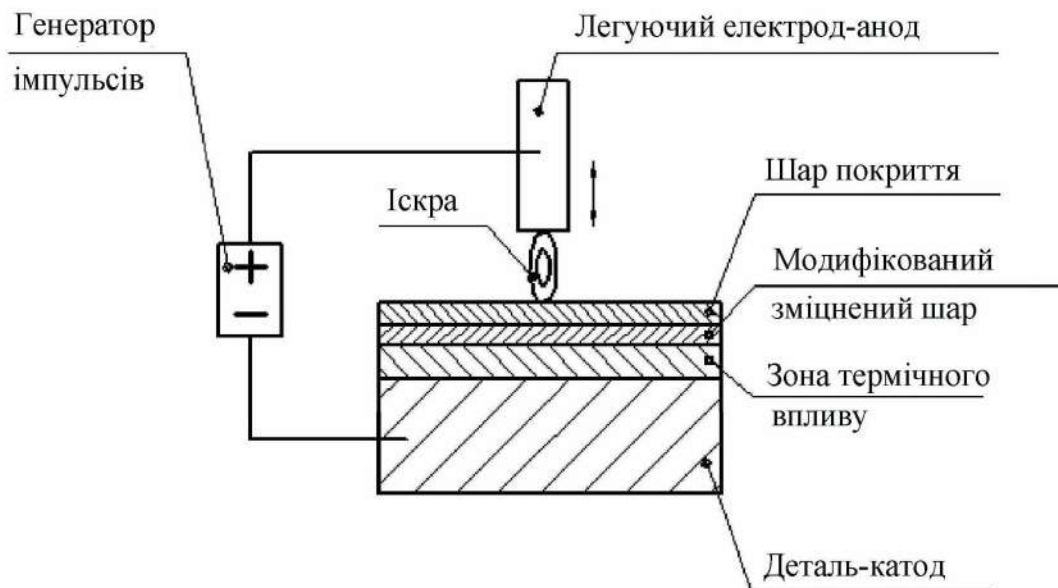


Рисунок 2.1 – Принципова схема електроіскрової обробки (ЕІО)

У результаті, на поверхнях анода і катода виникають локальні осередки плавлення та випаровування матеріалу, що викликають їх електричну ерозію і взаємне масоперенесення. У процесі обробки на поверхні деталі формується тонке покриття з певними фізико-механічними властивостями. Паралельно діючий імпульсний тепловий вплив викликає ряд механотермічних процесів, що призводять поверхневі шари електродів до складного напруженого стану аж до їх пластичної деформації і крихкого руйнування. Оскільки електроди при іскровому розряді знаходяться між собою у кінематичному зв'язку, то поряд з тепловим впливом оброблювана поверхня деталі піддається ударно-вібраційному впливу. При кожній контактній взаємодії електродів утворюються і руйнуються

мікролокальні містки зварювання, що викликають спільно з механічним ударно-вібраційним впливом пластичну деформацію модифікованих поверхневих шарів. Такий енергетичний вплив потужності високої щільності стимулює розвиток в умовах електроіскрової обробки мікрометалургійних процесів (термохімічних, газодинамічних, дифузійних).

Поверхневий шар, сформований при ЕІО, являє собою нову композиційну структуру. Верхній тонкий шар складається з матеріалу анода, модифікованого елементами матеріалу катода і міжелектродного середовища. Суцільність і товщина цього шару залежать від структури матеріалу ЛЕ, режимів і часу обробки.

Під верхнім шаром розташовується модифікований зміцнений шар, що складається з суміші матеріалів анода і катода, що утворюється в результаті конденсації іонно-плазмової і краплинної фази і дифузії хімічних елементів матеріалу анода в матеріал катода. Під ним розташовується самий нижній і найбільший по товщині шар, утворений в результаті імпульсного теплового впливу (зона термічного впливу). Його структура відрізняється від структури матеріалу оброблюваної деталі будовою і зернистістю. З переміщенням вглиб дана структура переходить в структуру основного матеріалу [88].

Таким чином, модифікування та зміцнення поверхневого шару відбувається завдяки таким процесам [36]:

- осадження (конденсація) матеріалу анода на поверхні катода;
- дифузія частинок матеріалу анода в поверхневий шар матеріалу катода;
- утворення твердих розчинів і хімічних сполук (оксиди, карбіди, інтерметаліди);
- утворення зони взаємної кристалізації Me_1 і Me_2 , неврівноважених структур, фаз, а також дрібнозернистої структури.

Висновки до розділу 2

1. Великі потенційні можливості мають методи поверхневого модифікування деталей машин, включаючи деталі трибосистем, із застосуванням висококонцентрованих потоків енергії.

2. Одним з найбільш перспективних можна вважати електроіскровий метод обробки, при якому формуються і використовуються потоки частинок високої щільності енергії при імпульсному впливі на оброблювану деталь, що дозволяє створювати поверхневі структури з підвищеними механічними і триботехнічними властивостями при значній простоті технологічного обладнання та економічності процесу.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Об'єкт дослідження

У якості об'єкта експериментальних досліджень прийнята конструкційна легована високоякісна сталь 15ХГН2ТА (ДСТУ 7806:2015), що широко застосовується для виготовлення зубчастих коліс, осей, втулок, синхронізаторів, муфт, валів коробок передач автомобілів та інших видів сільськогосподарської техніки. Для підвищення механічних властивостей сталі 15ХГН2ТА використовують хіміко-термічну обробку із наступною термічною обробкою, що значно ускладнює й збільшує тривалість технологічного процесу виготовлення деталей.

Зразки для проведення досліджень виготовляли зі сталі 15ХГН2ТА в нормалізованому стані (механічні властивості за [89]): межа текучості $\sigma_T = 75 \cdot 10^3$ МПа; тимчасовий опір $\sigma_B = 95 \cdot 10^3$ МПа; відносне видовження $\delta = 11\%$, відносне звуження $\psi = 55\%$; ударна в'язкість КСУ $\alpha_K = 10 \cdot 10^5$ Дж / м²). Хімічний склад сталі наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад (%) та твердість сталі 15ХГН2ТА [89]

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

Зразки для проведення досліджень наведені на рисунках 3.1-3.2.

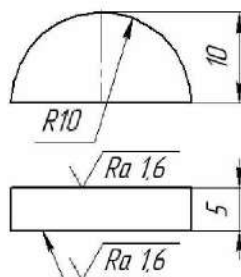


Рисунок 3.1 – Зразок для дослідження модифікованих поверхонь

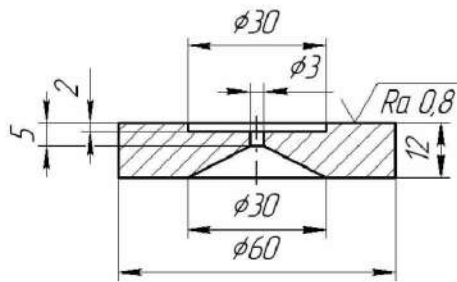


Рисунок 3.2 – Зразок для дослідження триботехнічних властивостей поверхонь металополімерних пар тертя після ЕІО

3.2 Установка та методика електроіскрової обробки

Електроіскрова обробка здійснювалася на механізованій установці. Установка комплектується генератором імпульсів електричного струму, вібробудником і пристосуваннями для закріплення оброблюваних деталей. Принципова схема монтажу легуючого електрода й вібробудника зі зразком на установці показана на рисунку 3.3.

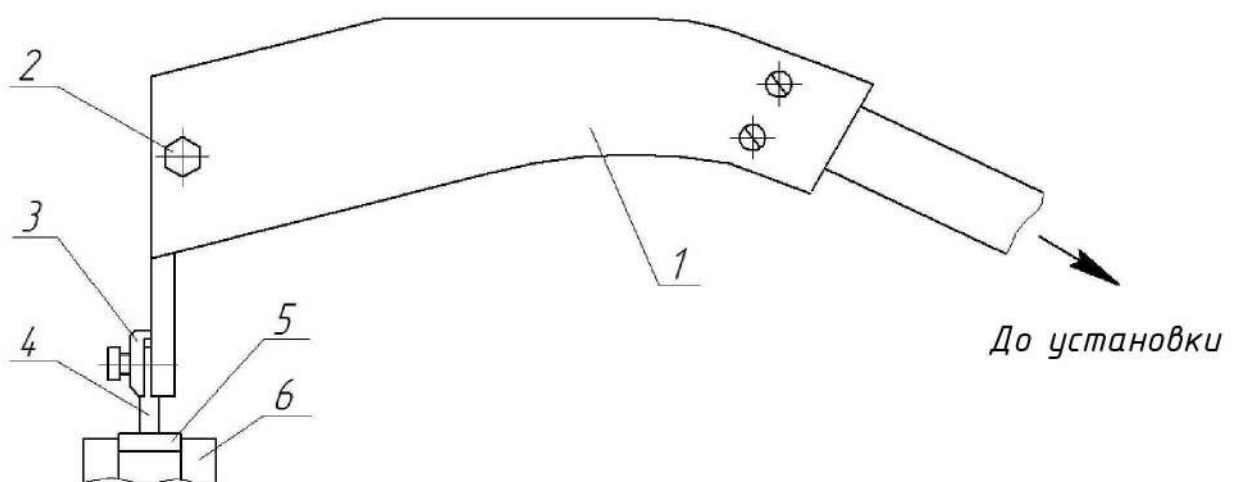


Рисунок 3.3 – Схема монтажу електрода та вібробудника зі зразком на установці:
 1 – вібробудник; 2 – кріпильний гвинт; 3 – тримач електрода;
 4 – легуючий електрод; 5 – зразок; 6 – лещата

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Принципова схема установки для механізованої ЕІО наведена на рисунку 3.4.

