

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

Дослідження експлуатаційних характеристик покриттів отриманих методом електроіскрового легування

Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25 24369. 000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2-го курсу
група МТВАмз 24-1
Шифр


Підпис

Ігор ФОМЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н. доцент
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

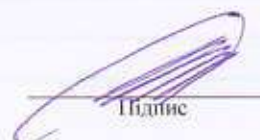
Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег МАКОВКІН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 9.12 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

13 жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Фоменку Ігору Вікторовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Дослідження експлуатаційних характеристик покриттів отриманих методом електроіскрового легування».

керівник роботи Бабак Олег Петрович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд; 2. Експериментальне дослідження процесу електроіскрового легування; 3. Забезпечення якості при електроіскровому легуванні. Обробка результатів за допомогою статистичних методів; 4. Дослідження впливу покриття на виникаючі напруги при фрезерній обробці

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти дослідів кваліфікаційної роботи

№ завдання	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата викончі завдання: _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Літературний огляд	30.09.2025	
2	Технологічний розділ	25.10.2025	
3	Дослідницький розділ	15.11.2025	
4	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки	22.11.2025	
5	Оформлення презентації кваліфікаційної роботи	1.12.2025	
6	Нормоконтроль кваліфікаційної роботи	5.12.2025	
7	Підписання розділів. Затвердження дати захисту	5.12.2025	

Студент

Керівник роботи


Підпис


Підпис

Ігор ФОМЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Випускни
Фоменком Іг
отриманих ме
Проведе
інструмент
економічно
продовження
Багато
процеси, які
контролюють
Переваж
катоді повер
властивостям
застосовують
Екструзії.
Покритт
матеріалом о
Дослідж
методом еле
ріжучого інст
на коефіцієнт
Зносост
шару, оброб
досліджень з
мало.
Мета д
Дослід
підвищення з
Завдан
1. Вигот
режими та ча
2.
шорсткості в
електроіскро
3. Пров
допомогою с
4. Пр
ріжучому інс
Квалі
використовує

Ключові сл
ЗНОСОСТІЙ
ІНСТРУМЕН

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційну роботу (магістерську роботу) виконано студентом гр. МТВАмз 24-1 Фоменком Ігорем Вікторовичем на тему: «Дослідження експлуатаційних характеристик покриттів отриманих методом електроіскрового легування».

Проведений літературний огляд показав, що нанесення захисних покриттів, як на ріжучий інструмент, так і на деталі машин, методом електроіскрового легування, є одним з найдієвіших та економічно виправданих методів як для підвищення продуктивності обробки різанням, так і для продовження терміну служби деталей машин.

Багато дослідників говорять про те, що в процесі ЕІЛ протікають складні фізико-хімічні процеси, які зрештою призводять до перенесення матеріалу електрода (анода) на катод і контролюються балансом тепла, що виділяється внаслідок електричних розрядів.

Переважне перенесення еродованого матеріалу анода на катод забезпечує формування на катоді поверхневого шару із заданими експлуатаційними характеристиками та фізико-хімічними властивостями. Залежно від призначення покриття та виду обробки як легуючий електрод застосовуються різні матеріали. Доцільно використовувати електроди, отримані методом СВС-Екструзії.

Покриття, яке наноситься методом електроіскрового легування, міцно з'єднується з матеріалом основи за рахунок дифузії.

Дослідження, проведені багатьма авторами, показують що шорсткість нанесеного покриття, методом електроіскрового легування виходить вище, ніж це прийнято у робочих поверхнях ріжучого інструменту, що може негативно позначитися, як на шорсткість оброблюваної деталі, так і на коефіцієнт тертя при обробці різанням.

Зносостійкі покриття істотно впливають на параметри якості формованого поверхневого шару, оброблюваних деталей, знижуючи показник шорсткості, залишкові напруги. Однак досліджень з вивчення впливу захисних покриттів на різальний інструмент у процесі різання дуже мало.

Мета дослідження:

Дослідження характеристик покриття, отримане методом електроіскрового легування для підвищення зносостійкості різального інструменту.

Завдання дослідження:

1. Виготовити пластину та методом електроіскрового легування, змінюючи електричні режими та частоту вібрації електрода нанести на її поверхню покриття.
2. Виміряти шорсткість зразка з покриттям та отриманими даним побудувати залежності шорсткості від частоти вібрації електрода, розробити рекомендації щодо застосування методу електроіскрового легування для зміцнення різального інструменту та деталей машин.
3. Провести аналіз електроіскрового легування, опрацювавши результати досліджень за допомогою статистичних методів.
4. Провести дослідження щодо впливу нанесеного покриття на виникнення напруги в ріжучому інструменті на прикладі конкретної операції в програмному модулі «ANSYS Workbench».

Кваліфікаційна робота містить 81 сторінку машинописного тексту, а також список використаних джерел із 33 найменувань, вступ, чотирьох розділів та висновок.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ, НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ, ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРИТТІВ, РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ.

вдання
рийняв

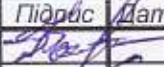


Примітка

ІКО

АК

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	9
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ.....	38
2.1 Вплив режимів електроіскрового легування на шорсткість одержуваного покриття.....	38
2.2 Методика проведення експерименту.....	39
2.3 Результати, обговорення та висновки з експериментальної частини. Рекомендації щодо застосування методу електроіскрового легування.....	46
РОЗДІЛ 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ЛЕГУВАННІ. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ.....	49
3.1 Метрологічне та технологічне забезпечення якості.....	49
3.2 Обробка результатів лабораторних досліджень статистичними методами.....	62
3.3 Аналіз процесу електроіскрового легування за допомогою контрольних карток.....	64
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОКРИТТЯ НА ВИНΙΚАЮЧІ НАПРУГИ ПРИ ФРЕЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ.....	68
4.1 Методика проведення дослідження.....	69
4.2 Визначення сил різання.....	72
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ.....	81

КРМ МТВА 25.24369.000 ПЗ									
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Дослідження експлуатаційних характеристик покриттів отриманих методом електроіскрового легування	Літ.	Арк.	Акрюшів	
Розроб.		Фоменко						4	81
Перевір.		Бабак							
Реценз.									
Н. Контр.		Маковкін							
Затверд.		Діхач							
						ХНУ група МТВАмз 24-1			

ВСТУП

Машинобудування — це галузь промисловості, яка тісно пов'язана з виготовленням деталей, вузлів машин і устаткування різного призначення; інтенсивність розвитку цієї галузі значною мірою залежить від того, наскільки добре розвивається весь народногосподарський комплекс. Машинобудівні, інструментальні та інші галузі значною мірою залежать від якості застосовуваних деталей і різальних інструментів. Основні характеристики деталей і різальних інструментів залежать від їх призначення та повинні гарантувати надійність, продуктивність, економію, якість обробки та продуктивність.

На сьогоднішній день ефективність потокових і автоматизованих ліній значною мірою залежить від стійкості різальних інструментів. Поломки інструментів збільшують позациклові втрати часу, що призводить до нижчої ефективності використання обладнання.

Наразі ріжучі інструменти, які використовуються в масовому виробництві, часто не задовольняють вищих вимог. Це пов'язано з тим, що використання складнофасонного, комбінованого ріжучого інструменту з різних твердих сплавів, кераміки та штучних надтвердих матеріалів значно збільшує собівартість операцій. У виробництві все частіше зустрічаються різальні інструменти зі змінними ріжучими пластинами, виготовлені з тих же твердих сплавів, швидкорізальної сталі та матеріалів, які є надтвердими. Але, незважаючи на те, що це знижує вартість ріжучих інструментів, пластини теж довговічні. Підвищення стійкості, довговічності, надійності деталей і ріжучих інструментів, які працюють у умовах високих швидкостей різання, навантажень, температур і впливів різних робочих середовищ можна досягти різними способами. Наприклад, можна створити нові конструкційні матеріали з високими показниками надійності та використовувати їх у машинобудівній, інструментальній та інших сферах, або впровадити їх у виробництво.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

Використання різальних інструментів з покриттям збільшує швидкість різання та ймовірність безвідмовного функціонування. Багато вчених і фахівців, зокрема Б.Р. Лазаренко, Н.І. Лазаренко, Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, А.Є. Гітлевич, В.М. Гадалов та багато інших у своїх працях за допомогою аналізу теоретичних та експериментальних досліджень показали, що нанесення зносостійких покриттів на поверхні деталей та ріжучих інструментів дозволяють значно підвищити рівень техніко-економічних показників різального інструменту та інших деталей, що працюють в умовах зносу.

Як наслідок різноманітності методів підвищення працездатності, а також якості ріжучого інструменту, існує широкий спектр технологій зміцнення ріжучого інструменту (рисунок 1.1) [12, 44].



Рисунок 1.1 - Технології зміцнення різального інструменту

Незважаючи на широкий спектр видів зміцнення різального інструменту, більшість машинобудівних, інструментальних та інших галузей використовують такі види термічної обробки, як відпустка, загартування та цементация. Але сьогодні в умовах масового виробництва метод іонно-плазмового нанесення (напилення) покриттів починають використовувати все частіше. Цей метод

нанесення захисного покриття значно підвищує стійкість інструменту. Але цей метод має деякі суттєві недоліки. Вони включають дороге обладнання та те, що розмір камери часто обмежує розмір виробу, якому потрібно нанести покриття. Крім того, електролітичний метод призводить до того, що захисне покриття доводиться знімати і знову наносити після підготовки поверхні. Причому поверхні поблизу режучої кромки схильні до зносу, хоча покриття часто покриває всю поверхню інструменту. Отже, через дорожнечу нанесення покриттів, пов'язану з повторним нанесенням покриттів після переточень, цей метод не рекомендується використовувати. Більшість компаній використовують неукріплений різальний інструмент. З цієї точки зору альтернативою іонно-плазмовому нанесенню (напиленню), покриттів може стати метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який відрізняється низькою енергоємністю, екологічною чистотою та низькою іншими перевагами. Даний метод був розроблений та запропонований у 1930-х роках. Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренка.

Переваги ЕІЛ [22, 64, 69]:

- відсутня необхідність зняття нанесеного раніше захисного покриття для нанесення нового;
- зміцнення на поверхні виробу можна здійснювати в строго вказаних місцях радіусом від часток міліметра і більше, не захищаючи при цьому решту поверхні;
- відсутність суттєвого нагріву та деформацій виробу в процесі обробки;
- можливість наносити на поверхню виробу покриття із різноманітних матеріалів;
- можливість здійснювати нанесення зносостійкого поверхневого шару поверхні катода (деталі) складовими елементами анода без зміни розмірів катода;
- відсутня потреба у спеціальній попередній підготовці оброблюваної поверхні, перед нанесенням покриття;
- простота обслуговування та надійність обладнання, яке малогабаритне

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

та транспортабельне;

- порівняльна простота технології цього методу зміцнення.

Недоліки методу ЕІЛ [22, 64]:

- мала товщина шару, що формується;
- висока шорсткість обробленої поверхні;
- щодо низька продуктивність праці;
- переважно ручний спосіб обробки поверхні;
- відсутня можливість використовувати не струмопровідні матеріали.

Нанесення захисних покриттів на деталь або металорізальний пристрій виконується переважно компактним електродом методом ЕІЛ. ЕІЛ може наносити покриття двома способами: контактним і безконтактним [22]. У контактному методі безпосередній контакт відбувається між катодом (зміцнюваним матеріалом) і анодом (електродом).

Безконтактний метод залежить від того, як електроди взаємодіють із певним зазором між ними. Покриття, нанесене методом електроіскрового легування на поверхню ріжучого інструменту або деталі, має відповідати всім вимогам. Таким чином, «чиста» та «груба» обробки є двома різними напрямками електроіскрового легування. Вони відрізняються інтенсивністю процесу ерозії електрода між собою. Поверхня стає більш шорсткою через інтенсивність ерозії. Таким чином, у першому і другому варіантах на поверхні катода утворюються більш тонкі шари. У реальному житті використовуються як перший, так і другий напрямки, але через те, що поверхня металорізального інструменту потребує досить точної обробки та має низьку шорсткість, «чисте» зміцнення часто вибирається.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

На даний момент написано значну кількість спеціальної літератури та статей щодо електроіскрового легування.

Тим не менш, робота Б.Р. Лазаренка та Н.І. Лазаренка [22] пропонує найбільш детальну фізичну модель процесу ЕІЛ. У ньому розглядається взаємодія анода (електроду) з катодом (деталлю).

Електроерозія та полярне перенесення матеріалу анода на катод під час імпульсних розрядів у газовому середовищі призводять до електроіскрового легування металевих поверхонь. ЕІЛ починається, коли анод і катод зближуються і відстань між ними дорівнює пробивному. Після цього виникає іскровий розряд тривалістю 10^{-7} - 10^{-8} с, який у більшості випадків продовжується і завершується після контакту електродів. Після цього на поверхні електродів утворюється пробій міжелектродного проміжку, що призводить до утворення локальних осередків плавлення та випаровування, що призводить до електричної ерозії електродів. Формування поверхневого шару на катоді з певними експлуатаційними характеристиками та фізико-хімічними властивостями забезпечується переважним перенесенням еродованого матеріалу анода на катод. Утворення хімічних сполук може статися під час процесу перенесення матеріалу анода в газовому середовищі. У результаті частинки, що відокремилися від анода, можуть виглядати інакше, ніж вони справді є. Потім анод, або електрон, відходить від катода, залишивши на поверхні катода шар матеріалу анода, який міцно з'єднаний з ним. З іншого боку, змінені характеристики залежать від технологічних параметрів ЕІЛ, а певні фізико-хімічні характеристики залежать від складу та властивостей матеріалів електродів. Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко також дослідили взаємодію анода та катода в умовах вібрації. Коли компактні матеріали використовуються як анод, найбільш поширеним методом обробки є комутація анода з катодом за допомогою вібрації. У цьому випадку процес ЕІЛ також починається, коли анод зближується з катодом і відбувається

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

пробій міжелектродного проміжку. Теорія Таунсенда про пробивну напругу міжелектродного проміжку передбачає, що матеріал електродів може відрізнятись від 250 до 300 В при нормальному атмосферному тиску [22]. При використанні компактних матеріалів процес в умовах вібрації зазвичай відбувається при напругах $U_p = 15... 200\text{В}$, нижче мінімальної кривої Пашена та на відстані 0,01... 10 мкм. Крім того, частота вібрації анода зазвичай знаходиться в діапазоні від 50 до 300 Гц. З цих даних можна зробити висновок, що при ЕІЛ контакт електродів є єдиним способом пробою міжелектродного проміжку. З іншого боку, дослідження, проведені Б.Р. Лазаренко, І.С. Таєвим та іншими вченими, показують, що фізичний контакт електродів призводить до пробою при таких напругах. Тим не менш, автори вважають, що немає «щільного» контакту між анодом і катодом, оскільки тиск парів металів у зоні випаровування може досягати 10^{-8} Па [22, 77], значно перевищуючи тиск, створений електромагнітною системою вібратора в зоні контакту. Так само в їхніх роботах були наведені залежності, які показали, що величина пробивних проміжків може становити 5-10 мкм при напругах $U_p = 100... 200\text{В}$. Електричний вибух контактної містки відтворюється під час контактної початку пробою на першому етапі [77]. Це забезпечує попереднє очищення поверхні та подальше формування міжелектродного простору, що сприяє розвитку плазмового розряду. Газорозрядна плазма каналу викликає електричну ерозію анода та катода після пробою та початку формування іскрового розряду через $10^{-7}-10^{-8}$ с. В результаті матеріал електродів викидається в міжелектродний проміжок у вигляді парової та рідкокрапельної фази. Після цього відбувається випаровування парів і викид рідкої фази. При електричній ерозії пара та рідина можуть проникати в зазор разом із твердою фазою під час крихкого руйнування матеріалу електродів. Електрична ерозія газів і рідин є складним і складним процесом, який відбувається через взаємодію плазми іскрового розряду з поверхнею електродів. Ефекти Томсона, Пельтьє та Колера [57] спричиняють схоплювання та перенесення матеріалу з анода на катод під час механічних

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

контактів анода та катода. Параметри розряду та теплофізичні властивості матеріалу електрода визначають тепловий запас енергії, який у свою чергу несуть потоки пари та рідини. Ці явища відбуваються в досить маленькому міжелектродному проміжку, який поступово зменшується, що створює сприятливі умови для передачі енергії потокам протилежним електродам. Коли електронно-іонні компоненти газорозрядної плазми та потоки парів і рідини впливають на електроди, на поверхні катода утворюються кратери, а також розплавлені продукти ерозії у лунці (слід електричних розрядів на оброблюваній поверхні) і навколо неї. Це [22]. Поверхня оброблюваної деталі (катода) Томі має геометричні розміри та частоту слідувань, які визначають шорсткість і суцільність поверхні. Розвиток імпульсного розряду може призвести до викиду парів і рідкокрапельної фази з поверхні розплаву. Тиск у міжелектродному проміжку значно збільшується через викиди парів, рідин і зменшення зазору.

На рідкі обсяги катода і анода, що зблизилися, діють декілька сил:

- гідродинамічний тиск смолоскипів;
- газокінетичний тиск із боку каналу;
- сила електричного поля;
- електродинамічна сила;
- реактивний тиск.

У результаті цих сил обсяг рідкого металу, який викидається з лунки, деформується. Внаслідок того, що це відбувається практично в контакті, існує ймовірність злиття рідких фаз матеріалів електродів і сильного гідродинамічного перемішування їх.

У процесі електроіскрового легування еродований матеріал анода переноситься на катод, що створює поверхневі шари на катоді. Це відбувається через взаємодію матеріалів електродів і середовища міжелектродного проміжку. Це результат полярного ефекту ерозії та інших факторів, які були зазначені раніше. При полярному перенесенні кількість рідкої фази на аноді перевищує ерозію катода, тому поверхневий шар, який формується на катоді, повинен

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

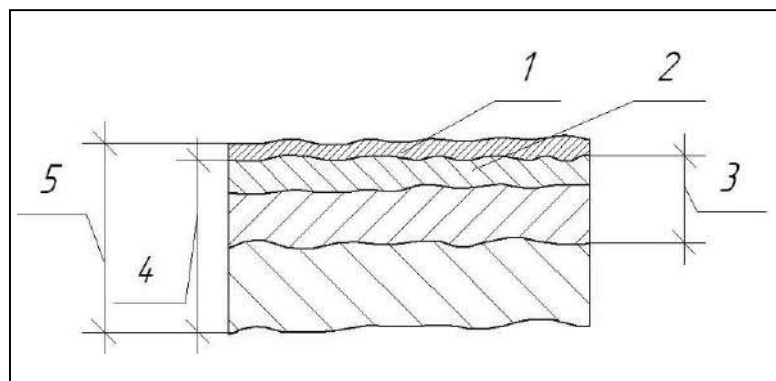
переважно складатися з матеріалу анода. Але гідродинамічне перемішування може допомогти, оскільки в цьому шарі може бути покриття по всьому об'єму аж до поверхні як анода, так і катода.

При електроіскровому легуванні кристалізація та взаємодія рідких фаз матеріалу електродів в основному відбуваються на поверхні катода. На думку авторів [22, 57] матеріал електрода (анода) розплавляється, коли він взаємодіє з навколишнім середовищем, а матеріал катода залишається на його поверхні. В результаті фізико-хімічні властивості поверхні анода та катода змінюються.

Потік парокропельної суміші та перемішування рідких фаз, а також схильність матеріалів електродів до схоплювання забезпечують присутність матеріалу катода на поверхні анода.

У роботах дослідників, таких як В.Є. Авраменко, В.П. Александров, Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко, серед інших, зазначалося, що властивості поверхневого шару ЕІЛ значно змінюються. Розплавлений метал, який залишився на поверхні лунки, і металевий шар, який піддається структурним змінам через швидке нагрівання та охолодження, складають поверхневий шар. Тим не менш, властивості цього шару ще не визначені. Дослідники поділяють шар на окремі зони, щоб спростити вивчення.

Одні автори [1, 75] поділяють його на такі зони, представлені на (рис. 1.2.).

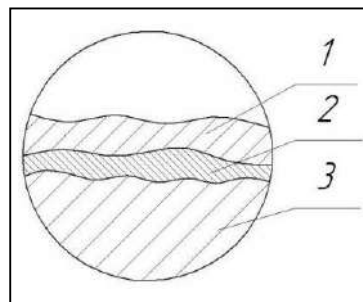


1 - зона відкладення матеріалу електрода (анода); 2 – «білий» шар, утворений з розплавленого матеріалу заготовки; 3 – зона термічного впливу; 4 –

зона пластичної деформації; 5 – змінений поверхневий шар

Рисунок 1.2 – Поверхневий шар, отриманий після ЕІЛ

Зазвичай отримані зони не мають чіткої різниці та зазвичай перекривають одне одного. Незважаючи на це, перелічені зони мають свої особливості, які впливають на властивості поверхні і, як правило, визначають, наскільки добре деталь або ріжучий інструмент можна використовувати. Більш детальна інформація про кожну область представлена в роботі [70]. Інші [3, 44, 77] поділяються на білий шар і перехідний шар, який є незмінним матеріалом заготовки (рисунок 1.3.).



1 - "білий" шар; 2 – перехідний шар; 3 – незмінений матеріал заготовки

Рисунок 1.3 – Змінений поверхневий шар катода, отриманий після ЕІЛ

Дослідники поділяють поверхневий шар виробу на різні зони. Вони вважають, що хіміко-термічні перетворення відбуваються в «білому» шарі, а перехідний шар містить зону термічного впливу та дифузійну зону, а під ними знаходиться незмінений матеріал виробу (катода). Автори вважають, що розподіл зон залежить від типу електроіскрового легування та матеріалу основи.

Більшість дослідників вважають, що «білий» шар зазвичай має дрібнозернисту структуру, яка є надзвичайно стійкою до хімічних впливів, що ускладнює його виявлення за допомогою травлення. Утворення білого шару при електроіскровому легуванні пов'язане з тим, що матеріал електрода (анода) переміщується на катод. Температура в невеликому шарі знижується до температури плавлення та відповідних фазових перетворень через підвищену

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

швидкість тепловідведення. Таким чином, кристалізація та фазові перетворення, які відбуваються під час процесу ЕІЛ, згодом призводять до утворення нерівноважних структур із дрібними зернами.

Цей шар має вигляд білих смуг на мікрошліфах, тому він і отримав свою назву. Через унікальну структурну ситуацію «білий» шар не піддається травленню, на думку багатьох дослідників [22, 77]. С.Б. Нижній вважає, що білий шар погано піддається травленню, оскільки він знаходиться в межах високотемпературної швидкісної відпустки, яка має більш позитивний електрохімічний потенціал. Для того, щоб зменшити вплив цієї області, білий шар тріється звичайним реактивом.

Наступна фаза електроіскрового легування починається після завершення іскрового розряду та кристалізації матеріалів на поверхні анода та катода. На цьому етапі між анодом і катодом починається щільний фізичний контакт. Осцилографування показує, що час контакту при вібруючому електроді становить 0,6–2 мс при частоті вібрації 100 Гц.

Зменшення механічного тиску між електродами, пов'язаного з відведенням легуючого електрода від катода (деталі), є останньою стадією процесу ЕІЛ. Це призводить до розриву електричного ланцюга, коли анод відділяється від деталі на відстань, значно перевищуюче пробивну амплітуду вібрації. Коли застосовувані джерела імпульсів мають зарядні та розрядні ланцюги, немає дуги розмикання між електродами, коли анод відходить від катода. Використання RC-генераторів як імпульсів може призвести до короткої дуги на останній фазі процесу, що може призвести до розриву контактної системи.

Дослідження показують, що в м'яких режимах ЕІЛ дуга взагалі відсутня, коли напруга підвищується приблизно від 15 до 50 В. Це тому, що конденсатор, підключений паралельно іскровому проміжку, не досягає максимального потенціалу запалювання короткої дуги під час розриву контакту через перехідні процеси [22]. Поява короткої дуги не змінює процес значно при більш високих значеннях напруги, оскільки ерозія електродів дуже мала в порівнянні з ерозією

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

конденсатора при розряді.

Характеристики матеріалу, параметри імпульсу, кінематика руху та інші фактори можуть вплинути на динаміку процесу електроіскрового легування.

Процес електроіскрового легування компактними електродами складається з кількох циклів:

- формування електричного контакту між анодом (електродом) та катодом (деталлю), після зближення електродів та пробою міжелектродного проміжку;
- електрична ерозія електродів;
- полярне перенесення та формування поверхневого шару на поверхні катода (деталі або інструменту);
- розрив електричного контакту між анодом та катодом, у момент розбіжності електродів.

Крім того, процеси на аноді та катоді можна класифікувати як елементарні, які виникають через перебіг одного розряду (ерозія, взаємодія переносимих матеріалів), так і накопичувальні, які виникають через багаторазову дію імпульсних розрядів (утворення фаз, залишкових напруг).

Електрична ерозія електродів - це коли електричні розряди проходять між електродами, поверхня електродів руйнується, а метал знімається. Ерозія електродів відбувається на межі між каналом розряду та катодом або анодом з одного боку. Автори методу ЕІЛ Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко визначили електричну ерозію як фізичне явище, при якому матеріал електродів спрямовано викидається під дією самостійного електричного розряду, що проходить між ними [57]. У випадках, коли електроди оточені газом, описане явище зазвичай супроводжується відкладенням викинутого матеріалу на протилежному електроді. Це змінює умови протікання розряду.

В результаті асиметрії тепла в гарячій точці містків зв'язку, які утворюються під час замикання електродів, легуючий електрод ерозується, а матеріал анода переноситься на поверхню катода або деталі. Термофізичні та термоелектричні ефекти визначають контакт-містковий перенесення

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

речовини. В цьому випадку енергія, яка проходить через містки зв'язку струму, розплавляє матеріали, і коли електроди проходять між ними, виникає розплавлений місток. На основі легуючого електрода швидкість охолодження розплавленого металу на поверхні набагато вища, що призводить до розриву містка. У статті [57] автори стверджують, що перенесення матеріалу спрямовано у бік електрода, який знаходиться далі від найбільш нагрітої точки, як правило, катода. Інтенсивний вплив застосовуваних охолоджуючих середовищ (стиснене повітря) пояснює меншу ерозію анода (електрода) порівняно з ерозією катода (деталі).

ЕІЛ супроводжується такими явищами, як [50, 57]:

- під час електричної ерозії анода та катода, спостерігається ефект полярності, а саме відбувається збільшення ерозії одного електрода над іншим;
- електрична ерозія металів залежить від хімічного складу матеріалів електродів, деталі, навколишнього середовища і т.д.;
- кількість матеріалу, що викидається з анода в момент іскрового електричного імпульсу, залежить від енергії та кількості імпульсів.

У момент, коли електроди розрізняються, відбувається розрив електрохімічного контакту між анодом і катодом. Автор [44] стверджує, що коли легуючий електрод досягає поверхні катода (деталі), він повертається у своє вихідне положення, що призводить до розбіжності електродів. Інша причина полягає в тому, що легуючий електрод відходить від поверхні катода (деталі) через динамічні сили, які виникають у результаті вибухового оплавлення містків зв'язку в результаті Ленц-Джоулевського теплового ефекту. Це відбувається, коли щільність струму в контактній області є надто високою.

Зазор, наповнений плазмою, може утворюватися між електродами під дією енергії вибуху за короткий проміжок часу та залежить від швидкості комутації ланцюга, потужності розряду та теплофізичних властивостей речовини.

Під час цього короткого періоду поверхнєве джерело тепла починає діяти, нагріваючи мікрооб'єми металу до 5-10 10^3 °C. Крім того, ударні хвилі

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

викликають тиск на поверхні в межах $2-7 \cdot 10^6 \text{Н/мм}^2$. Мікрооб'єми поверхневих шарів руйнуються в результаті дії цих факторів. Це призводить до перенесення матеріалів на анод і на катод, а потім їх дифузії на поверхню. Потім легуючий електрод рухається до поверхні катода (деталі), якщо його рух до нижньої точки не завершено. Існує два способи продовження процесу легування. Якщо період короткого замикання електродів є меншим, ніж тривалість імпульсів струму t_i , відскок і повернення легуючого електрода буде меншим. По-друге, легуючий електрод, що повертається, проковує леговані обсяги матеріалу, коли $t_p > t_i$.