Вид загальний та робоча зона механізованої установки ЕІО наведені на рисунках 3.5, 3.6.

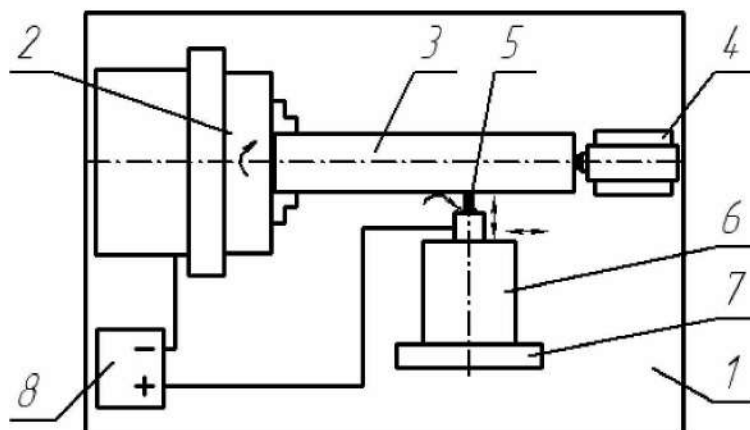


Рисунок 3.4 – Схема установки для механізованої ЕІО: 1 – база токарного верстата; 2 – ізолюваний кулачковий патрон; 3 – оброблювана деталь; 4 – ізолювана задня бабка; 5 – легуючий електрод; 6 – механізована головка із супортом верстата; 7 – відслідковуєча система; 8 – генератор імпульсів



Рисунок 3.5 – Вид загальний механізованої установки IMEI-1001-IMES на базі токарного верстата

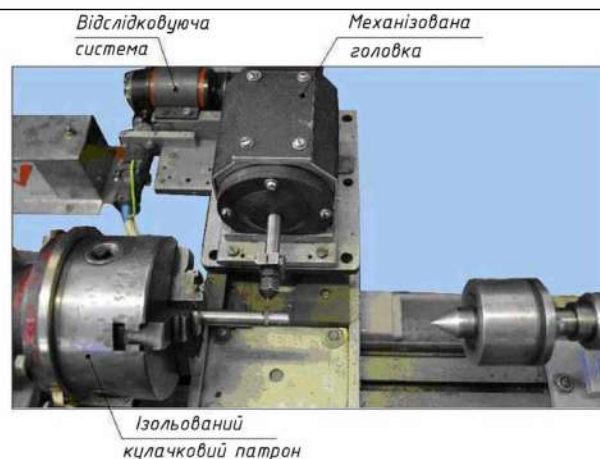


Рисунок 3.6 – Робоча зона механізованої установки

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Спеціальна механізована установка призначена для ЕІО деталей типу тіл обертання й осьового (спірального) різального інструменту. Створена на базі токарного верстата і складається з наступних блоків: генератор імпульсів електричного струму; механічний блок, що включає пристрої розміщення, кріплення й переміщення оброблюваної деталі й електрода-інструмента; електронний модуль, що забезпечує заданий міжелектродний зазор.

Технічні характеристики установки наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики установки

Характеристика	Значення
1	2
Споживана потужність, кВ·А	1,0
Джерело живлення:	
напруга, В;	220
частота, Гц	50
Продуктивність, см ² /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
Режим роботи	Ручний, напівавтоматичний

Методика підготовки й обробки зразків на установці включає наступні операції:

1. Знежирення оброблюваної поверхні деталі (зразка) бензином або спиртовою рідиною.
2. Установка оброблюваної деталі (зразка) у патрон верстата (лещата).
3. Закріплення легуючого електрода (ЛЕ) в тримач віброзбудника або в механізовану голівку, установлену на супорті верстата.
4. Включення генератора імпульсів і перевірка працездатності віброзбудника або механізованої головки за допомогою короткочасного торкання до оброблюваної деталі (зразка).
5. Вибір і завдання необхідної частоти імпульсів віброзбудника або механізованої головки.
6. Вибір і завдання напруги в імпульсі і ємності конденсаторної батареї на генераторі імпульсів.
7. Електроіскрова обробка поверхні на заданих режимах.

Поверхні сталевих зразків обробляли з різними легуючими електродами: стандартним електродом марки Т15К6; електродом ІМХ2; електродом Ш2. Вибір легуючих електродів здійснювався на основі раніше проведених досліджень. Висока вартість і дефіцит вольфраму обумовили застосування безвольфрамового електрода Ш2 на основі карбіду титану з легуючими добавками й мінеральною сировиною, що містить вольфрам. Легуючий електрод ІМХ2 містить мікролегуючі елементи й самофлюсуючі добавки, що забезпечують при високих температурах захисну атмосферу, що перешкоджає утворенню оксидів. Хімічний склад застосовуваних електродів наведений у таблиці 3.3.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Хімічний склад легуючого електроду (ЛЕ) для електроіскрової обробки

№ з.п.	Марка ЛЕ	Хімічний склад, %
1	T15K6	TiC – 15, Co – 6, WC – 79
2	Ш2	TiC – 60, Ni-Cr-Al – 30, CaWO ₄ – 10
3	IMX2	WC-Co – 50, Ni-Cr-B-Si – 50

3.3 Методика дослідження мікротвердості та товщини покриттів

Методика дослідження включала вивчення впливу матеріалу ЛЕ і технологічних режимів ЕІО на мікротвердість і товщину покриттів, що формуються при електроіскровій обробці.

Мікротвердість поверхневих шарів, що формується, визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 при навантаженні на індентор 0,49 Н, глибина впровадження 1-1,5 мкм. Впровадження індентору здійснювали через рівні відстані. Отримували відбитки від піраміди індентора, за діагоналю відбитка розраховували глибину впровадження індентора. Мікротвердість модифікованих покриттів вимірювалася в 5 точках поверхні (вихідного зразка – в 11 точках), за якими визначалося середнє значення. За отриманими значеннями будували залежності мікротвердості від технологічних режимів електроіскрової обробки (напруга, ємність конденсаторів, тривалість обробки) зразків різними електродами.

Товщина покриттів, що наносились, визначалася на горизонтальному оптиметрі ІКГ-3 відносним методом вимірювання. Оптиметр ІКГ-3 має наступні технічні характеристики: межі вимірювання за шкалою $\pm 0,1$ мм, ціна поділки шкали 0,001 мм; похибка показників приладу $\pm 0,0002 \dots 0,0003$ мм.

Товщина формованих покриттів вимірювалася в 16 точках поверхні, за якими визначалося середнє значення. За отриманими результатами будувалися діаграми впливу складу електродних матеріалів та режимів обробки на товщину покриття.

3.4 Дослідження триботехнічних властивостей модифікованих поверхонь

Методика дослідження триботехнічних властивостей сталевих зразків, що модифікуються, включала вивчення впливу технологічних параметрів електроіскрової обробки на характеристики триботехнічних властивостей металополімерної пари тертя: швидкість зношування полімерного зразка. Оцінку названої характеристики здійснювали при фрикційній взаємодії зразків із сталі 15ХГН2ТА з контр зразками із полімерного композиційного матеріалу на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) без змащення. Така методика прийнята у зв'язку з тим, що коефіцієнт тертя і момент тертя характеризують фрикційні властивості не одного, а двох спряжених тіл в умовах відносного ковзання. Хімічний склад полімерного композиційного матеріалу – контр зразка: скритокристалічний графіт (СКГ) – 4,5% мас; сажа біла (БС) – 1,5% мас; дисульфід молібдену (MoS_2) – 2,5% мас; фторопласт-4 (Ф4) – 91,5 % мас.