Таким чином, необхідно визначити тривалість існування короткого замикання, площу містків і динаміку їх зміни з теоретичної точки зору. Крім того, необхідно визначити взаємне зближення електродів через пластичну деформацію нерівностей. У своїй роботі автор [44] стверджує, що зв'язок між анодом і катодом можна пояснити процесом дифузії, який є процесом перемішування однієї речовини з іншою через тепловий рух молекул, коли вони з'єднуються. Але говорять, що вона майже відсутня, оскільки процес дифузії короткий і повільний.

При механічному або тепловому імпульсному впливі на матеріал катода в електроіскровому легуванні атоми анода можуть дифузуватися незвичайним чином.

У процесі електроіскрового легування змінений поверхневий шар формується на ділянках оброблюваної поверхні в результаті послідовних локальних впливів імпульсних розрядів. Це останній етап процесу електроіскрового легування. Досліджено, що тривалість процесу, фізико-механічні характеристики матеріалу електрода, імпульсні розряди та інші фактори впливають на якість, так і кількість поверхневого шару, що утворюється під час процесу електроіскрового легування.

Змінений поверхневий шар, створений ЕІЛ, складається з групи лунок, відомих як гребені та западини. Ці лунки значно впливають на параметри шорсткості поверхні [22]. Розміри та геометрична форма двох груп нерівностей,

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

які утворилися внаслідок взаємного перетину лунок і спотворилися профілем лунки, визначають шорсткість утвореної поверхні. У першій групі розміри лунок і коефіцієнти взаємного перекриття лунок є основними факторами, які визначають параметри шорсткості. Випадкові обставини повністю визначають другу групу нерівностей [70].

Автори [22] стверджують, що загальна думка про вплив матеріалу електрода на процес ЕІЛ відсутня. У своїх експериментах одні дослідники вважали, що теплова дія іскри сприяє зміцненню матеріалу під час іскрового розряду [32]. Інші дослідники підкреслюють, що перенесення матеріалу анода на катод сприяє зміцненню деталі або ріжучого інструменту [22]. Наступні дослідники виявили, що тепловий вплив іскрового розряду та перенесення речовини анода на катод є двома причинами зміцнення [71].

Згідно з аналізом досліджень авторів, можна зробити висновок, що основними видами перенесення та взаємодії речовин електродів є:

- Зміцнення відбувається внаслідок осадження матеріалу анода поверхню катода. Великий ефект зміцнення, може бути забезпечений, якщо як анода буде використовуватися матеріал з найбільшою зносостійкістю, твердістю і т.д. [32];
- Поверхневий шар, що отримується в процесі ЕІЛ, це результат взаємодії матеріалів анода і катода між собою та з подальшим утворенням твердих розчинів, оксидів, нітридів, хімічних сполук;
- Процес відбувається за рахунок взаємодії матеріалів електродів та за рахунок імпульсних впливів високих температур та тиску, що призводять до появи нерівноважних структур, нових фаз [44, 57].

Електроіскрове легування — це процес, який дозволяє наносити одношарові захисні покриття на поверхні деталей і металорізальних інструментів. Ці покриття складаються з чистого матеріалу анода або покриття, створеного взаємодією між матеріалами електродів і міжелектродним середовищем. ЕІЛ також можна використовувати для нанесення багатшарового покриття, що дозволяє створювати нові поверхневі матеріали. Нанесення

наступного шару дозволяє зменшити шорсткість, покращити тепловідведення, підвищити жаростійкість і покращити інші властивості покриття. ЕІЛ можна використовувати як електроди будь-якого електропровідного матеріалу [11, 12, 18, 31]. У своїх експериментах багато дослідників наносять покриття на передні та задні поверхні різальних інструментів і деталей машин, а також на внутрішні та зовнішні поверхні. Багато авторів провели дослідження, щоб з'ясувати, як різні електроди впливають на одержувану шорсткість покриттів, величину залишкових напруг, жаростійкість, зносостійкість та інші характеристики. Наприклад, у своїх роботах автори [48, 79, 83] використовували електроди з нержавіючої сталі через її властивості, зносостійкість і жаростійкість. В результаті дослідження автори виявили, що при електроіскровому легуванні титанових сплавів нержавіючою сталлю (11X15H25M6AГ2), алюмінієм, твердими сплавами (Т15К6, ВК6М) і сплавами W-Cr-Co, W-Fe-Ti, зносостійкість збільшується.

Велике збільшення жаростійкості матеріалів, що зміцнюються, до трьох разів спостерігається при використанні алюмінію в якості електродного матеріалу, за рахунок того, що в поверхневому шарі утворюються інтерметаліди TiAl. Так само при використанні в якості анода сталі і сплаву W-Cr-Co підвищується товщина шару, що формується в 1,5 - 3,6 рази більше, ніж з електродними матеріалами з твердого сплаву. У роботі [15] автори провели дослідження процесу ЕІЛ, наносячи на поверхню титанового сплаву BT18 захисне покриття. Як електроди (анооди) використовували Al, TiAl, Ni3Al. Вибір електродів пов'язаний з їхньою здатністю підвищувати термічну стабільність сплавів титану та жаростійкість.

У дослідженні [21] твердий сплав ВК6М використовувався як матеріал електрода. Він був розроблений для свердління, зенкерування, розгортання та фрезерування сталі, чавуну та деяких важкооброблюваних матеріалів. Фрези та свердла зі швидкорізальної сталі P18Ф2 також були зміцненні. Описано, як фреза з покриттям зношується. У роботі також розглядалося двошарове

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

покриття, нанесене на токарний різець. Мідь і твердий сплав ТК використовуються як матеріали електродів. Мідний сплав відводить тепло, а твердий сплав посилює руйнування робочого шару. Передня задня поверхня була зміцнена вздовж ріжучої кромки. Під час моніторингу їм вдалося отримати значне збільшення стійкості інструментів: свердла та фрези до 1,6; різця до 1,7. Зносостійкість фрез залежала від електродного матеріалу; фрези з покриттям із сплаву Т15К6 мали найнижчу зносостійкість, тоді як фрези з покриттям із сплаву ВК6М мали найвищу зносостійкість.

Застосування процесу електроіскрового легування для зміцнення ріжучого інструменту описано авторами роботи [16]. Електродами для цієї роботи були: електрографіти ЕГ-2, ЕГ-4; твердий сплав ВК3, ВК8, Т15К6; білий чавун і ферохром. Після експерименту дослідники виявили, що стійкість інструменту піддається електроіскровому легуванню у 6-8 разів, а покриття з твердих сплавів ВК3 та ВК8 підвищують стійкість у 4-6 разів.

Рекомендації щодо зміцнення ріжучого інструменту надані Autor Work [32]. Якщо стійкість інструменту залежить від зносу поверхні, як у випадку сталі з невеликим вмістом вуглецю, електроіскрове легування задніх поверхонь проводиться. Обробка інструментом високоміцних матеріалів або сталей з високим вмістом вуглецю вимагає зміцнення передньої поверхні. Коли інструмент обробляє зносостійкі матеріали та глибокі отвори, передні та задні поверхні обробляють електроіскровим легуванням.

Ріжучі інструменти, такі як різці та свердла, використовуються в токарних автоматах для обробки гвинтів, гайок і кілець ущільнювачів. Передні та задні поверхні різців і свердлів були зміцнені електроіскровим легуванням.

У дослідженні стійкості токарних круглих різців ширина стрічки зносу по задній поверхні була прийнята. Як анод використовували твердий сплав Н10. Дослідження показало, що стійкість різців зросла на 100–300 відсотків.

Як показали економічні розрахунки, використання електроіскрового легування може бути вигідним, якщо підвищення стійкості інструменту не

перевищує 200%.

У своїй роботі автори [13, 27, 71] використовували білий чавун з добавками вольфраму в різних співвідношеннях як електрод (анод), що дозволило збільшити працездатність робочих поверхонь сталі. Автори відзначають, що при утворенні крихких карбідів ерозія та масоперенос збільшуються, коли кількість вольфраму в анодному матеріалі збільшується. Але через дефіцит вольфраму багато дослідників використовують матеріали на безвольфрамовій основі як електродні матеріали для ЕІЛ. Одним із таких матеріалів є тверді сплави на основі карбіду титану, які мають високу твердість і зносостійкість.

Автори [41, 42, 81] зосередилися на дослідженні вольфрамовмісних і безвольфрамових електродних матеріалів. Автори створили та досліджували безвольфрамові електродні матеріали на основі карбіду титану з нікель-молібденовою зв'язкою, які були змінені добавками датолітового концентрату $\text{CaB}[\text{SiO}_4](\text{OH})$ (ДСТУ 16108-80). Так само в роботах досліджувалися безвольфрамові композиційні електродні матеріали на основі карбіду титану з нікель-молібденовою зв'язкою та добавкою мінерального сировини (датолітового концентрату) TiC-Ni-Mo-DTK . Вміст, який містив, дозволяв створити покриття на сталі 45 з високою мікротвердістю та збільшеною зносостійкістю.

На жаростійкість роботи отримали одношарові та двошарові покриття. VK8 , $\text{VK8+Al}_2\text{O}_3$; VK8+Cr були використані як електродні матеріали. Збільшення мікротвердості, зносостійкості та жаростійкості можна досягти за допомогою використання цих електродних матеріалів. Крім того, у роботі стверджується, що за умови зниження стійкості електродного матеріалу ефективність процесу електроіскрового легування підвищиться, що призведе до підвищення твердості покриття та зносостійкості. Такі матеріали, як B , Si , Al_2O_3 , Ni і Cr , використовувалися як добавки до твердого сплаву VK8 .

У статті [17, 78] описано дослідження впливу електроіскрового легування

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

на підвищення зносостійкості та стійкості до корозії. Використовувалися як електроди перехідні метали IV-VI груп, Ti, Zr, Al, Ni, Cu та сплав силуміну Al-Si.

У роботах [14, 80] дослідники використовували електроди на основі ВК8 із самофлюсуючими добавками Ni-Cr-B-Si. У процесі ЕІЛ цей електрод дозволяє створювати змінений поверхневий шар з мікротвердістю, яка перевищує розмір сплаву ВК8. Зменшення утворення оксидних та нітридних фаз стало можливим завдяки використанню цього електрода. Це також дозволило матеріалам електродів взаємодіяти краще, покращити умови формування легованого шару за рахунок максимальної дифузії анода та катода, а також покращити експлуатаційні характеристики поверхневого шару, такі як зносостійкість і жаростійкість.

У статті [20] дослідники провели аналіз електродних матеріалів і запропонували класифікувати електродні матеріали, отримані з мінеральної сировини Далекосхідного регіону.

У своїй роботі автори [30] показують приклади електродів (анодів), які часто використовуються в практиці для отримання покриттів з різними цілями.

У статті [33] розглядається зносостійкість твердосплавного металорізального інструменту з покриттям (TiAl)N. Автори стверджують, що матеріал електрода був обраний через підвищену термостійкість. У ході дослідження було виявлено, що інструменти з цим покриттям мають збільшену стійкість у 1,5-2,0 рази. Автор [44] стверджує, що використання м'яких матеріалів, таких як алюміній, може підвищити поверхневу твердість оброблюваної деталі. Хімічні речовини, які використовуються в процесі електроіскрового легування, відіграють значну роль у цьому випадку. При електроіскровому легуванні титану алюмінієм і нікелем висока твердість шару у багато разів перевищує твердість оброблювального анода і катода. Це пов'язано з утворенням ряду сполук (інтерметалідів) між повітрям титану та азотом. Збільшення твердості обробленої поверхні є результатом структурних змін і загартованих явищ у ситуаціях, коли хімічна активність твердості матеріалів електродів низька. Так само, як при

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

електроіскровому легуванні сталей, попередня термообробка та хімічний склад впливають на твердість формованих шарів. Наприклад, при електроіскровому легуванні цієї ж сталю з високим вмістом хрому (CR) нормалізована сталь демонструє найвищі значення мікротвердості порівняно з тією ж сталлю в стані поставки або з тією ж сталлю, покращену термічно.

Вони представили результати свого дослідження одношарових і двошарових покриттів на основі графіту та сплавів у статті [18]. Електродні матеріали, які використовувалися як катод, включали графіт, титан, 12X18H10T і X20H80. Дослідження показало, що двошарові покриття можуть значно покращити механічні властивості конструкційних сталей. Автори провели аналіз товщини «білого» шару, шорсткості покриття та його цілісності. Двошарові покриття, які мають значну товщину «білого» покриття, складаються з нижнього (графіту) і верхнього (сплаву). Одношарове покриття металу X20H80 має високу суцільність. Шорсткість покриття найменша, коли утворюється двошарове покриття, де нижній (сплав) і верхній (графіт). Отже, автори стверджують, що доцільно використовувати графіт як верхній шар при нанесенні покриттів, оскільки це значно зменшує шорсткість поверхні шару.

У статті [55] графіт також використовувався для вирівнювання покриття. Аноди склалися з сплавів T15K6 і BK8. На леза, призначені для розкровоу тканини, наносилося покриття.

Автори наступного дослідження [45] використовували електроди, виготовлені з твердих безвольфрамних сплавів STIM, що є синтетичним твердим інструментальним матеріалом. Ці електроди використовувалися для зміцнення металорізальних інструментів. Для визначення рівня ефективності в роботі використовували ресурс досвідченого інструменту та порівняли його з ресурсом серійного інструменту. Крім того, дослідники вимірювали точність профілю поверхні та її шорсткість. Передня та задня поверхні різального інструменту були зміцнені. Покриття було нанесено по всій довжині ріжучої кромки, а свердла зміцнювалися так само, як і перемичка та підточування.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Зенкер, мітчик і свердло зі сталі 11М5Ф використовувалися як катоди. Згідно з результатами дослідження, автори виявили, що стійкість зенкерів зросла в 1,4 рази порівняно з нормативною стійкістю. Автори зазначають, що до моменту руйнування зенкера конструкція передбачає тридцять переточень. Автори стверджують, що зенкер прослужить приблизно в 2,1 рази довше, якщо його зміцнити по передній і задній поверхнях після кожного переточування. Випробування свердлів показали, що їхня стійкість коливається від 1000 деталей до 20000. Після переточування по задній поверхні без додаткового зміцнення дані свердла також випробували. З'ясувалося, що свердла були стійкі до 1500–1600 деталей. Автори стверджують, що зміцнення електроіскровим легуванням після кожного переточування збільшить термін служби свердел до 160 разів. Цанги та мембрани, затискні механізми верстатного оснащення, які піддаються високому зношуванню, були піддані електроіскровому легуванню. Перед розділенням переднього конуса на пелюстки внутрішня поверхня зміцнювалася шаром шириною 5 мм і товщиною 5 мкм під час виготовлення цанг. Стійкість цанг зросла в два-три рази. Можна відновити робочу поверхню цанг за допомогою наступного покриття з доведенням зі спеціального абразивного інструменту. Електроіскрове легування дозволило збільшити термін служби мембран патронів у чотири рази.

Застосовуючи електроди СТІМ, автори в інших дослідженнях [26, 38] виявили, що покриття зменшує коефіцієнт тертя вдвічі та підвищує зносостійкість в десять разів.

У статті [3] стверджується, що прожарювання та наплавлення ріжучих кромок у процесі електроізоляції є безпечним. Також стверджується, що для зміцнення металорізальних інструментів необхідно проводити електроіскрове легування всіх робочих поверхонь, які піддаються тепловим навантаженням. Але практика показала, що використання електроіскрового легування спростовує це твердження.

Легування по передній поверхні, за винятком смужки шириною 0,2-0,4

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

мм, яка прилягає до ріжучої кромки, продемонструвало високу ефективність електроіскрового легування, згідно з іншими авторами [63]. Тим не менш, ця смуга потребує додаткового зміцнення. При електроіскровому легуванні рекомендується використовувати сталеві зразки, які щільно прилягають до ріжучої кромки, щоб запобігти перепалам і крихтінням. Автори також відзначають, що товщина легованого шару інструменту з твердого сплаву, товщина якого становить 2-3 мкм, може збільшити термін служби інструменту в два рази.

У дослідженні [16] розглядаються методи електроіскрового легування фрез із швидкорізальної сталі. Для зміцнення використовували твердий сплав К40. Попередні дослідження показали, що завданий шар займає вузьку область шириною 30–50 мкм і має незначну твердість через термічний вплив іскри. Електроіскрове легування передньої та задньої поверхні фрези добре переносить тепло в матеріал основи. У місці ріжучого краю може накопичуватися тепло.

Спочатку інструмент зміцнювали лише по передній поверхні, щоб визначити ідеальну поверхню для нанесення покриття. Усунення зазубреності леза було виконано перед використанням зміцненого інструменту. За допомогою цього інструменту об'єм металу, різаного, становив 25 см³. Після шліфування було видалено п'ять міліметрів із допоміжної задньої поверхні та один міліметр із задньої поверхні, що збільшило кількість матеріалу, видаленого різанням у три рази. Таким чином, перед електроіскровим легуванням передня поверхня різця шліфувалася, а потім також шліфувалися задня та допоміжна поверхні різця.

Об'єм матеріалу, що видаляється, становив 20–23 см³ при обробці не зміцненим інструментом, а при різанні інструментом, який був зміцнений, становив 40–45 см³. Зміцнення передньої поверхні забезпечило обсяг різання 60–70 см³.

У процесі зміцнення лише задньої поверхні відбувається той самий механізм зносу, який спостерігається в ЕІЛ на передній і задній поверхнях.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Автори виявили, що час обробки має значний вплив на обсяг різання, який коливається від десяти до п'ятнадцяти хвилин на квадратний сантиметр. У діапазоні швидкостей різання 30–50 м/хв спостерігається підвищення стійкості інструментів із покриттям. Для зміцнених і не зміцнених інструментів прями, які показують залежність обсягу різання від швидкостей різання, паралельні в логарифмічних координатах. Це означає, що підвищення стійкості не залежить від швидкості різання.

З метою дослідження створення зміненого поверхневого шару на сталі 35 автори роботи [51] змогли розділити електродні матеріали, необхідні для нанесення покриттів на сталі, на кілька груп. Автори віднесли Ni, C, Mn, Cr і V до першої групи. Другу групу включили (Cu, Al). Автори стверджують, що при електроіскровому легуванні мідь не утворює «білого» шару, а сприяє утворенню щільного покриття з чистої міді та її оксидів. Тугоплавкі елементи (Ti, V, Zr, Nb, Mo, Ta і W) увійшли до третьої групи. Дослідження стосувалося впливу фізико-хімічних властивостей матеріалів електродів на структуру властивостей одержуваного поверхневого шару. Мета цього дослідження полягала в тому, щоб визначити закономірності утворення «білого» шару при ЕІЛ сталі 35.

У своїй роботі автори [36] розглядають бронзу як альтернативний матеріал для захисту сталі 30ХГСН2А під час електроіскрового легування. Використовували бронзу марок ВБр5М і БрА10Ж3Мц2 як аноди. Зразки з покриттям піддавалися випробуванню на тертя. Результати дослідження показують, що покриття з бронзи добре підходить для деталей і різальних інструментів, які працюють під навантаженням і тертям ковзання. Автори також відзначають, що ЕІЛ бронзами марок ВБр5М і БрА10Ж3Мц2 впливає на зниження рівня малоциклової втоми сталі 30ХГСН2А.

В іншій роботі [82] автор вивчає, як покриття з нітриду титану впливають на зношування інструменту з твердого сплаву ВК8. Тиалуміни TiAlSi, TiAlZrN і TiAlCrN використовувалися як ЕМ. Заготовки зі сталей 30ХГСА та 12Х18Н10Т обробляли за допомогою зміцненого інструменту. Після завершення

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

дослідження автор виявив, що інтенсивність зношування інструменту стала меншою в 1,3-1,8 раза при обробці сталі 30ХГСА, а при обробці сталі 12Х18Н10Т у 1,2-1,7 раза.

Електроіскрове легування було використано авторами [37, 72] для покриття ріжучих деталей машин, які використовуються в сучасних методах збору зерна. Дослідження використало два електроди: нанокристалічний сплав марки 5БДСР і електрод із швидко загартованого аморфного сплаву марки 84КХСР. Після завершення дослідження було встановлено, що використання даних електродів збільшує зносостійкість протиріжучих пластин у два рази.

Згідно з роботою [76], у якій автори застосовують електроіскрове легування для зміцнення дереворізального інструменту, було проведено дослідження з метою визначення ефективності процесу електроіскрового легування (EIL). Були використані ріжучі зуби пиляльного ланцюга як інструмент. У якості електродів використовувалися тверді сплави ВК6 і Т5К10. Бічні, передні та задні зуби були оброблені. Автори виявили, що аналізуючи дані дослідження, зносостійкість ріжучих зубів зросла приблизно на 50%.

Автори [5] використовували електроди (анооди) з таких матеріалів як Al, Ti, Ni, Cr і Cu для нанесення окалиностійких і тепловідвідних покриттів на твердий сплав ВК8. Після завершення експерименту автори виявили, що електроди Cr та Al краще підходять для утворення покриттів на сплаві ВК8, які не містять окалини. Для утворення тепловідвідного покриття краще використовувати покриття з цинку.

Автор провів дослідження жаростійкості сталей марки 45 [74], використовуючи електроди з нікелю та нікелю. Дослідження було проведено як на сталі з покриттям, так і на сталі без покриття. Сталь отримала значно кращу жаростійкість після нанесення покриття NiCr. У статті [9] автор використовував як покриття, так і електродний матеріал Cr, що лише підвищило зносостійкість сталі 40Х.

Для нанесення покриттів при електроіскровому легуванні застосовуються

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

різні електродні матеріали, залежно від призначення отриманого покриття (Таблиця 1.1), а також таблиця електродів, застосовуваних залежно від виконуваних операцій і оброблюваного матеріалу (Таблиця 1.2).

Згідно з аналізом літератури, сплави ВК і ТК найчастіше використовуються для нанесення покриттів на сталь. Однак для електроіскрового легування також використовуються інші електродні матеріали, такі як графіт, хром, карбіди, бориди, нітриди титану та інші.

Таблиця 1.1 – Приклади електродних матеріалів, що застосовуються для нанесення покриттів за допомогою електроіскрового легування, залежно від призначення одержуваного покриття

Матеріал електрода (анод)	Матеріал катода	Призначення одержуваного покриття
Al, TiAl, Ni3Al	ВК8, Сталь Ст. 3, Al, титановий сплав VT18 та інші	Збільшення: окалиностійкості, зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості
Мідь (Cu)	ВК8, Сталь 3, Al, Cu, та інші	Збільшення: тепловідведення, корозійної стійкості
Хром (Cr)	ВК8, Сталі 40X, 45 та інші	Збільшення: зносостійкість, жаростійкості, окалиностійкості
Бронзи ВБр5М, БрБ2, БрА10Ж3Мц2,	Сталі 30ХГСН2А, 45, Р18, чавун та інші	Збільшення: зносостійкість
Стім	Швидкорізальні та конструкційні сталі та інші	Збільшення: зносостійкість
Графітні електроди	Т15К6, сталь Р18, 25 та інші	Збільшення: зносостійкість, стійкості різального інструменту
TiC, TiB2, ZrB2	Сталі 35, Р18, Р6М5, У8А, титан та інші	Збільшення: зносостійкість, окалиностійкості

Продовження таблиці 1.1

Mo	Стали 30, 45 та інші	Збільшення: стійкості різального інструменту, корозійної стійкості.
Ni, NiCr	Стали 45, 40X та інші	Збільшення: зносостійкість, жаростійкості, окалиностійкості
BK2, BK3	T15K6, стали P6M5, P18 та інші	Збільшення: зносостійкість, стійкості різального інструменту
BK6M, BK6	Сталі Ст.2, 45, P6M5 та інші	Збільшення: зносостійкість
BK8, BK8+Al ₂ O ₃ ; BK8+Cr	Стали 45, Ст.3, 40X, P6M3, P6M5 та інші	Збільшення: зносостійкості, жаростійкості, мікротвердості,
T15K6	Стали 45, У7, У8, P6M5, P18, чавун	Збільшення: зносостійкість
T14K8	Сталь 2X13 та інші	Збільшення: зносостійкість
T30K4	Сталі 40X, T15K6 P18, P6M5 та інші	Збільшення: стійкості ріжучого інструменту
TiC-Ni-Mo-ДТК	Сталь 45	Збільшення: мікротвердості, жаростійкості, зносостійкості, стійкості різального інструменту
TiN, AlN, ZrN	Стали 45, Ст.3 та інші	Збільшення: стійкості ріжучого інструменту

Таблиця 1.2 містить приклади електродних матеріалів, які найчастіше використовуються в залежності від типу механічної обробки деталей і оброблюваного матеріалу.

Електроди в залежності від їх призначення та матеріалу виготовляються цільними чи збірними. Найчастіше електроди для електроіскрового легування виготовляються як стрижнів чи трубок. Електродні матеріали з міді, алюмінію та їх сплавів найчастіше виготовляються штампуванням, прокатом. Електроди, які мають складну об'ємну форму, виготовляють литтям [3,4].

Електродні матеріали можна одержувати за допомогою традиційних прийомів порошкової металургії, до них відносяться пресування, гаряче пресування або вакуумне спікання. Таким чином, виготовляються суцільні конструкції. Форма робочої поверхні таких електродів повторює форму прес-

форми. Цей процес є найвигіднішим, коли випускається значна партія однакових електродів. Недоліком процесу є нерівномірність властивостей матеріалу після пресування. Дані технології отримання електродних матеріалів включають велику кількість операцій, багато з яких є складними, енергоємними і тривалими за часом, а також вимагають складного обладнання та матеріалів. Пластифікуючі речовини, використавши свої технологічні функції, повністю не видаляються при спіканні і можуть впливати на фізико-механічні властивості ЕМ, на роботу, довговічність різального інструменту і деталей машин [7].

Таблиця 1.2 – Приклади електродних матеріалів, що застосовуються для нанесення покриттів за допомогою електроіскрового легування, залежно від виду обробки та оброблюваного матеріалу

Оброблювальний матеріал	Вид обробки та приклади електродних матеріалів				
	Точіння	Фрезерування	Свердління, зенкерування	Нарізання, різблення	Розгортання, протягування
Стали	ВК8, Т15К6, ТТ7К12, TiCN, (Ti,Al)N, ZrN, TiC, TiN графітні електроди	TiN, CrN, BK6, BK8	TiN, BK8, T5K10, TiN, AlN, графітні електроди, СТИМ	ZrN, AlN, T15K6, T30K4	T30K4, TiCN, T15K6, AlCN, AlN, TiN, графітні електроди
Чавуни	TiN, ZrN, AlN, BK8, BK6, BK4, BK2, BK3, BK3M, BK6M	AlN, TiN, T15K6, BK6, CrN	ZrN, AlN, TiN, BK8, BK6, BK4	BK3M, BK6M, ZrN, TiN	BK2, BK4, BK3M, BK6M, TiN, AlN

Продовження таблиці 1.2

Титан і титанові сплави	ZrN, CrN, AlN+Al ₂ O ₃ BK8, BK4, BK6M	CrN, ZrN, BK3, AlCN, CrCN,	Mo ₂ B ₅ , MoS ₂ , AlN + MoS ₂ , CrB ₂	TiCN+ MoS ₂ , BK4, BK6M	(Zr, Cr) N, BK4, BK6M, BK3M
Кольорові металита їх сплави	ZrN, CrN, AlN+Al ₂ O ₃ TiN+Al ₂ O ₃ TiCN, AlN, TiN, BK4, BK2, BK3M	MoS ₂ , (Ti, Cr) N, (Zr, Cr) N, (Ti, Cr) N	TiCN, TiN, CrN, AlN, BK8, BK4, BK2, BK3	MoS ₂ , BK6, ZrN, BK6M, BK2, CrN, TiCN, BK3M	TiN, MoN, AlN, BK2, BK3M, TiCN
Важкооброблювані матеріали	BK8, TT7K12, T14K8,	BK6M, BK8, T15K10	T5K12, TT7K12, BK6M, BK8	T30K4, BK4, T14K8,	T30K4, BK6M, BK3M, T15K6, BK8
Неметалеві матеріали	TiCN, BK4, TiN, AlN, BK3M, BK2	TiCN, TiN, AlN, BK6	TiCN, TiN, AlN, BK4, BK2	TiCN, TiN, AlN, BK3M, BK2	TiCN, BK3M, TiN, AlN,

Так як перераховані технології порошкової металургії вимагають великі витрати енергії, часу, матеріалів і складного обладнання, багато авторів [41,42,46,54,55] пропонують в ці технології впровадити метод СВС (високотемпературний синтез, що самопоширюється). Дане поєднання дозволить зробити технології енергозберігаючими та ресурсозберігаючими.