Вибір такої методики оцінки триботехнічних властивостей модифікованих сталевих зразків пояснюється також тим, що однією з тенденцій розвитку промисловості є широке використання полімерних матеріалів, в тому числі у вузлах тертя шляхом застосування в машинах і устаткуванні металополімерних пар тертя (трибосистем). Крім того, в цілому ряді машин і приладів різного призначення за умов експлуатації не допускається застосування рідких або пластичних мастильних матеріалів. У цих випадках єдиним способом створення працездатного вузла тертя є використання металополімерних трибосистем із полімерними матеріалами, що самозмащуються. В роботі у якості матеріалу, як сказано вище, використовували композиційний матеріал на основі політетрафторетилену, а триботехнічні властивості сталі 15ХГН2ТА оцінювалися по величині зношування полімерного контр зразка по сталевому зразку.

Дослідження металополімерних пар тертя здійснювались на спеціальній установці (рисунок 3.7), створеній на базі настільного свердлильного верстата.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

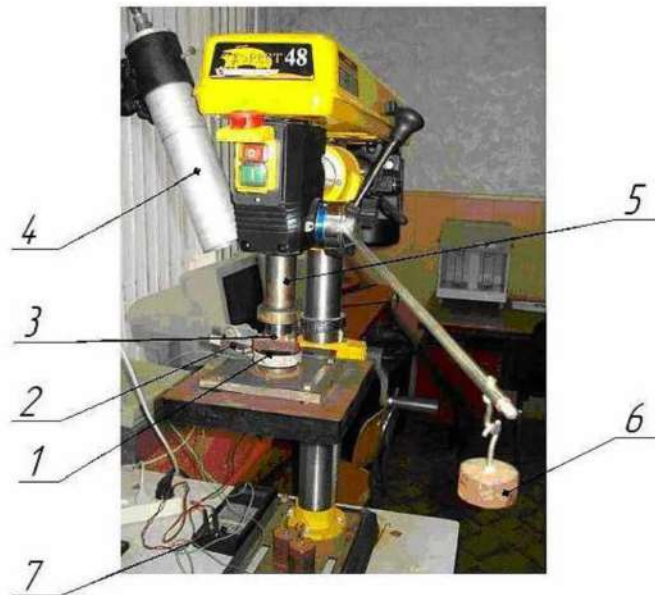


Рисунок 3.7 – Установка на базі свердильного верстата:

- 1 – зразок; 2 – тензобалка; 3 – тримач контр зразків; 4 – пірометр;
5 – шпиндель верстата; 6 – вантаж змінний; 7 – датчик тиску

У робочому вузлі установки (рисунок 3.8) реалізується торцева схема тертя «палець-диск» при контактних тисках $p = 2,66$ МПа і швидкості ковзання $V = 1,20$ м/с. Контр зразком слугує циліндричний палець (рисунок 3.9) із композиційного матеріалу на основі ПТФЕ.

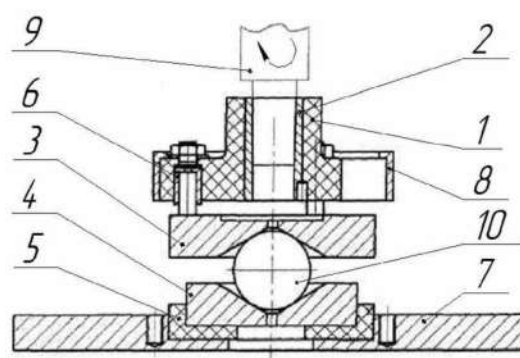


Рисунок 3.8 – Робочий вузол установки для випробування на тертя та зношування:

- 1 – корпус тримача контр зразків; 2 – втулка; 3 – зразок;
4 – опора; 5 – втулка-ізолятор; 6 – тримач контр зразків; 7 – плита;
8 – кожух; 9 – шпиндель верстата; 10 – кульова опора

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

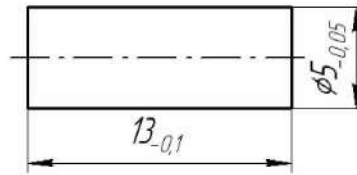


Рисунок 3.9 – Полімерний контр зразок

У тримачі одночасно встановлюється по три полімерних контр зразка, які із заданим зусиллям робочими торцями притискаються до поверхні сталевого зразка-диска.

Робочий вузол установки (рисунок 3.8) обладнано кульовою опорою, що забезпечує самовстановлення зразка і мінімізацію сили і моменту тертя в цьому з'єднанні. Застосування кульової опори дозволяє також з мінімальною похибкою вимірювати момент тертя, створюваний силою тертя між полімерними контр зразками і металевим зразком. Момент тертя вимірюється датчиком тиску за допомогою пластини, закріпленої на зразку.

Методикою випробування передбачається попередня підготовка сталевих зразків і полімерних контр зразків. Перед початком випробування робоча поверхня зразків ретельно промивається розчинником і етиловим спиртом, протирається насухо серветкою і витримується на повітрі не менше 30 хв.

Полімерні контр зразки перед початком випробування просушуються у шафі при температурі 60°C протягом 30 хв і протираються серветкою, змоченою в етиловому спирті. Після припрацювання і кожного етапу випробування протирання повторюється. Кожен комплект контр зразків проходить припрацювання тривалістю ≈ 20 хв. Про закінченню припрацювання судять по встановленню приблизно постійного середнього моменту тертя і наявності характерної (блискучої) поверхні тертя на сталевому зразку.

Методикою передбачалось випробування комплекту з трьох полімерних контр зразків протягом трьох годин з кожним металевим зразком. Вимірювання моменту сили тертя здійснювалося малогабаритним потенціометричним датчиком тиску ДМП-6А. Після кожного випробування контр зразки протиралися, сушилися,

важилися на мікроаналітичних вагах ВЛР-200 з похибкою не більше 0,25 мг. Зразки після кожного випробування протиралися сухою серветкою для видалення з робочої поверхні продуктів зносу. Для кожного комплексу з трьох контр зразків визначалася масова швидкість зношування після кожного тригодинного випробування за формулою:

$$I = (m_1 - m_2) / t, \quad (3.1)$$

де m_1 , m_2 – маса контр зразків до та після випробувань відповідно, г;

t – тривалість випробування, с.

За результатами вимірювань визначалося середнє значення швидкості зношування, а також розраховувався довірчий інтервал при довірчій ймовірності 0,95.

3.5 Оптимізація технологічних параметрів електроіскрової обробки

З метою скорочення обсягу експериментальних досліджень при оптимізації технологічних режимів ЕІО використовували метод математичного планування експерименту. Він дозволяє в рамках одного плану факторного експерименту отримати залежності триботехнічних властивостей (параметрів оптимізації) від змінних режимів обробки (варійовані параметри). Процес ЕІО містить велику кількість факторів, що впливають на триботехнічні властивості поверхневого шару. Для визначення оптимальних параметрів технологічних режимів і отримання залежностей досліджуваних властивостей від значень цих параметрів використовували статистичний метод планування експерименту. При розробці плану факторного експерименту використовували апріорну інформацію про вплив технологічних режимів ЕІО на зносостійкість пари тертя.

У відповідності до завдання дослідження доцільно в якості параметра оптимізації вибрати швидкість зношування. В якості незалежних факторів впливу

на досліджуваний об'єкт були обрані: X_1 – анодно-катодна напруга, X_2 – розрядна ємність конденсаторів, X_3 – тривалість обробки. Названі фактори відповідають вимогам, пред'явленим до незалежних керованих факторів.

Математична модель прийнята у вигляді полінома, що враховує головні ефекти і ефекти спільної дії:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_{ij}, \quad (3.2)$$

де b_0, b_i, b_{ij} – експериментальні оцінки теоретичних коефіцієнтів регресії.

Вибір основного рівня та інтервалів варіювання факторів виконаний на основі результатів попередніх експериментів. У задачі з трьома факторами ($K = 3$) кількість дослідів повного факторного експерименту становить $N = 2^3 = 8$. Матриця планування експерименту наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Матриця планування експерименту

№ дослідів	Матриця плану							
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Результати експерименту, виконаного за даним планом, представляються у вигляді рівняння регресії:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_{12} + b_{13}X_{13} + b_{23}X_{23} + b_{123}X_{123}. \quad (3.3)$$

Далі рівняння регресії у кодованому виді перетворюється у рівняння із натуральними значеннями. За результатами аналізу отриманого рівняння регресії для визначення оптимальних значень технологічних режимів обробки здійснюється оптимізаційне дослідження методом «крутого сходження» (Бокса-Уилсона). Визначаються найбільш ефективні параметри, за якими визначається напрям руху в область оптимуму. Рух у багатовимірному просторі здійснюється покроково (дискретно). Якщо фактори X_i змінювати пропорційно значенням відповідних їм коефіцієнтів, то буде забезпечено рух уздовж лінії «крутого сходження».

Далі здійснюється уявний рух до оптимуму, тобто проводяться «уявні» досліди, які полягають в обчисленні значень функції відгуку в точках факторного простору, що лежать на шляху до оптимуму. За результатами дослідів приймається рішення щодо встановлення оптимальних значень параметрів режимів обробки або продовження оптимізаційного дослідження.