На думку авторів [60], застосування методу СВС-екструзії є новим підходом технологічного процесу отримання електродних матеріалів. Цей метод поєднав у собі переваги як екструзії (можливість отримувати вироби з потрібним профілем та з мінімальною подальшою обробкою), так і СВС-технологій (енерговитратність, економічність, простота обладнання та інші). Даним методом на думку авторів [7, 44] виходять найдешевші компактні електроди. За допомогою методу СВС-екструзії значно спрощується одержання електродів. Сплави, отримані цим методом, значно відрізняються за механічними

властивостями та структурою від сплавів, які отримані традиційними методами, що обумовлюється нерівноважною умовою синтезу. Синтез матеріалу та формоутворення заготовок відбувається за кілька секунд (замість годин) в одному технологічному циклі.

При створенні безвольфрамових і вольфрамовмісних електродних матеріалів потрібно враховувати вплив міжелектродного середовища та можливість утворення в процесі електроіскрового легування боридних, карбідних, нітридних фаз. Для зниження утворень оксидних плівок на поверхні шару, що формується, доцільно до складу електродного матеріалу вводити компоненти, які грають роль флюсів, до них відносяться кремній, марганець, бор, кальцій і різні лужні метали.

Як флюси раціонально використовувати і вводити мінеральні асоціації, які виконують одночасно роль мікролегуючих добавок поверхневого шару. У цьому аспекті представляється інтерес використовувати в електродному матеріалі добавки датолітового концентрату - боровмісної сировини Далекосхідного регіону [47]. Цей концентрат, крім бору, містить і інші важливі складові елементи, такі як Al, Fe, Ni, Cr, Ti, Co, Mn, Ca, Si і ряд рідкісноземельних елементів.

Для електроіскрового легування застосовуються установки з ручним керуванням, механізовані установки, спеціалізовані установки (комплекси).

Установки з ручним керуванням складаються з генератора імпульсів електричного струму, ручного вібратора, електродів, за допомогою яких здійснюється легування. Ручний вібратор включає (корпус, магнітопровід, котушку, якір, електротримач). Механізовані установки включають генератор імпульсів електричного струму з органами управління, одноелектродні і багатоелектродні головки для закріплення анодів, а так само для передачі їм певного руху щодо поверхонь катода, набір електродів-інструментів і верстати в яких будуть встановлюватися оброблюваний катод і головки з електродами. Можуть використовуватися універсальні, спеціальні та верстати з ЧПУ.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Спеціалізовані установки відносяться до класу електромеханічних пристроїв, основними компонентами яких є генератор імпульсів струму та електродна комутуюча система.

Електрична частина таких установок крім генератора включає блоки управління приводами електродів, рухом катода, автоматичного регулювання відстані між анодом і катодом. У механічну частину даних установок входять електрод, механізми кріплення та руху катода, механізми відносного переміщення електродів. Електрод-інструмент складається з приводу, механізму передачі руху анодам, струмопровід та механізм кріплення анодів – електроутримувач [25, 77].

Поруч із ручними і механізованими установками у країнах, як і Японія при Електроіскровим легуванні застосовуються автоматизовані комплекси у яких використовується робототехніка. Використовуються такі комплекси в авіакосмічній промисловості та на підприємствах військово-промислового комплексу. Електроіскровому легуванню піддаються деталі різного рівня складності, які впливають на працездатність окремих деталей та машин загалом [8].

Автоматизовані комплекси так само повинні включати блок управління генератором імпульсів і механічними рухами анода і катода, і який включає банк даних по процесах обробки і блок узгодження сигналів, які надходять з датчиків контролю якості формованих покриттів, з входом в обчислювальний комплекс.

Автори [8] зазначають, що у час частіше використовуються установки з ручним управлінням, як зарубіжних і вітчизняних виробників.

Електроіскрове легування на установках з ручним керуванням відбувається за допомогою механічного контакту анода та катода (контактний метод електроіскрового легування). На механізованих установках процес ЕІЛ можна здійснювати двома способами, за допомогою механічного контакту електродів, і без контакту. У різних галузях промисловості застосовуються 2 типи ручних установок: для «чистового» зміцнення та «грубого» зміцнення.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Чистове електроіскрове легування застосовується у тих випадках, коли шорсткість одержуваного покриття Rz не повинна бути більшою за 40-80 мкм, таке легування більше підійде для зміцнення інструменту.

Починаючи з 60-х років випускалися вітчизняні установки типу ЕФІ, які призначені як для «чистового», так і для «грубого» електроіскрового легування. В даний час використовуються модернізовані установки, призначені для електроіскрового легування як вітчизняних так і зарубіжних фірм. До основних частин таких установок належать: блок живлення та ручний вібратор пістолетного типу.

Як джерела електричних імпульсів у цих установках є генератори типу РС, які були запропоновані Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренка. Робота установок заснована на тому, що джерело постійного струму через резистор, що обмежує струм, заряджає накопичувальний конденсатор. Електрична енергія накопичена конденсатором у момент пробую міжелектродного проміжку швидко звільняється. За допомогою віброуючого або обертового електрода відбувається здійснення комутації електричного кола.

Установка «Electroarc» (США), за даними фірми, може забезпечити підвищення стійкості інструменту на 300-800%, маючи товщину покриття 5-10 мкм.

Автори [22] описують, що для «чистового» ЕІЛ застосовуються генератори високих частот у яких комутують елементи для зарядної Кз і розрядної Кр ланцюгів мають управління, яке не залежить від міжелектродного проміжку, яке виробляється автономним блоком управління, які розділені в часі по ланцюгах Кз і Кр.

У разі використання спеціалізованих установок (автономні конструкції), які призначені для нанесення покриттів, ефективність електроіскрового легування в різних випадках може збільшитися в кілька разів. Прикладом таких установок є установки Досвідченого заводу Інституту прикладної фізики, «Елітрон», які створені для деталей типу тіл обертання, пізніше були спроектовані та

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

виготовлені установки для електроіскрового легування деталей та інструментів з плоскими поверхнями. Установки «Елітрон» мають великий діапазон технологічних можливостей та параметрів формування легованого шару. Найбільш поширеними моделями ручних і механізованих установок для ЕІЛ заводу є: «Елітрон-17», «Елітрон-22А», «Елітрон-52Б», «Елітрон-120А» (застосовується для зміцнення металорізальних інструментів осьових форм типу свердлів, розгорток та ін.), «Елітрон-12» штампів гарячого штампування), "Елітрон-181А", "Елітрон-502А", "Елітрон-240А", "Елітрон-350" "Елітрон-ТСП" (ЕІЛ зовнішніх поверхонь обертання), які були розроблені в 70-80гг. ХХ ст.

Як було зазначено раніше, установки для електроіскрового легування виготовляються не лише вітчизняні, а й закордонні, це доводить, що процес електроіскрового легування є перспективним та економічно ефективним. У (таблиці 1.3) наведено приклади вітчизняних та зарубіжних ручних та механізованих установок для ЕІЛ.

Таблиця 1.3 – Приклади ручних та механізованих установок вітчизняних та зарубіжних виробників

Країна виробник	Назва установки
Молдова	РУЕІЛ-2006 (ручна установка електроіскрового легування). До складу установки входить два електрода, що вібрує і обертається.
	МЕІЛ-14 (механізована установка електроіскрового легування) з ЧПУ. Встановлення дозволяє виконувати ЕІЛ за заданою програмою.
	Alier-31, Alier-52, Alier-53, Alier-54 та інші
США	Electroarc, Mold Doctor
Німеччина	Tucadur 2000, Eroleg
Франція	SNPM1
Японія	SparkDepo mod.500, 300, 200; MicroDepo mod.100, 140; Depozitron
Китай	D9105A, D9110A, D9130A
Угорщина	Duromatic
Швейцарія	Carbidor
та інші установки	

Висновки із літературного огляду. Мета та завдання дослідження

Висновки:

1. Проведений літературний огляд показав, що нанесення захисних покриттів, як на ріжучий інструмент, так і на деталі машин, методом електроіскрового легування, є одним з найдієвіших та економічно виправданих методів як для підвищення продуктивності обробки різанням, так і для продовження терміну служби деталей машин.

2. Багато дослідників говорять про те, що в процесі ЕІЛ протікають складні фізико-хімічні процеси, які зрештою призводять до перенесення матеріалу електрода (анода) на катод і контролюються балансом тепла, що виділяється внаслідок електричних розрядів.

3. Переважне перенесення еродованого матеріалу анода на катод забезпечує формування на катоді поверхневого шару із заданими експлуатаційними характеристиками та фізико-хімічними властивостями. Залежно від призначення покриття та виду обробки як легуючий електрод застосовуються різні матеріали. Доцільно використовувати електроди, отримані методом СВС-Екструзії.

4. Покриття, яке наноситься методом електроіскрового легування, міцно з'єднується з матеріалом основи за рахунок дифузії.

5. Дослідження, проведені багатьма авторами, показують що шорсткість нанесеного покриття, методом електроіскрового легування виходить вище, ніж це прийнято у робочих поверхнях ріжучого інструменту, що може негативно позначитися, як на шорсткість оброблюваної деталі, так і на коефіцієнт тертя при обробці різанням.

6. Зносостійкі покриття істотно впливають на параметри якості формованого поверхневого шару, оброблюваних деталей, знижуючи показник шорсткості, залишкові напруги. Однак досліджень з вивчення впливу захисних покриттів на різальний інструмент у процесі різання дуже мало.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Мета дослідження:

Дослідження характеристик покриття, отримане методом електроіскрового легування для підвищення зносостійкості різального інструменту.

Завдання дослідження:

1. Виготовити пластину та методом електроіскрового легування, змінюючи електричні режими та частоту вібрації електрода нанести на її поверхню покриття.

2. Виміряти шорсткість зразка з покриттям та отриманими даним побудувати залежності шорсткості від частоти вібрації електрода, розробити рекомендації щодо застосування методу електроіскрового легування для зміцнення різального інструменту та деталей машин.

3. Провести аналіз електроіскрового легування, опрацювавши результати досліджень за допомогою статистичних методів.

4. Провести дослідження щодо впливу нанесеного покриття на виникнення напруги в ріжучому інструменті на прикладі конкретної операції в програмному модулі «ANSYS Workbench».

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

ГЛАВА 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

2.1 Вплив режимів електроіскрового легування на шорсткість одержуваного покриття

Однією з важливих особливостей процесу ЕІЛ може бути можливість формування покриття на робочих поверхнях деталей, різальних інструментів з рядом фізико-хімічних, механічних та експлуатаційних властивостей. За допомогою варіювання електричних режимів, матеріалів електродів та інших параметрів, можна змінювати структуру, товщину, шорсткість, контролювати рівень залишкових напруг і багато інших властивостей легованих шарів, що формуються [85].

Раніше в роботі були розглянуті переваги та недоліки процесу ЕІЛ. Мабуть, одним з головних недоліків цього методу є підвищена шорсткість, яка формується в процесі легування і є однією з визначальних характеристик поверхневого шару і має великий вплив на експлуатаційні властивості деталей машин, і різальних інструментів. Дослідження авторів [19,39,56, 68] показали, що шорсткість нанесеного покриття значною мірою залежить від тих чи інших електричних режимів. Також у роботах встановлено, що матеріали електродів їх теплофізичні властивості, режими електроіскрового легування значною мірою визначають шорсткість поверхні.

У зв'язку з цим нами поставлена мета провести експеримент і досліджувати, як впливатимуть електричні режими, а саме потужність розряду (напруги) та частота вібрації анода, на шорсткість одержуваного покриття методом електроіскрового легування.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2.2 Методика проведення експерименту

Суть експерименту полягає в наступному: На металеву пластину (катод), яку розділили на кілька ділянок фрезеруванням, змінюючи електричні режими та частоту вібрації електрода, наносили покриття, а потім вимірювали шорсткість поверхні кожної ділянки.

Для проведення експерименту як матеріал катода нами була обрана конструкційна вуглецева сталь Ст3 ДСТУ 380-2005, хімічний склад сталі представлений в (таблиці 2.1), механічні властивості сталі в (таблиці 2.2).

Таблиця 2.1 - Хімічний склад Ст3 у відсотковому співвідношенні

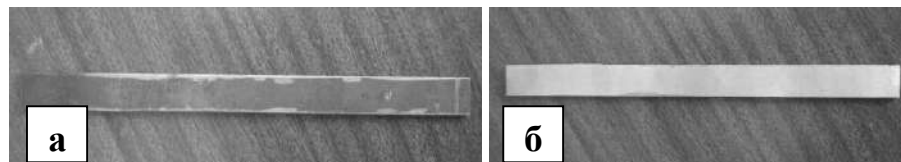
Хімічний елемент	%
Вуглець (C)	0,14-0,22
Фосфор (P)	до 0,04
Кремній (Si)	0,15-0,3
Хром (Cr)	до 0,3
Марганець (Mn)	0,4-0,65
Азот (N)	до 0,008
Нікель (Ni)	до 0,3
Мідь (Cu)	до 0,3
Сірка (S)	до 0,05
Миш'як (As)	до 0,08

Таблиця 2.2 – Механічні властивості матеріалу сталь 3

σ_B	σ_T	δ	НВ
МПа	МПа	%	
370-480	205-245	23-26	131

Зі сталі була відрізана пластина шириною 20мм, довжиною 240мм і товщиною 8мм. Потім, для виконання подальших робіт з пластиною, її закріпили

в лещатах, і на вертикально-фрезерному верстаті моделі 675 провели невелику обробку поверхні пластини, зачистивши її пелюстковим шліфувальним кругом. На (рисунку 2.1) показана поверхня, що вийшла після зачистки поверхні.



а – до обробки; б – після обробки (зачистки)

Рисунок 2.1 – Поверхня пластини

Для подальшого проведення експерименту пластина була розділена на 30 ділянок шириною 5мм, розділені між собою канавками. Ця операція була виконана на горизонтально-фрезерному верстаті 6Р81Г, як ріжучий інструмент для нарізання канавок була взята фреза дискова матеріал Р6М5 $D=125\text{мм}$; $d=22\text{мм}$; $r=2,0\text{мм}$; $z = 64$ ДСТУ 2679-93.

Для цієї операції було розраховано режими різання. Оскільки якість отриманих канавок у процесі обробки нас мало цікавило, тому режими різання були розраховані лише для (чорнового) фрезерування.

Глибина різання $t = 2,0$ мм. Решта даних і формул для розрахунків режимів різання беруться з літератури [6, 65].

Так як нам на поверхні пластини потрібно отримати 31 канавку то отже, загальний час обробки збільшився в 31 раз до 0,62 хв.

Незважаючи на те, що однією з переваг електроіскрового легування, є те, що поверхня, на яку наноситиметься захисне покриття, не вимагає спеціальної попередньої обробки, тим не менш пластина, після фрезерної операції обробилася на шліфувальному верстаті. Це робилося для того, щоб обробити

поверхню після попередньої операції і тому, що шорсткість поверхні деталі (катода) на яку буде наноситися покриття, значною мірою впливає на міцність зчеплення її з покриттям. На думку автора [35] оптимальною буде вихідна шорсткість в межах від 0,7 ... 1,6 мкм, яка забезпечуватиме мінімальні значення кінцевої шорсткості 4,5 ... 6,3 мкм.

Обробку поверхні проводили на плоскошліфувальному верстаті ОШ48, як інструмент було взято коло шліфувальна форма ПП тип 1 250x100x32 25AF60K6V. Для шліфувальної операції також були розраховані режими різання, переміщення столу при обробці пластини, здійснювалося в ручну.

Отриману при розрахунку величину потужності, так само перевірили за умовою $NE < N_{\text{верстата}} \eta = 5,1 < 6,5 \cdot \eta = 5,2 \text{ кВт}$ (за паспортом верстата).

Основне технологічне час, витрачене виконання шліфувальної операції (чорнової і чистової), становило $T_0 = 4,8 \text{ мин}$. На (рисунку 2.2) показана пластинка після виконання фрезерної та шліфувальної операції.

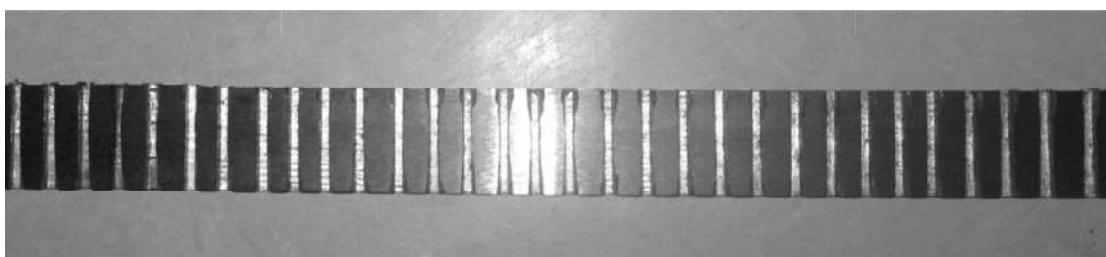
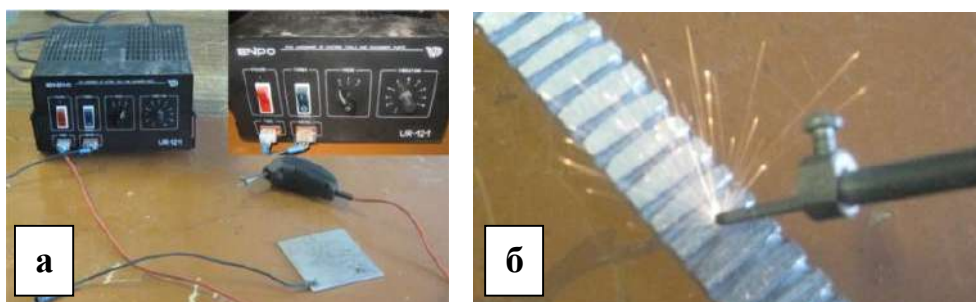


Рисунок 2.2 – Поверхня пластини після фрезерної та шліфувальної обробки

Нанесення покриття здійснювалося на повітрі компактним електродом за допомогою вібрації на установці UR-121, призначеної для зміцнення електроіскрового легуванням як зовнішніх, так і внутрішніх поверхонь деталей машин, ріжучого інструменту. Принцип роботи установки ґрунтується на періодичних розрядах накопичувальних конденсаторів при торканні вібруючим електродом поверхні оброблюваної деталі. При розряді накопичувальних конденсаторів відбувається перенесення матеріалу електрода в поверхневий шар

оброблюваної деталі, у разі пластини. Як матеріал легуючого електрода (анода), нами був обраний твердий сплав ВК8, що містить карбід вольфраму WC 92% і кобальт Co 8%. Нами була поставлена мета, змінюючи електричні режими та частоту вібрації на установці UR-121, дослідити як зміниться шорсткість покриття.

На установці є 3 електричних режими, які відрізняються один від одного подається напругою (50В, 100В, 150В), на кожному з режимів налаштовувалась певна частота вібрації (130-500Гц) електрода, всього режимів вібрації на установці 11. Експеримент проводився на всіх трьох режимах. Покриття наносилося на ділянки завширшки 5мм, розділені між собою канавками. Для отримання більш точних показників шорсткості покриття на всіх трьох електричних режимах і обраних нами частот вібрації наносилося на дві ділянки. Покриття на поверхню кожної ділянки наносилося за однакове число проходів електрода, щоб цей показник не впливав на показник шорсткості та надання суцільності покриттю. На (рис. 2.3) показана установка UR-121 і процес ЕІЛ, а на (рис. 2.4) пластина з нанесеним покриттям.



а - установка для ЕІЛ UR-121; б – процес нанесення покриття на пластину

Рисунок 2.3 – Електроіскрове легування

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

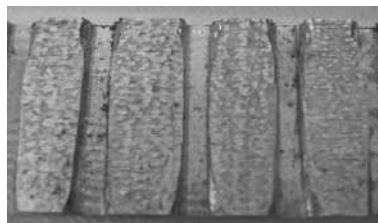


Рисунок 2.4 – Поверхня пластини з нанесеним покриттям ВК8

Для вимірювання шорсткості поверхні пластини після електроіскрового легування використовували профілограф – профілометр АБРІС-ПМ7. Принцип дії приладу полягає в тому, що коливальні рухи голки, яка обмацує поверхню, викликають зміни напруги, які реєструються пристроєм, що відліковується.

Початкова шорсткість поверхні пластини без покриття $Ra=1,6$ мкм. Отримані значення шорсткості після ЕІЛ та перевірки на установці занесли (таблицю 2.3), профілограф – профілометр АБРІС-ПМ7 зображений на (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Профілограф – профілометр АБРІС-ПМ7

Таблиця 2.3 – Значення шорсткості поверхні пластини після ЕІЛ

Електричні режими (напруга, В)	Режими вібрації електрода	Частота вібрації електрода, Гц	Шорсткість поверхні Ra , мкм		
			На ділянці	кожній	Середнє значення Ra , мкм
Режим 1 (50 В)	1	130	1,70	1,74	1,7
	2	140	1,85	1,82	1,8
	3	150	1,96	1,93	1,9
	5	170	2,22	2,12	2,2
	7	190	2,42	2,37	2,4

Продовження таблиці 2.3

Режим 2 (100 В)	1	240	2,72	2,67	2,7
	2	250	2,96	3,04	3,0
	3	260	3,09	3,12	3,1
	5	280	3,35	3,42	3,4
	7	300	3,52	3,51	3,5
Режим 3 (150 В)	1	350	3,86	3,96	3,9
	2	360	4,10	4,04	4,1
	3	370	4,38	4,35	4,3
	5	390	5,0	4,85	4,9
	7	410	6,17	6,0	6,1

За отриманими даними побудували графіки залежності шорсткості від частоти вібрації електрода та електричних режимів (рис. 2.6), (рис. 2.7), (рис. 2.8).

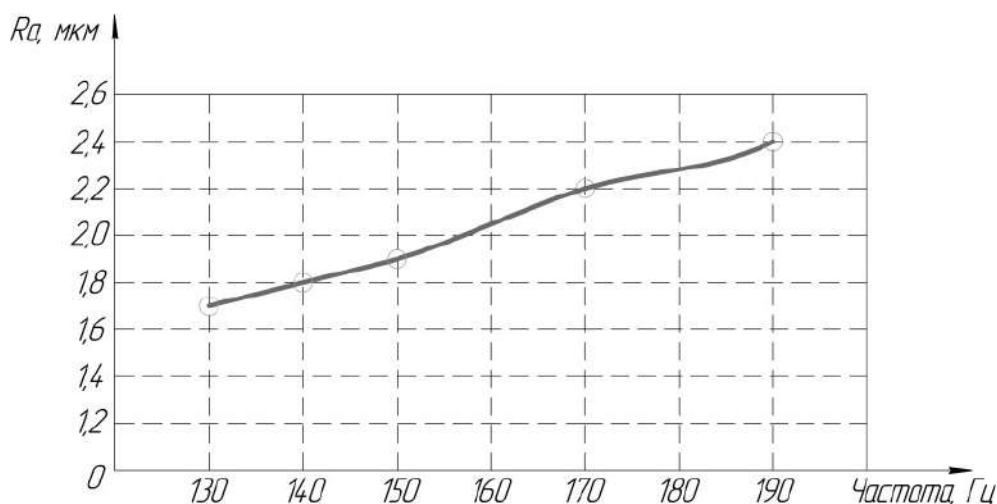


Рисунок 2.6 – Залежність шорсткості поверхні пластини від частоти вібрації електрода при напрузі 50В

На (рисунок 2.6) представлена залежність шорсткості поверхні пластини від частоти вібрації електрода, отримана на електричному режимі 1 при напрузі 50В. На графіку видно, що зі збільшенням частоти вібрації електрода шорсткість поверхні зростає. За отриманою залежністю, так само можна сказати, що даний режим є «м'якшим» і підходить для нанесення покриттів електроіскровим методом на інструмент, від якого залежить якість обробки деталей.

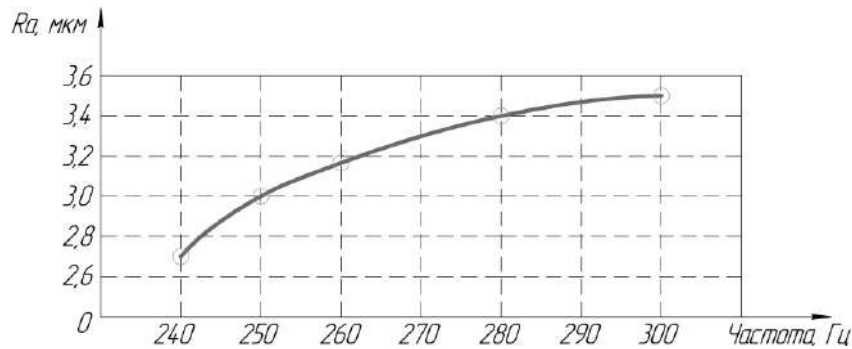


Рисунок 2.7 – Залежність шорсткості поверхні пластины від частоти вібрації електрода при напрузі 100В

На рис. 2.7 представлена залежність шорсткості поверхні пластины від частоти вібрації електрода, отримана на електричному режимі 2 при напрузі 100В. На даному графіку, як і на попередньому графіку видно, що зі збільшенням частоти вібрації електрода шорсткість поверхні збільшується. По отриманій залежності, можна сказати, що електричний режим 2 підходить для нанесення покриттів на деталі, для яких шорсткість поверхні не така важлива як її зміцнення.

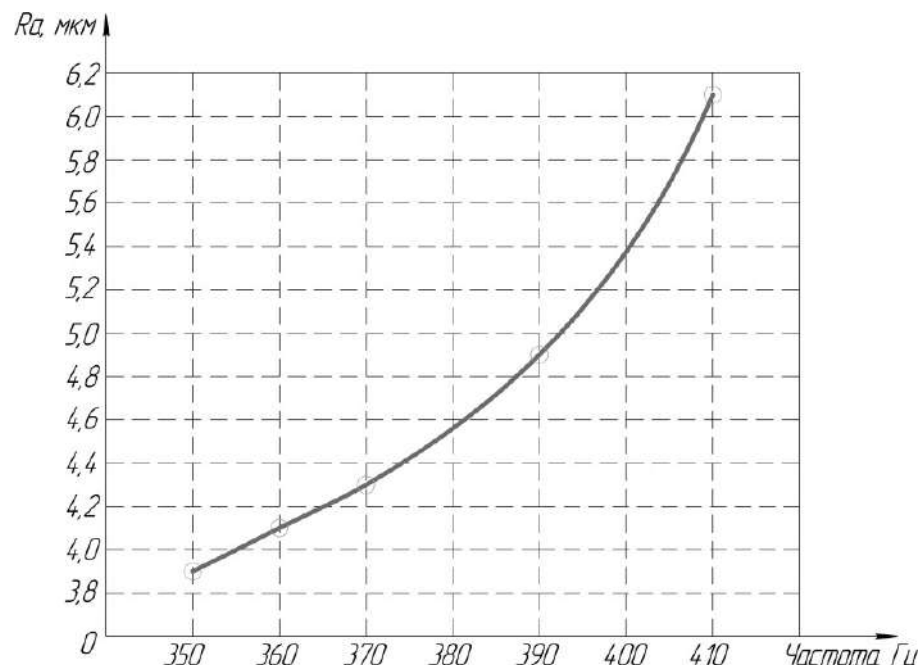


Рисунок 2.8 – Залежність шорсткості поверхні пластины від частоти вібрації електрода при напрузі 150В

На рис. 2.8 представлена залежність шорсткості поверхні пластини від частоти вібрації електрода, отримана на електричному режимі 3 при напрузі 150В. На даному графіку, так само як і на попередніх графіках, можна побачити, що збільшуючи частоту вібрації електрода (анода) шорсткість поверхні пластини (катода) збільшується. Виходячи з отриманої залежності можна сказати, що даний електричний режим у зв'язку з отриманням на ньому більшої шорсткості, є більш «грубим» і як наслідок, для зниження шорсткості отриманого покриття на даному режимі може знадобитися додаткова обробка поверхні.