Висновки до розділу 3

Таким чином, у даному розділі нами запропоновано наступне.

- 1 Описано установку та методику проведення електроіскрової обробки.
- 2 Запропоновано методику дослідження мікротвердості та товщини покриття за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М.
- 3 Дослідження триботехнічних властивостей модифікованих поверхонь запропоновано здійснювати за допомогою спеціальної установки на базі свердлильного верстата із використанням конкретної методики випробувань.

4 Запропоновано використовувати метод математичного планування експерименту для оптимізації технологічних режимів ЕІО та скорочення об'єму експериментальних досліджень.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Вплив технологічних параметрів, матеріалу інструменту

Дослідження впливу режимів ЕІО (анодно-катодна напруга; розрядна ємність конденсаторів; тривалість обробки) на товщину утворених покриттів проводили на зразках із сталі 15ХГН2ТА, оброблених різними легуючими електродами. Результати дослідження товщини покриттів у вигляді діаграм наведено на рисунку 4.1.

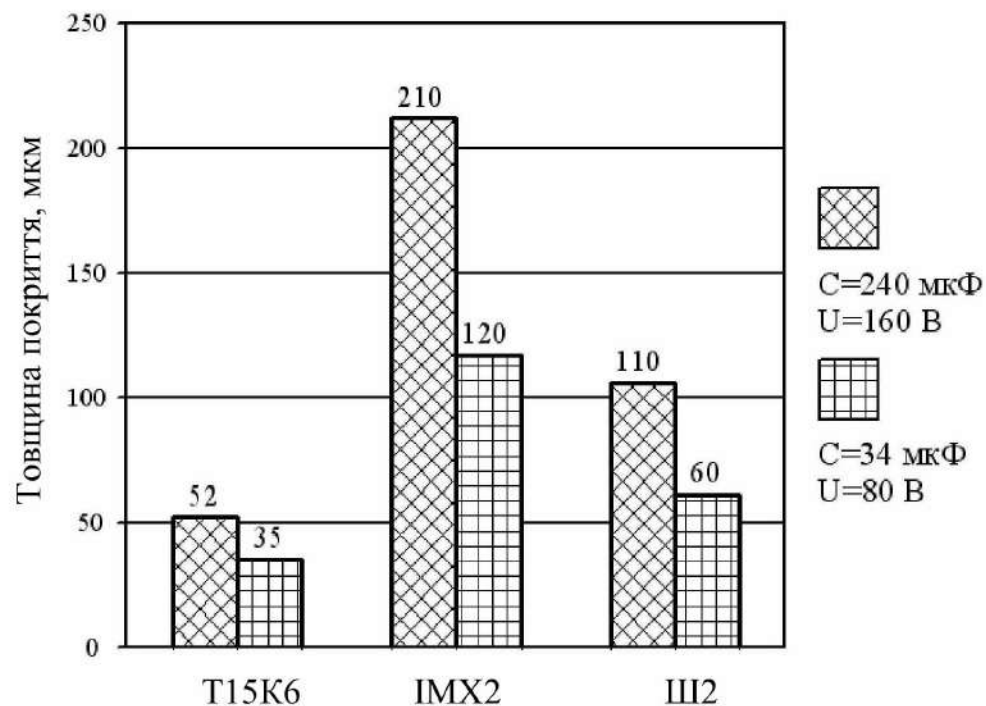


Рисунок 4.1 – Товщина покриттів зразків зі сталі 15ХГН2ТА при різних матеріалах електродів

З отриманих діаграм видно, що із підвищенням енергетичних режимів ЕІО: напруги від 80 до 160 В і ємності від 34 мкФ до 240 мкФ товщина покриттів збільшується при будь-якому матеріалі легуючого електрода. При цьому, при обробці легуючим електродом T15K6 товщина покриття збільшується на 48,6%,

при обробці електродами ІМХ2 – на 75%, при обробці електродами Ш2 – на 83,3%.

Діаграми також показують, що при обробці електродами ІМХ2 на основі карбіду вольфраму з добавками компонентів, що утворюють з матеріалом основи необмежені тверді розчини, отримана найбільша товщина покриття (210 мкм). Це можна пояснити тим, що введення бору і кремнію до складу легуючого електрода уповільнює утворення оксидних плівок у формованій структурі, що надає позитивний вплив на суцільність і збільшення товщини покриття. Крім того, введення бору зменшує ерозійну стійкість легуючого електрода, внаслідок чого підвищується масоперенесення матеріалу електрода на оброблювану поверхню.

Використання електрода Ш2 також призводить до утворення покриттів, що перевищують товщину покриттів, сформованих стандартних електродами марки Т15К6, в 1,7 – 2 рази. Це пояснюється тим, що мінеральна сировина у складі матеріалу електрода створює захисну атмосферу в зоні електроіскрової обробки, перешкоджаючи вигоранню ерозійних часток і сприяючи інтенсифікації масоперенесення матеріалу електрода. Отримані результати дозволяють використовувати ЕІО для відновлення зношених поверхонь прецизійних пар тертя в межах до 100 мкм.

Вивчення характеру впливу енергетичних режимів електроіскрової обробки (анодно-катодна напруга, ємність конденсаторів) на мікротвердість утворених покриттів проводили на тих же зразках із сталі 15ХГН2ТА, оброблених електродами ІМХ2, Ш2 і Т15К6. Отримані залежності мікротвердості поверхневих шарів сталевих зразків від анодно-катодного напруги і розрядної ємності наведені на рисунках 4.2 і 4.3.

Аналіз отриманих залежностей $HV = f(U)$ і $HV = f(C)$ показує, що найбільш високі значення мікротвердості покриттів ($HV\ 900...1080$) отримані при використанні електродів ІМХ2 і Т15К6. Крім того, за графіками видно, що підвищення енергетичних режимів обробки по-різному впливає на характер зміни мікротвердості покриттів при зміні матеріалу легуючого електрода.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

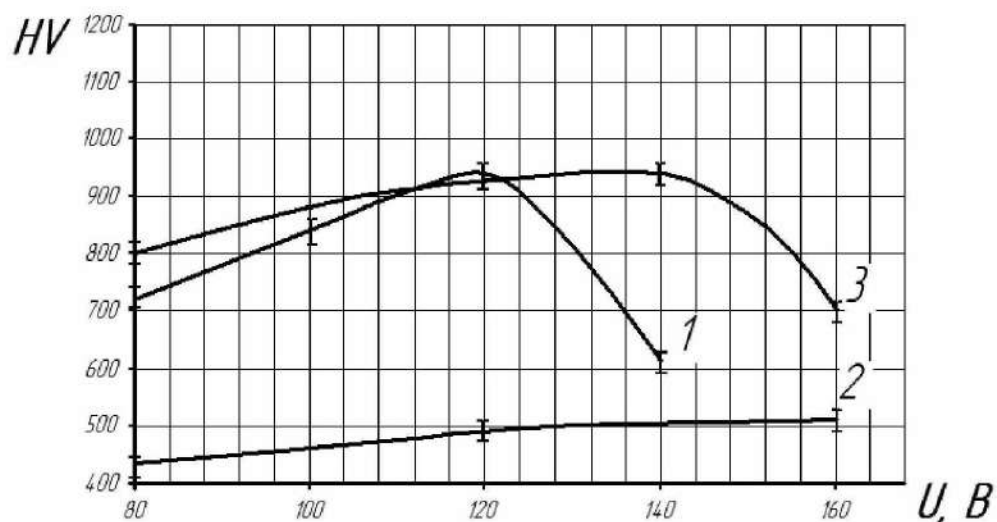


Рисунок 4.2 – Залежність мікротвердості поверхневих шарів, модифікованих різними електродами, від анодно-катодної напруги при $C = 34$ мкФ;
1 – T15K6; 2 – Ш2; 3 – IMX2

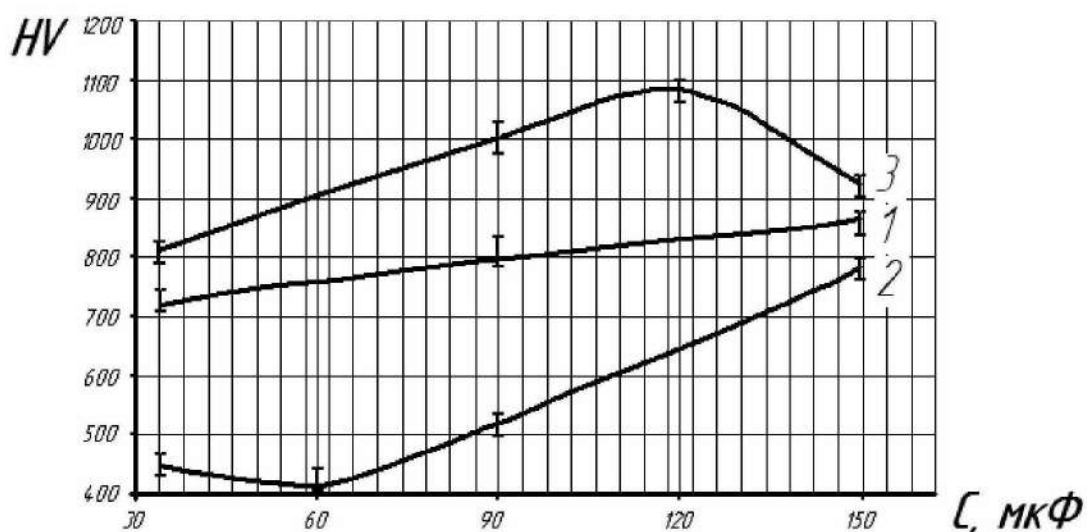


Рисунок 4.3 – Залежність мікротвердості поверхневих шарів, модифікованих різними електродами, від розрядної ємності при $U = 80$ В;
1 – T15K6; 2 – Ш2; 3 – IMX2

З графіків на рисунках 4.2 та 4.3 також видно, що найбільше підвищення мікротвердості забезпечується при ЕІО електродом ІМХ2 з анодно-катодною напругою $U = 140$ В і ємністю $C = 120$ мкФ. При обробці електродом Т15К6 максимальна мікротвердість отримана при напрузі $U = 120$ В і ємності $C = 150$ мкФ. Подальше збільшення напруги призводить до різкого зниження мікротвердості поверхневого шару. Застосування електрода Ш2 дозволяє підвищити мікротвердість формованого покриття в меншій мірі, ніж застосування інших легуючих електродів.

Аналіз експериментальних залежностей мікротвердості покриттів сталевих зразків від напруги і розрядної ємності конденсаторів, показав, що рівень енергетичного впливу, який визначається значеннями цих параметрів, справляє неоднозначний вплив на механічні властивості (мікротвердість) утвореного покриття і тонкого поверхневого шару.

З метою визначення характеру сукупного впливу енергетичних режимів обробки на мікротвердість модифікованих поверхонь і покриттів були побудовані залежності $HV = f(E)$ (рисунок 4.4). Для цього були розраховані значення енергії імпульсу для всіх режимів обробки електродами ІМХ2 і Ш2. Розрахунок енергії імпульсу проводився за формулою:

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (4.1)$$

де C – розрядна ємність конденсаторів, мкФ;

U – анодно-катодна напруга, В.

Результати розрахунку енергії та отриманих на цих режимах значень мікротвердості наведені в таблиці 4.1.

Графіки на рисунку 4.4 наочно показують, що найбільш високі значення мікротвердості покриттів отримані на сталевих зразках, оброблених електродом ІМХ2 (крива 1). Крім того, із збільшенням енергії імпульсу мікротвердість

поверхневого шару зразків збільшується до значення $E = 0,29$ Дж незалежно від матеріалу легуючого електрода. При подальшому підвищенні енергії мікротвердість незначно знижується або залишається на колишньому рівні. Ці результати можна пояснити виходом на стаціонарний режим з приблизно однаковою інтенсивністю активаційних і дисипативних енергетичних процесів у системі «легуєчий електрод – оброблювана деталь».

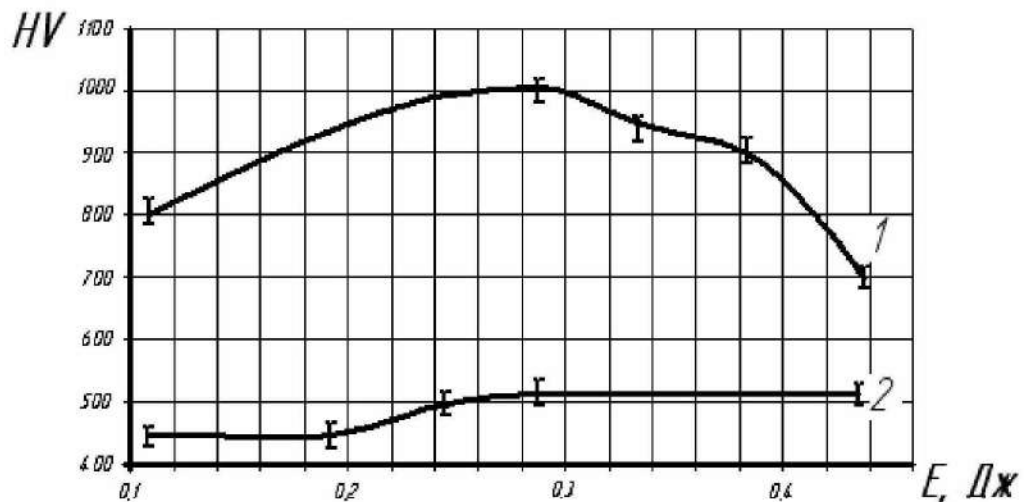


Рисунок 4.4 – Залежність мікротвердості покриттів сталевих зразків від енергії імпульсу: 1 – IMX2; 2 – Ш2. Мікротвердість основи – HV 248

Таблиця 4.1 – Мікротвердість покриттів, отриманих ЕІО на сталі 15ХГН2ТА при різному рівні енергії імпульсу (мікротвердість основи HV 248)

ЛЕ	IMX2					Ш2				
Енергія імпульсу, E, Дж	0,11	0,29	0,33	0,38	0,44	0,11	0,29	0,33	0,38	0,44
Мікротвердість, HV, $\pm 1\%$	800	1009	930	901	690	416	447	502	508	511

Таким чином встановлено, що ЕІО сталевих зразків електродом ІІ2 дозволяє підвищити мікротвердість формованого покриття приблизно в 1,7-3 рази порівняно з основою, але в меншій мірі, ніж при обробці електродами інших марок. ЕІО іншими електродами (на основі карбіду вольфраму з мікролегуючими елементами) забезпечує підвищення мікротвердості поверхневих покриттів на сталі 15ХГН2ТА приблизно в 2,8-4 рази порівняно з основою. Найбільше збільшення мікротвердості забезпечується при ЕІО легуючим електродом ІМХ2 з енергією імпульсу $E = 0,29$ Дж. Максимальна товщина покриття 210 мкм також отримана при обробці цим легуючим електродом. Отже, отримані результати дозволяють рекомендувати ЕІО вищевказаними легуючими електродами для підвищення мікротвердості поверхневих шарів і відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин.

4.2 Оптимізація технологічних режимів ЕІО

Згідно з методикою, викладеною у розділі 3, триботехнічні властивості структур, що формуються на сталевий основі при ЕІО, оцінювали за швидкістю зношування полімерних контрзразків при терті ковзання по модифікованій поверхні сталевих зразків. Сталеві зразки обробляли електродом ІМХ2. Цей електрод обраний за результатами попередніх досліджень. Оцінку швидкості зношування проводили за величиною масового зносу полімерних контр зразків.

З метою наочного уявлення про вплив рівня енергетичного впливу на зносостійкість (швидкість зношування) пари тертя за результатами випробувань були побудовані залежності $J = f(E)$ (рисунок 4.5).

Отримані залежності дозволяють зробити висновок, що зі збільшенням енергії імпульсу при ЕІО сталевих зразків електродом ІМХ2 швидкість зношування полімерного контр зразка знижується в 1,2-1,3 рази. При цьому збільшення тривалості обробки сталевих зразків має незначний вплив на швидкість зношування полімерних контр зразків (~3%). Також було показано, що швидкість

зношування металополімерної пари тертя із зразками, модифікованими ЕІО, менше, ніж цей параметр у пари тертя з загартованим зразком, приблизно в 1,6-2 рази (таблиця 4.2).