Також видно, що зі збільшенням напруги на електроді збільшується шорсткість зміцненої поверхні.

2.3 Результати, обговорення та висновки з експериментальної частини. Рекомендації щодо застосування методу електроіскрового легування

Проаналізувавши отримані дані і побудувавши по них графіки залежності шорсткості від частоти вібрації електрода і електричних режимів зробили висновок про те, що жорсткість режимів легування, а саме зміна електричних режимів і частот вібрації електрода (анода), призводить до збільшення шорсткості поверхні деталі, в нашому випадку пластини Зважаючи на те, що тенденція зростання шорсткості поверхні на графіках вийшла різною, тому надалі необхідно провести обробку результатів.

Найбільша шорсткість поверхні, що спостерігається при переході з одного електричного режиму на інший, різниця становить 0,3-0,4 мкм.

Збільшення шорсткості обробленої поверхні може бути пов'язане з потужністю розряду, від якої може залежати проникнення матеріалу електрода (анода) в деталь (катод). Можна припустити, що зі збільшенням потужності розряду, збільшується не тільки товщина покриття, але й проникнення матеріалу анода на поверхню катода. Отже, можна сказати, що вся потужність розряду, яка надходить на електрод (анод), витрачається на його часткове розплавлення і

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

переноситься на деталь у нашому випадку на пластину (катод).

Характер зростання товщини покриття i , отже, перенесення та проникнення матеріалу електрода (анода) на деталь (катод), в процесі електроіскрового легування з плином якогось часу може бути обумовлено уповільненням осідання його на деталі (катоді) за рахунок випаровування в навколишнє середовище. Внаслідок того, що товщина покриття, що формується, збільшується зі зростанням потужності розряду, робимо припущення, що i якість поверхні буде ставати значно гіршою, а саме збільшиться шорсткість одержуваної поверхні.

Крім того, ми припускаємо, що початкова шорсткість поверхні катода, а також режими легування можуть бути причиною підвищення шорсткості. Таким чином, ми можемо стверджувати, що наша пластина має низьку шорсткість поверхні $Ra=1,6\mu\text{m}$, що призводить до менших нерівностей. В результаті матеріал анода розплавлятиметься та заповнюватиме їх швидше, ніж на поверхнях із більшою шорсткістю поверхні.

Виходячи з отриманих залежностей, можна надати такі рекомендації:

1) Найкращим режимом для нанесення покриття методом електроіскрового легування на ріжучий інструмент, який залежить від високої якості обробки деталей, є один електричний режим з напругою 50В. Так як він більш «м'який» і має меншу шорсткість поверхні, ніж інші режими

2) (2)Електронний режим 2 при напругі 100В є типовим. Він краще підходить для покриття деталей, які потребують значної шорсткості поверхні, отриманої в результаті електролізу (наприклад, деталі сільського господарства та інші [19]).

3) Електронний режим 3 з напругою 150В є більш «грубим», ніж перші два через високу шорсткість поверхні покриття. Таким чином, для зменшення шорсткості отриманого покриття рекомендується використовувати електричні режими 2 і 3, а в деяких випадках і на першому етапі додаткову фінішну обробку поверхні. Ця обробка зменшує шорсткість поверхні, але не видаляє повністю

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

покриття.

Шліфування можна використовувати як додаткову обробку, щоб зменшити шорсткість поверхні, обробленої електроіскровим методом. Шліфування видаляє частину раніше нанесеного матеріалу, щоб досягти поверхні бажаної якості. Поверхнева пластична деформація (ППД) може бути використана для обробки поверхні. Цей метод дозволяє зменшити як шорсткість поверхні, так і залишкові напруги, що розтягуються [22].

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

РОЗДІЛ 3. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ЛЕГУВАННІ. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ

3.1 Метрологічне та технологічне забезпечення якості

Деталі машин і різальні інструменти мають значний вплив на експлуатаційні властивості, і в більшості випадків параметри якості робочих поверхонь мають вирішальний вплив. Щоб визначити характеристики якості робочих поверхонь деталей, що виготовляються, або різальних інструментів, необхідно забезпечити необхідні, щоб гарантувати певні експлуатаційні характеристики. Для виконання цього завдання важливо мати розуміння зв'язків між умовами обробки, такими як режими, форма деталі та інструмент. Показники якості оброблюваних поверхонь не створюються лише під час завершальних операцій; вони створюються протягом усього технологічного процесу виготовлення різальних інструментів і деталей.

Багато факторів, включаючи потужність джерела, частоту вібрації електрода, взаємодію електродів (анода та катода) між собою та інші, впливають на якість поверхневого шару, створеного після електроіскрового легування, як було зазначено раніше в роботі, так само як і при виготовленні деталей машин і ріжучих інструментів. У більшості випадків режими та час легування гарантують якість ЕІЛ.

Забезпечення якості та довговічності різального інструменту та деталей машин є одним із головних завдань на виробництві, оскільки це дозволить утримувати високі позиції на ринку. Все це залежить від вимірювань, якості операцій і того, наскільки добре оснащене підприємство системами контролю. Якість — це набір характеристик продукту, які стосуються його здатності задовольняти певні чи передбачувані потреби залежно від його призначення.

Контроль якості є необхідним для управління якістю виробів, таких як

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

деталі машин, різальні інструменти тощо. Контроль якості передбачає вимірювання різних параметрів продукту, а також процеси аналізу та випробування. Перевірка відповідності кількісних і якісних характеристик властивостей деталей машин, ріжучого інструменту та процесу, від якого залежить якість виробу відповідно до встановлених технічних вимог, називається контролем якості. Технічні стандарти, регламенти, завдання та умови та інші документи визначають вимоги. Зразки та стандартні зразки можуть відповідати вимогам до якості. Невідповідність, або шлюб, виникає, якщо ці вимоги не виконуються. Коригувальні дії проводяться, щоб виправити причини невідповідності.

Метрологічне забезпечення якості вимірювань – це діяльність, яка встановлює та застосовує наукові та організаційні основи технічних засобів, правил і стандартів, необхідних для досягнення єдності та необхідних точних вимірювань. Метрологія, наука про виміри, є основою для метрологічного забезпечення [58]. Для того, щоб результати вимірювань тих самих параметрів були порівнянними, вимірювання повинні бути виконані в різний час, у різних місцях і за допомогою різних інструментів і методів. Як зазначено в стандарті ДСТУ 8.820-2013, «Державна система забезпечення єдності вимірів (ДСІ)». Металічильник. Основні положення»

Метрологічне забезпечення охоплює вимірювання, які виконуються під час виготовлення та експлуатації різних предметів, таких як різальні інструменти та деталі машин; дослідження та експерименти, а також дослідно-конструкторські роботи; медицина, сільське господарство та інші сфери, а також інші роботи та надання послуг.

Мета метрологічного забезпечення вимірювань полягає в тому, щоб створити умови для отримання інформації про вимірювання, яка має характеристики, необхідні та достатні для прийняття певних рішень щодо різних сфер діяльності.

До технічних основ метрологічного забезпечення належать такі системи

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

результатів вирішення попередньої задачі;

- планування процесів випробувань, вимірів, контролю;
- забезпечення вимірювань, контролю та випробувань за допомогою відповідних технічних засобів вимірювань;
- підтримка технічних пристроїв у метрологічно справному стані;
- проведення випробувань, вимірювань, контролю та обробку їх результатів (тоді, коли це потрібно);
- навчати та підвищувати метрологічну кваліфікацію інженерно-технічних працівників.

Вимірювання є основою метрології. У забезпеченні якості метрологічного вимірювання вибір засобів вимірювання є одним з найбільш важливих факторів. Через те, що в цій операції враховуються особливості контрольованого засобу, а також закладена в ньому межа допуску, до цієї операції слід підійти найбільш ретельно. Необхідно враховувати метрологічні характеристики засобів вимірювання, такі як ціна поділу, діапазони або межі вимірювань, клас точності, похибка та інші, які пов'язані з контрольованими параметрами продукту. Перед початком вимірювань необхідно перевірити засіб вимірювання. Регульовальні елементи та перемикачі повинні бути надійно зафіксовані та легко регулюватися. Змінюючи електричні величини, необхідно перевірити, чи працюють джерела живлення, встановити покажчик на нуль при включенні та вимкненні електроенергії, перевірити справність джерел живлення тощо. Коли вимірювальні процеси автоматизовані, перед проведенням вимірювань система проходить певний тест, щоб перевірити результати виходу системи. Це дозволяє перевірити систему вимірювання та переконатися, що вона працює правильно, і що результати на виході правильні. Крім того, необхідно вжити заходів, щоб запобігти можливим систематичним помилкам до початку вимірювань, наприклад перевірити наявність свідоцтва про перевірку або калібрування СІ.

Вимірювання з високою точністю можуть проводитися лише за умови, що засіб вимірювань здатний зберігати (відтворювати) одиницю величини, яка

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

значно не змінюється як у часі, так і під дією зовнішніх змінних. Таким чином, для цього необхідний постійний контроль.

Після неякісних вимірювань помилкові результати вимірювань так само часто виявляються, як і під час використання неточних інструментів. В обох випадках брак може призвести до неякісної продукції на етапах виробництва деталей машин або ріжучих інструментів. Це призведе до зниження якості, точності, довговічності та надійності.

Вимірювання лінійних і кутових величин включають прямі, непрямі, сукупні та відносні вимірювання. Принцип вимірювання — це сукупність фізичних явищ, на яких базуються вимірювання. Метод - це поєднання методів і інструментів для вимірювання. Методи вимірювання можна розділити на дві групи відповідно до того, як вони організовані для порівняння вимірюваної величини з одиницею вимірювання, як показано на рис. 3.2:



Рисунок 3.2 – Класифікація методів вимірів

- метод безпосередньої оцінки, при якому значення величини визначається відліковим пристроєм пристрою, який використовується для вимірювання;
- метод порівняння з мірою, при даному методі величина порівнюється з величиною заходу, що відтворюється;
- метод протиставлення, при даному методі вимірювана і відтворювана з

мірою величини, разом взаємодіють на порівняльний прилад, за допомогою приладу між цими величинами встановлюється співвідношення;

- диференціальний метод, що характеризується виміром різниці між даною величиною і відомою величиною, що відтворюється мірою. Даний метод дозволяє дати результати з досить високими показниками точності, у тому випадку, коли використовуються грубі засоби вимірювань;

- нульовий метод, даний метод схожий з диференціальним, відмінністю є те, що різниця між даною величиною та мірою зводиться до нуля. Перевагою даного методу є те, що міра може в кілька разів бути менше вимірюваної величини;

- метод збігів, за допомогою даного методу різниця між вимірюваною і відтворюваною мірою величинами вимірюють за допомогою збігу відміток шкал або періодичних сигналів.

- метод заміщення, у якому вимірювану величину замінюють відомою величиною.

Незалежно від того, для чого вони використовуються або для чого вони використовуються, всі інструменти вимірювання мають низку загальних характеристик. Засоби вимірювання поділяються на категорії відповідно до функцій, які виконує система забезпечення єдності вимірів:

- Метрологічні, призначені для метрологічних цілей відтворення одиниці та її зберігання чи передачі засобам вимірювань;

- робітники, призначаються щодо технічних вимірів.

Першу групу засобів вимірювань розробляють, виготовляють та використовують у науково-дослідних установах, оскільки вони нечисленні. Таким чином, більшість інструментів вимірювання належать до другої групи.

Є ще один клас, який використовується як зразок, окрім двох перерахованих класів, у яких розподіляються кошти вимірів. Еталони призначені для передачі розміру одиниці від більш точних до менш точних інструментів. Еталонна база Росії складається з первинних і вторинних стандартів, а також вихідних установок вищої точності, призначених для відтворення фізичних

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

величин.

Вибір засобів вимірювання для конкретних цілей залежить від багатьох факторів. Забезпечення необхідної точності вимірів є основною вимогою. Щоб обґрунтувати цю вимогу, необхідно зрозуміти мету вимірювання. Дві групи даних цілей відрізняються один від одного таким чином:

- визначення у заданих одиницях дійсного розміру вимірюваної величини;
- визначення відповідності вимірюваної величини, визначеного (номінального) розміру, для якого задані допустимі граничні відхилення.

У першому варіанті, коли ви вимірюєте величину, достовірність повністю визначається похибкою, яка утворюється під час вимірювання. Завдання, які повинні бути виконані перед визначенням розміру, визначають похибку. У другому варіанті необхідно перевірити, чи розмір вимірюваної величини знаходиться в певному полі допуску. Придатність визначається за результатами вимірювання. Кінцеві результати прийняття товарів, розміри яких перевищують межі допуску, впливають на помилку вимірювання.

Вибір засобів вимірювання має вирішальне значення для забезпечення якості, проведення контролю, експертизи продукції, що випускається, а також для того, щоб деталі машин або ріжучі інструменти працювали в умовах їх функціонування. Проводячи випробування, можна використовувати як евристичні, так і об'єктивні методи, щоб визначити характеристики продукту.

До об'єктивних методів визначення якості належать:

- вимірювальний метод (заснований на інформації, яка отримана під час використання технічних засобів вимірювання).
- реєстраційний метод (заснований на спостереженнях та підрахунках числа випадків, предметів, певних подій);
- розрахунковий метод (інформація даним методом виходить розрахунком);
- метод дослідної експлуатації (є різновид реєстраційного методу, використовується визначення показників надійності, безпеки, екологічності, а як і з допомогою даного методу оцінюють довговічність роботи

електроустаткування).