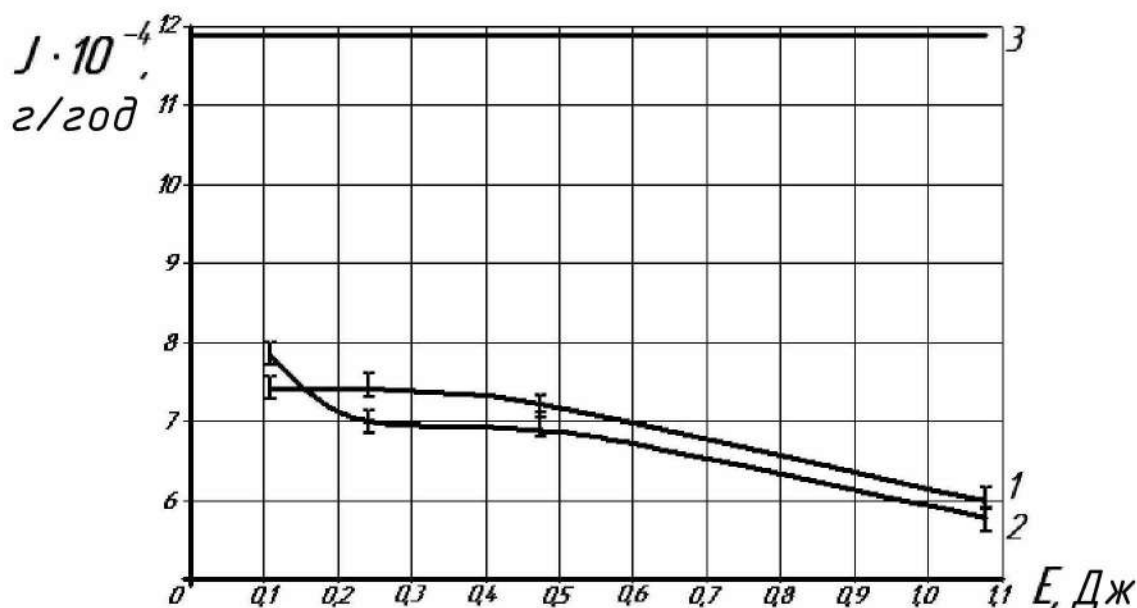


Рисунок 4.5 – Залежність швидкості зношування полімерних контр зразків від енергії імпульсу при ЕІО зразків із сталі 15ХГН2ТА: 1 – зразки з тривалістю ЕІО 4 хв/см²; 2 – зразки з тривалістю ЕІО 5 хв/см²; 3 – зразок загартований без ЕІО (таблиця 4.2)

З метою оптимізації режимів ЕІО був розроблений і реалізований план факторного експерименту $N = 2^3 = 8$. Згідно з планом незалежними факторами були прийняті: X_1 – анодно-катодна напруга, В; X_2 – розрядна ємність конденсаторів, мкФ; X_3 – тривалість обробки одиниці поверхні, хв/см². Граничні значення вибиралися, виходячи з результатів попередніх експериментів. Умови експерименту та отримані середні значення параметра оптимізації – швидкості зношування наведено в таблиці 4.2.

При обробці результатів експериментів була прийнята математична модель у вигляді поліному другого порядку, що враховує головні ефекти та ефекти взаємодії:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_{ij} . \quad (4.2)$$

Таблиця 4.2 – Умови експерименту та середні значення швидкості зносу

№ дослід у	Технологічні режими (незалежні фактори)			Досліджуваний параметр оптимізації
	Анодно- катодна напруга, U, В	Ємність конденсаторів, С, мкФ	Тривалість обробки, t, хв/см ²	Швидкість зношування, J·10 ⁻⁴ , 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

Коефіцієнти рівняння регресії, розраховані за експериментальними даними, наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти рівняння регресії

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
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:

$$Y = 6,91 - 0,41X_1 - 0,44X_2 - 0,09X_3 - 0,16X_1X_2 - 0,11X_1X_3 - 0,04X_2X_3 + 0,14X_1X_2X_3. \quad (4.3)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента показала, що при рівні значущості 0,05 коефіцієнти b_3 , b_{13} , b_{23} , b_{123} незначущі. Отже, остаточне рівняння регресії для параметра оптимізації Y має вигляд:

$$Y = 6,91 - 0,41X_1 - 0,44X_2 - 0,16X_1X_2. \quad (4.4)$$

Аналіз отриманого рівняння дозволяє зробити наступні висновки про вплив технологічних режимів ЕІО на швидкість зношування. При збільшенні напруги X_1 і розрядної ємності конденсаторів X_2 швидкість зношування зменшується. Спільний вплив напруги та розрядної ємності також викликає зменшення швидкості зношування. Отже, для зменшення швидкості зношування необхідно збільшувати розрядну ємність конденсаторів і анодно-катодну напругу. При цьому, можна зазначити, що найбільший вплив на швидкість зношування має ємність конденсаторів X_2 установки ЕІО. Вплив анодно-катодної напруги X_1 трохи менший X_2 , а тривалість обробки X_3 практично не впливає на швидкість зношування, оскільки коефіцієнт b_3 виявився незначущим. Незначний вплив коефіцієнта b_3 на швидкість зношування в отриманому рівнянні регресії корелює з експериментальними залежностями (рисунок 4.5) впливу енергії імпульсу на швидкість зношування при різній тривалості ЕІО сталевих зразків.

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

Аналіз результатів першої серії дослідів показує, що найбільш ефективними енергетичними параметрами є анодно-катодна напруга і ємність конденсаторів установки ЕІО. За цими параметрами обрано напрямки руху в область оптимуму. Рух у багатовимірному просторі здійснюється дискретно, кроками. Для

знаходження оптимуму використовували один з градієнтних методів оптимізації – метод «крутого сходження» (Бокса-Уілсона), у якому використовується градієнтний метод оптимізації в поєднанні з факторним експериментом для локального опису поверхні відгуку.

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

На рисунку 4.6 показана геометрична інтерпретація визначення напрямку руху при методі «крутого сходження» для функції типу $y = f(x_1, x_2)$.

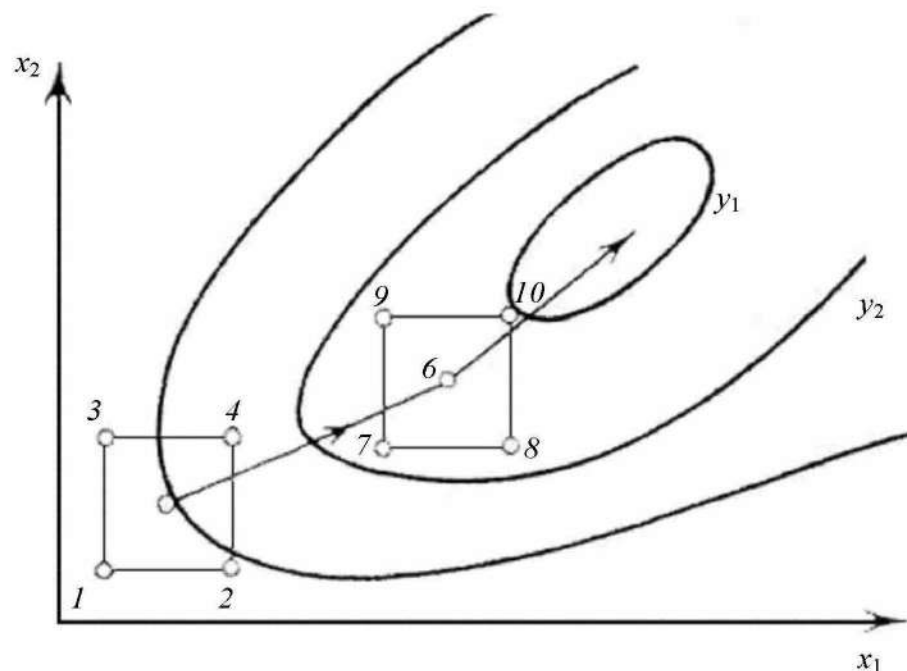


Рисунок 4.6 – Геометрична інтерпретація визначення напрямку руху в область оптимуму методом «крутого сходження»

Поверхня відгуку в околі деякої точки, досить віддаленої від точки екстремуму, можна апроксимувати гіперплощиною:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i . \quad (4.5)$$

Значення коефіцієнтів рівняння b_0 і b_1 отримані при обробці результатів експерименту, проведеного за планом повного факторного експерименту. Величини коефіцієнтів визначають нахили гіперплощини, тобто складові градієнти по відповідним координатним осям:

$$b_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} . \quad (4.6)$$

Таким чином, задача визначення найкоротшого шляху до екстремуму функції відгуку полягає у знаходженні розташованої на гіперплощини відрізка лінії l , що виходить з початкової точки і забезпечує найбільш швидку зміну функції відгуку:

$$\frac{\partial y}{\partial l} \rightarrow \max . \quad (4.7)$$

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

$$\left(\frac{\partial y}{\partial l} \right)_m = \left| g_a \quad y \right|_x . \quad (4.8)$$

Якщо фактори X_i змінювати пропорційно значенням відповідних їм коефіцієнтів, то буде забезпечено рух уздовж лінії «крутого сходження». Значення факторів оптимізаційного дослідження наведені у таблиці 4.4.

З метою руху по лінії «крутого сходження» визначали крок z руху по кожному фактору та розраховували величину ΔX :

$$z = b_i \cdot \Delta X_i \cdot \lambda. \quad (4.9)$$

$$\Delta X_i = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}. \quad (4.10)$$

Таблиця 4.4 – Значення факторів оптимізаційного дослідження

Параметри дослідження	Незалежні фактори	
	X ₁ Анодно-катодна напруга, В	X ₂ Розрядна ємність конденсаторів, мкФ
Коефіцієнти рівняння, b _i	-0,41	-0,44
Добуток, b _i · ΔX _i	8,2	25,52
Крок, z (округлений)	8	23

Далі проводили «уявні» дослід, які полягали в обчисленні значень функції відгуку в точках факторного простору, що лежать на шляху до оптимуму, тобто здійснювали уявний рух до оптимуму. У таблиці 4.5 представлені результати руху по лінії «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 в «уявних» досліді визначали за формулою, г/год:

$$J = (8,39 - 0,0078U + 0,0062C - 0,000138UC) \cdot 10^{-4}, \quad (4.11)$$

де U – анодно-катодна напруга, В;

C – розрядна ємність конденсаторів, мкФ.

Таблиця 4.5 – Умови та результати оптимізаційного дослідження при рухові лінією «крутого сходження»

Досліди на лінії крутого сходження	Незалежні фактори		Параметр оптимізації, $J \cdot 10^{-4}$, г/год
	X_1 Напруга в імпульсі, В	X_2 Розрядна ємність конденсаторів, мкФ	
1 Уявний	108	115	6,55
2 Реалізований	116	138	6,13
3 Реалізований	124	161	5,67
4 Реалізований	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 в уявному досліді №7. Як видно з таблиці 4.5, 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 досягнута, і подальше дослідження слід припинити.

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

Таким чином, вищевказаний технологічний режим доцільно рекомендувати для ЕІО деталей металополімерних пар тертя в якості оптимального. Одержуване 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 до розділу 4

1 Товщина утвореного покриття залежить від матеріалу легуючого електрода; найбільша товщина покриття отримана при обробці електродом ІМХ2, яка в 4 рази більше, ніж при обробці серійним електродом Т15К6. З підвищенням енергетичних режимів ЕІО товщина покриття на сталі 15ХГН2ТА збільшується незалежно від матеріалу легуючого електрода: на 48,6% при обробці ЛЕ Т15К6, на 75% при обробці ЛЕ ІМХ2, на 83,3% при обробці ЛЕ Ш2, що дозволяє рекомендувати ЕІО вищевказаними легуючими електродами для відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин.

2 Мікротвердість покриттів залежить від режимів ЕІО і матеріалу електрода; залежності мікротвердості покриттів, отриманих електродами Т15К6 і ІМХ2, від напруги і розрядної ємності конденсаторів мають екстремальний характер з максимумами при напрузі $U = 120-140$, ємності $C = 120$ мкФ і при обробці електродом ІМХ2 досягає НV 900-1080, що в 2,8-4,0 рази перевищує мікротвердість основи.

3 ЕІО сталевих поверхонь призводить до значного в 1,6-2,0 рази зниження швидкості зношування полімерних контр зразків з ПКМ на основі ПТФЕ при терті їх по модифікованому сталевому зразку. Дослідження та оптимізація режимів ЕІО методом «крутого сходження» показали, що оптимальними режимами, що забезпечують найбільше зниження швидкості зношування, є режими обробки при напрузі $U = 145-150$ В, ємності конденсаторів $C = 225-230$ мкФ протягом 3-4 хвилин.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Перелік основних небезпек під час роботи на технологічному обладнанні

Складемо перелік основних небезпек під час роботи на верстатах у вигляді таблиці 5.1 для майбутнього уникнення або усунення нещасних випадків на виробництві.

Таблиця 5.1 – Перелік основних небезпек, джерел, діяльності та зон виникнення

№ з.п.	Небезпека	Джерело	Діяльність, що викликала небезпеку	Зона виникнення
1	2	3	4	5
Механічні небезпеки				
1	Небезпека, викликана масою та швидкістю елементів обладнання (кінетичною енергією при контрольованому та неконтрольованому русі).	Рух елементів верстатів.	Налагодження, обробка та технічне обслуговування.	На верстаті та поруч із ним.

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
2	Небезпека роздавлювання та зрізання.	Пристосування для кріплення оброблюваної деталі. Пристрої автоматичної зміни оброблюваної деталі (електроду-інструменту). Рухомі та обертові елементи верстату.	Завантаження (розвантаження), переорієнтація оброблюваної деталі. Зміна оброблюваної деталі (електроду-інструменту).	Між затискним пристосуванням та оброблюваною деталлю. Обертання оброблюваної деталі-інструменту.
3	Небезпека захоплення або замотування.	Пристрій ручної або автоматичної заміни оброблюваної деталі (електроду-інструменту), обертання шпинделя та подача ЕІ.	Ручна або автоматична заміна деталі (ЕІ) і обертання шпинделя.	Між затискним пристосуванням та оброблюваною деталлю.

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
4	Небезпека, зумовлена викидом рідини.	Викид із гідравлічної системи, протікання.	Налагодження, спостереження за обробкою, технічне обслуговування.	На верстаті та поруч із ним.
Електричні небезпеки				
5	Контакт людини із деталями, що опинилися під напругою внаслідок несправного стану (непрямий контакт).	Деталі верстату, що за звичайної роботи не знаходяться під напругою.	Технічне обслуговування та ремонт верстату.	На верстаті та біля нього, пошкоджена ізоляція електричних кабелів та обладнання.
6	Небезпека, що викликана матеріалами або речовинами (чи їх складовими частинами), що оброблюються на верстатах або застосовуються в них (небезпека від контакту або вдихання парів шкідливих речовин, газів, туману, диму або пилу; загоряння чи вибух).	Викид рідини, пари, туману, диму (газоподібні продукти розкладання, іскріння, недостатній рівень робочої рідини у робочій ванні верстату, негаразди у подачі електро- та гідроенергії).	Під час процесу ЕЕО, налагодження, технічного обслуговування та керування верстатом.	На верстаті та біля нього.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
7	Непередбачені запуски, повороти, прокручування (подібні збої у роботі). Відновлення енергопостачання після збою. Зовнішні впливи на електричне обладнання.	Самовільне увімкнення вузлів верстату та (або) обладнання після відновлення електропостачання. Електромагнітні перешкоди, що порушують роботу верстату та (або) електрообладнання.	Після відновлення енергопостачання. Виробничий процес , налагодження і технічне обслуговування.	На верстаті та поряд із ним.
8	Порушення енергопостачання	Зменшення зусиль закріплення оброблюваної деталі, довільне переміщення елементів верстату під дією інерції, сили тяжіння тощо.	Усі режими роботи верстату.	На верстаті та поряд із ним.

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
9	Збій у роботі системи управління верстатом	Механічні небезпеки, викликані рухом частин верстату, електричні небезпеки та (або) пожежа.	Під час роботи, налагодження, чищення, технічного обслуговування та ремонту.	На верстаті
10	Ковзання та непередбачене падіння людей (поблизу верстатів).	Викид чи розливання робочої рідини або мастила, замикання вільної або вмонтованої у підлогу проводки.	Під час та після обробки та технічного обслуговування.	Великі робочі резервуари, слизька підлога та швидкорухомі частини верстату; зона навколо верстату.

5.2 Заходи та засоби захисту від ядерного вибуху

Найважливіша зі зброї в арсеналах головних воєнних держав – ядерна, а також її носії. Офіційно її достатньо у великій кількості знаходиться на озброєнні п'яти держав (США, росія, Китай, Великобританія та Франція). Відносно невелику кількість має Ізраїль, Індія, Пакистан, Північна Корея.

Ядерною зброєю називають бойові засоби, що вражають дією внутрішньоядерної енергії, яка вивільняється в результаті вибухових процесів або синтезу ядер хімічних елементів. В процесі розвитку фізичних явищ, що

супроводжують ядерний вибух виникають такі фактори впливу: повітряна ударна хвиля, радіація, радіоактивне забруднення місцевості й електромагнітний імпульс.

Повітряна ударна хвиля – це область різкого і значного за величиною стиснення середовища. Воно розповсюджується від центру вибуху з надзвуковою швидкістю.

Захист від ураження повітряною хвилею забезпечують ізоляцією людини чи об'єкту від дії надлишкового тиску та зменшення сили швидкісного напору. Найбільш надійний захист забезпечують міцні споруди закритого типу, заглиблені в землю. Відкриті споруди(траншеї, ходи сполучення, окопи, щілини) здатні зменшити радіус зони ураження ударною хвилею в 1,4 раза, а площі ураження і втрати військ та населення приблизно у 2-3 рази.

Дію швидкісного напору також знижують різні заглиблення (кювети, ями, вирви) або невисокі міцні стіни, пні та інші предмети, за якими можна сховатися. Захисні властивості також мають танки, інша броньована техніка.

Світлове випромінювання ядерного вибуху – це потік променистої енергії в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях спектру електромагнітних хвиль. Джерелом світлового випромінювання є область з найбільш яскравим забарвленням.

Основним видом ураження при світловому випромінюванні вважають теплові ураження, що характеризуються ступенем опіку (визначається глибиною термічного ураження шкіри) та ступенем тяжкості термічного ураження (залежно від глибини та площі опіку, а також його локації).

Дії світлового ураження на об'єкти можуть призвести до їх займання та утворення осередків пожеж.

Вражаюча дія радіації, що проникає, на неземні об'єкти продовжується протягом 15-25 секунд з моменту вибуху. Суть дії ураження радіацією на людину полягає в іонізації атомів та молекул, що входять до складу тканини організму, в результаті чого можливе виникнення променевої хвороби. Ступінь тяжкості

захворювання визначається насамперед дозою опромінення, що отримала людина, і характером опромінення (загальне або лише деякими ділянками тіла).

Для захисту від радіації можуть бути використані захисні властивості різних споруд, бойової техніки, матеріалів та інше. Гамма-випромінювання більш ефективно послаблюють матеріали з великою питомою вагою. Серед них, свинець, сталь, бетон. Найбільшу кратність послаблення від радіації мають фортифікаційні споруди (перекриття траншей, сховища). В якості засобів, що послаблюють дію іонізуючого випромінювання на організм людини, можуть бути використані різні протирадіаційні препарати (радіопротектори).

Після випадку продуктів ядерного вибуху на місцевість виникає слід радіоактивного забруднення. Окрім місцевості, забрудненню піддаються техніка, озброєння, особовий склад. Забрудненими можуть бути вода, продукти харчування, повітря. Потужні дози випромінювання радіоактивного забруднення можуть спостерігатися як в районі вибуху, так і на значній відстані від нього.

При перебуванні людини на забрудненій території іонізуючі випромінювання впливають на організм людини і викликають його ураження. Така дія може проявлятися як в результаті зовнішнього опромінювання (радіоактивні речовини знаходяться поза організмом), так і при потраплянні радіоактивних речовин всередину організму через органи дихання, травний тракт, шкіру та відкриті рани (внутрішнє опромінення). В результаті таких дій, як і при проникаючій радіації, може розвиватися променева хвороба. Ступень враження біологічної тканини визначається головним чином зовнішнім опроміненням.

5.3 Економічний ефект від упровадження електроіскрової обробки

Численні публікації у вітчизняній та зарубіжній літературі з ЕІО свідчать про високу ефективність та універсальність методу, що набуває особливого значення в сучасних умовах для вітчизняних промислових і ремонтних підприємств.

Широке ефективне застосування ЕІО базується на основних двох якостях:

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- здатності формувати на оброблюваних виробах покриття (поверхневі шари) із заданими експлуатаційними властивостями шляхом застосування більшості струмопровідних матеріалів з притаманними їм властивостями. Цим досягається збільшення зносо-, жаро-, ерозійної, корозійної стійкості і поліпшення інших властивостей оброблених поверхонь;

- можливості керування товщиною цих покриттів – від декількох мікрометрів до 0,5 мм (а при використанні певних технологій – до 5-10 мм і більше) шляхом зміни електричних режимів обробки і її тривалості.

Поряд з можливістю формування покриттів з характеристиками широкого діапазону значень, метод ЕІО також має низку переваг, що визначають його успішне використання для рішення виробничих проблем:

- можливість локального формування покриттів у суворо вказаних місцях радіусом від часток міліметра і більше, не захищаючи при цьому решту поверхню;

- висока адгезія електроіскрового покриття з основним матеріалом;

- відсутність нагріву і деформацій виробу в процесі обробки;

- порівняльна простота технології, не потрібно спеціальної попередньої обробки поверхні;

- висока надійність обладнання і простота його обслуговування, воно малогабаритне і ремонтпридатне;

- низька енергоємність ручних та механізованих процесів ЕІО;

- високий коефіцієнт переносу електродного матеріалу (60-80%).

Широкі межі керованих технологічних параметрів процесу ЕІО і характеристик утворених покриттів є основою високої універсальності цього методу обробки, застосовуваного в прокатному виробництві, в машинобудуванні при виготовленні нових деталей (зміцнювальні покриття та покриття зі спеціальними властивостями робочих поверхонь прокатного інструменту, деталей машин, ріжучих інструментів, штампового оснащення), а також у ремонтному виробництві енергетичних, видобувних та переробних, машинобудівних підприємств, підприємств легкої промисловості, агропромислового комплексу,

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспорту та інших при відновленні зношених деталей, які втратили свої розміри в процесі експлуатації (відновлюють покриття на зовнішніх і внутрішніх поверхнях деталей і інструментів).

Відзначимо, що в зарубіжних країнах цей метод використовується в більшій мірі для нанесення покриттів з ефектом зміцнення і зі спеціальними властивостями, причому, в першу чергу, в оборонних галузях, у т. ч. при виробництві космічної та авіаційної техніки.

При призначенні технології нанесення зміцнювальних електроіскрових покриттів і подальшої обробки враховуються умови роботи об'єктів зміцнення (інструментів, деталей), тобто фактори, що ініціюють їх зношування робочих поверхонь. Зазвичай ці фактори – високі тиски, температури, велика циклічність навантаження робочих поверхонь та ін. У цих випадках при зміцненні поверхонь зазвичай застосовуються електроди з металокерамічних твердих сплавів типу ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4), ВК (ВК4, ВК6, ВК8), ТТК (ТТ7К12, ТТ21К10), СТИМ (СТИМ-2, -3Б, -3БООАн, -4, -50НА) та інші, враховуючи ті, що містять нанодисперсні добавки, а також графіти дрібнозернистої фракції.

Розрахунок економічного ефекту від впровадження електроіскрової обробки валків здійснимо для умов цеху холодного прокатування ПАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча».

Економічна ефективність використання у чорній металургії нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (5.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції на 4-ох клітковому стані, т, $A_2 = 1000$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

К – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн.,
К = 2310000 грн. (за даними підприємства).

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зменшення витрати прокатних валків на 0,1 кг/т прокату.

$$\Delta C = 0,1 \cdot 20200 = 2020 \text{ грн. / т ,}$$

де 20200 – середня вартість 1 т валків холодного прокату, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок збільшення доплат під час виробництва холоднокатаного листа та зменшення знижок під час виробництва гарячекатаного плавленого листа

$$\Delta Ц = \Delta Ц' + \Delta Ц'', \quad (5.2)$$

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за підвищену групу оздоблення поверхні холоднокатаних листів за рахунок даних заходів, грн./т, $\Delta Ц' = 2,9 \text{ грн. / т ;}$

$\Delta Ц''$ – середнє зменшення знижок за рахунок зменшення гарячекатаних листів із відбитками, грн./т, $\Delta Ц'' = 2,02 \text{ грн. / т .}$

$$\Delta Ц = 2,9 + 2,02 = 4,92 \text{ (грн./т).}$$

Відповідно до формули (5.1) маємо наступне:

$$E = (2020 + 4,92) \cdot 1000 - (0,15 + 0,1) \cdot 2310000 = 1447420 \text{ (грн.).}$$

Отже, економічний ефект від впровадження електроіскрової обробки під час виготовлення деталі становитиме 1,45 млн. грн.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 5

Наведено перелік основних небезпек при роботі на технологічному обладнанні. Приділено увагу питанням захисту від ядерного вибуху. Розраховано економічний ефект від упровадження електроіскрової обробки.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської роботи зроблено наступні висновки.

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

2 Встановлено, що товщина формованого покриття залежить від хімічного складу матеріалу легуючого електрода і 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 не залежно від матеріалу легуючого електрода, що дозволяє рекомендувати ЕІО електродами Т15К6, ІМХ2, ІІ2 для підвищення зносостійкості і відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя сільськогосподарських машин. Встановлено, що мікротвердість покриттів залежить від режимів електроіскрової обробки і матеріалу легуючого електрода; експериментальні залежності мікротвердості покриттів від напруги і розрядної ємності конденсаторів мають екстремальний характер з максимумами при напрузі $U=120-140\text{В}$ і розрядної ємності $C=120\text{ мкФ}$.

3 Методами планування факторного експерименту і статистичної обробки отриманих даних досліджено вплив режимів ЕІО сталевих поверхонь на зносостійкість металополімерної трибосистеми, а також встановлені оптимальні режими обробки: напруга $U = 145-150\text{ В}$, ємність конденсаторів $C = 225-230\text{ мкФ}$, тривалість обробки $t = 3-4\text{ хв/см}^2$, що забезпечують найбільше

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зниження швидкості зношування полімерного контр-тіла і рекомендовані при розробці технологічних процесів електроіскрової обробки.

4 Зазначено основні види небезпек у цеху. Приділено увагу захисту від ядерного вибуху. Розраховано економічний ефект від упровадження виду обробки.

					КРМ.133ГМмд_21.08.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		