До евристичних методів визначення якості належать:

- органолептичний метод (заснований на використанні інформації, яка отримана за допомогою органів чуття людини);
- експертний метод (ґрунтується на думках спеціалістів-експертів);
- соціологічний метод (ґрунтується на збиранні та аналізі думок споживачів);

Для проведення експериментального дослідження впливу режимів електроіскрового легування на шорсткість одержуваного покриття, як було описано раніше в експерименті, нами була виготовлена пластина. На всьому протязі технологічного процесу виготовлення пластини використовувалися такі засоби вимірювань, представлені в (таблиці 3.1).

Таблиця 3.1 – Засоби вимірів

Найменування операції	Засіб вимірювання	Роботи, операції, що виконуються цим інструментом
Заготівельна, слюсарна, фрезерна, шліфувальна, управління	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1ДСТУ 166-89	проводить проміжні та кінцеві перевірки основних параметрів пластини.
Нанесення покриття	профілограф – профілометр АБРС-ПМ7	Вимірюється шорсткість поверхневого шару пластини, після нанесення покриття.

Під час виготовлення пластини основні розміри, які контролювалися штангенциркулем, показані на (рис. 3.3).

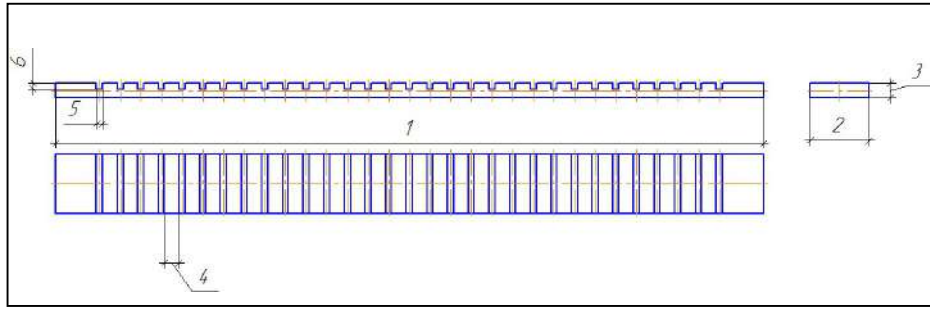


Рисунок 3.3 – Ескіз пластини та розміри контрольовані під час її технологічного процесу виготовлення

Якість поверхні деталей машин і різальних інструментів залежить від багатьох факторів. Одним із них є вибір інструментів для контролю розмірів під час технологічного процесу виготовлення, а також техніки та режими механічної обробки. Технологічне забезпечення якості, необхідне для механічної обробки, залежить від точності, жорсткості, пристосовань, стабільності роботи, стійкості інструменту та вибору відповідного контрольованого інструменту.

У процесі механічної обробки різанням можна змінювати параметри якості та поверхні, які піддаються обробці. Можна розширити можливості цих методів, змінюючи умови обробки, такі як інструментальний матеріал, режими різання тощо.

Як зазначалося раніше, після відрізки пластина була піддана механічній обробці перед нанесенням покриття на неї за допомогою електроіскрового легування.

Поверхня пластини була зачищена під час першого етапу підготовки до нанесення покриття. Очищення та підготовка поверхні деталей машин і різальних інструментів для подальшої обробки, мабуть, одна з найважливіших операцій технологічного процесу. Через високі вимоги до якості поверхня повинна бути чистою при виготовленні деталей машин, різальних інструментів або перед нанесенням покриття. Наявність значної шорсткості, корозії та забруднень на поверхні, що зазнає зміцнення, може призвести до зниження

експлуатаційних властивостей покриття. Якщо не виконувати вимоги до чистоти поверхні та не дотримуватись технологічних режимів очищення, це може призвести до невиконання подальших технологічних операцій, дефектів, ускладнень для виконання контрольних операцій складання та інших проблем.

Обробка деталей машин і різальних інструментів значною мірою залежить від завершальної обробки поверхонь, яка гарантує остаточне формоутворення та просторове розташування важливих поверхонь відповідно до технічних умов, а також надає оброблюваній деталі або інструменту комплекс певних властивостей, таких як низька шорсткість поверхні. У більшості випадків у машинобудуванні та виготовленні інструментів застосовують методи алмазно-абразивної обробки для досягнення цих цілей. При виготовленні відповідальних деталей машин і різальних інструментів, які найчастіше визначають і обмежують експлуатаційні властивості деталей та інструментів загалом, ці методи можуть бути використані. Зважаючи на це, технолог повинен розглянути можливості методів фінішної обробки, щоб забезпечити необхідні параметри якості поверхні, що обробляється, щоб технологічно забезпечити необхідні експлуатаційні властивості. Одним із основних завдань технологічного процесу механічної обробки є формування поверхневого шару з метою отримання необхідної властивості. Усі припущення щодо обробки та порядок виконання операцій розробляються з урахуванням спадковості технологій. Це робиться для збереження позитивних якостей (висока поверхнева твердість, залишкова напруга стиснення тощо) або для усунення негативних якостей (відхилення форми, дефектний шар тощо). Технологічне успадкування — це явище, при якому властивості об'єкта передаються від попередніх операцій механічної обробки до наступних операцій, при цьому між ними існують технологічні зв'язки, що гарантує збереження цих властивостей [61].

Шліфування використовувалося для завершення обробки пластини. Абразивний інструмент може успішно обробляти леговані, загартовані сталі, тверді сплави та багато інших важкооброблюваних матеріалів. Він також може

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

забезпечити високу точність і низьку шорсткість поверхні для широкого спектру ріжучих інструментів і деталей машин. Наразі ми використовуємо плоске шліфування периферії кола.

З вищесказаного можна зробити висновок, що виконання будь-якої технологічної операції передбачає дотримання певних стандартів точності виготовлення та чистоти поверхні, які задані технічними умовами. Зміцнення електроіскровим легуванням деталей машин і різальних інструментів впливає на якість нанесеного покриття. Багато факторів впливають на це, включаючи міцність зчеплення матеріалу анода з основним матеріалом (яка залежить від вихідної шорсткості поверхні, на яку наноситься покриття) [61]. В експерименті було виявлено, що вибраний електричний режим є одним із таких факторів, який залежить від чистоти поверхні та точності оброблюваної деталі або ріжучого інструменту.

Раніше в роботі було зазначено, що існує три різні режими електроіскрового легування: грубий (чорновий), середній (чистий) і м'який (оздоблювальний). Перші два режими працюють краще, ніж м'який. Але на м'яких даних якість поверхні (шорсткість) нижча.

Під час використання деталей машин і різальних інструментів поверхневий шар руйнується першим, і міцність цього шару більшою мірою залежить від виду обробки, яка використовувалася при остаточному формуванні контуру деталі або ріжучого інструменту.

Якість поверхні визначається її фізичними та геометричними властивостями, які визначають її зносостійкість, втомну міцність, стійкість до корозії та інші характеристики.

Геометричні розміри лунок, ступінь їх взаємного перекриття та розміри утворених напливів впливають на якість поверхні, яка обробляється електроіскровим легуванням. На поверхні утворюються лунки після обробки. Метал розбризкується з поверхні, що обробляється, під час розряду, і на лунках утворюються нерівності, відомі як напливи, які спотворюють їхній вигляд.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Щоб створити більш чисту поверхню, необхідно знизити напругу джерела живлення. Зниження напруги призведе до зменшення глибини нерівностей. З іншого боку, режими легування, за допомогою яких можна досягти чистоти поверхні вище сьомого класу, мають низьку продуктивність і значно збільшують час обробки. Таким чином, електроіскрове легування не є економічно вигідним процесом у масовому виробництві. Як зазначено раніше, коли поверхня покриття потребує більшої чистоти, після ЕІЛ необхідно провести додаткову механічну обробку. Поверхні, оброблені ЕІЛ, виглядають матовими, навіть якщо вони мають високий рівень чистоти.

Переважають глибокі структурні перетворення під час процесу ЕІЛ на поверхневому шарі. Деяка кількість металу плавиться та випаровується через тепло, що виділяється під час розряду. Коли температура розплавленого металу знижується далі, поверхневий шар розплавленого металу сильно загартовується. Такі процедури призводять до утворення білого шару на поверхні, який має більшу твердість, зносостійкість і антикорозійні властивості. Білий шар зменшує втомну міцність деталі. Здатність деталей машин і різальних інструментів протистояти руйнуванню протягом певного проміжку часу під дією на них певних навантажень відома як втомна міцність. На їх поверхнях втома металу руйнує частини машин і різальні інструменти. Фізико-механічні властивості поверхневого шару, залишкові напруги та шорсткість визначають втомну міцність. Менша шорсткість означає більшу втомну міцність [61].

У процесі електроіскрового легування нестационарні процеси нагрівання та охолодження матеріалу електродів у зоні імпульсного розряду викликають надлишкові напруги. Залишкові напруги, які виникають у покриттях, значно впливають на експлуатаційні властивості зміцнених деталей машин і ріжучих інструментів. Напруги розтягування зменшують міцність деталей і інструментів, але напруги стиснення зменшують їх, що призводить до тріщин у покриттях, що може призвести до руйнування покриття. Матеріал анода, час, міжелектродне середовище та енергія розряду можуть впливати на розподіл залишкових напруг

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

при електроіскровому легуванні.

Поверхнево пластична деформація (ППД) — це спосіб зменшити напругу, що розтягується в покриттях, і навіть виключити її.

Довжина процесу ЕІЛ також впливає на якість зміцненого шару. Зміцнення однієї поверхні катода протягом тривалого часу призводить до появи темних плям. Ці плями є ознакою руйнування зміцненого шару. Іскри показують час закінчення зміцнення. Іскра поступово втрачає яскравість і гіллястість до того, як з'являться дефекти [53].

Зміцнювальний інструмент повинен бути остаточно заточений і доведений. Після кожного заточування інструмент слід зміцнити. У процесі експлуатації поверхні деталей і інструментів піддаються більшому зносу. На думку авторів [53], слід зміцнити інструменти та деталі машин у наступній послідовності:

- перед зміцненням поверхню, на яку наноситиметься покриття, потрібно очистити від забруднень;
- деталь або інструмент, необхідно встановити в затискний пристрій;
- вибрати потрібний режим обробки;
- увімкнути живлення на установці постійним струмом;
- увімкнути вібратор;
- взяти в руку вібратор, ввести анод, який закріплений у вібраторі на дотик з поверхнею катода, що піддається легуванню;
- водити анодом по ділянці, що зміцнюється, до зміни характеру іскри;
- завершивши зміцнення вимкнути установку;
- послабити затискний пристрій і зняти деталь або інструмент, що зміцнюється.

Таким чином, можна стверджувати, що комплекс параметрів може бути використаний для забезпечення технологічного забезпечення та підвищення якості виготовлених деталей, машин і інструментів. Ці параметри включають вибір і призначення системи параметрів, стан поверхневого шару деталей і інструментів, а також характеристики їх експлуатаційних властивостей. Для метрологічного та технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

необхідно вирішити два завдання. Вибір матеріалу деталі, визначення точності розмірів і система параметрів стану поверхневого шару, які повинні забезпечити необхідні експлуатаційні властивості, є частиною вирішення першої задачі. Завдання другої задачі полягає в тому, щоб вибрати метод, встановити розумні режими обробки, вибрати обладнання, інструменти, пристосування та контрольно-вимірні засоби, щоб найбільш економічно отримати задану точність розмірів і систему параметрів стану поверхневого шару оброблюваних деталей машин і інструментів. Вирішення цих проблем також може включати електроіскрове легування.

3.2 Обробка результатів лабораторних досліджень статистичними методами

Ми скористаємося статистичними методами аналізу якості, щоб проаналізувати дані, отримані під час лабораторних досліджень. Статистичні методи управління якістю — це вибіркові методи, які базуються на математичній статистиці та теорії ймовірностей [2].

Основна мета методів Даникс полягає в тому, щоб забезпечити виробництво придатної до використання продукції з найменшими затратами. Підвищення якості продукції за рахунок контролю на різних етапах виробничого процесу є основною метою контролю якості за допомогою даних методів. Поняття розкиду даних є основою для всіх різноманітних статистичних підходів.

Розглядаючи і оцінюючи розподіл даних, можна краще зрозуміти, як працює процес. Якщо розкид даних невеликий, контролю якості можна проводити рідше. Якщо розкид даних великий, необхідно відрегулювати процес, щоб збільшити стабільність і якість.

Коли стабільність процесу забезпечується, тобто коли відбувається повторюваність контрольованих процесів, процес є статистично керованим.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Статистична керованість також гарантує, що процес задовольняє потреби споживачів, що дозволяє забезпечити необхідні технічні умови. Отже, крім перевірки стабільності процесу, також перевіряється його можливість, оцінюючи, як його характеристики співвідносяться з технічними умовами. Аналіз стабільності технологічного процесу за допомогою статистичних методів може допомогти визначити, як причинні фактори пов'язані з вихідними параметрами, такими як якість, вартість, продуктивність тощо.

Три основні підгрупи статистичних методів управління якістю: графічні методи, методи аналізу статистичних сукупностей та економіко-математичні методи.

Сім графічних методів управління якістю були найпоширенішими. При використанні даних методів не потрібна висока кваліфікація персоналу, а також вони дозволяють охопити аналіз більшості причин виробництва дефектів. На малюнку 3.4 [29, 34] показано сім інструментів управління якістю:

Рисунок 3.4 – Сім графічних методів управління якістю

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Мета обробки експериментальних даних полягає в тому, щоб використовувати статистичні методи, щоб контролювати якість нанесення покриття електроіскрового легування. Для аналізу даних ми використовуватимемо два інструменти контролю якості: побудову контрольних карт і побудову діаграми розкиду.

Контрольні карти покращують процес збору даних і впорядкування їх таким чином, щоб їх можна було використовувати пізніше. У цьому випадку ми будемо використовувати карти середніх арифметичних і розмахів, щоб показати розташування досліджуваних даних, а саме вибіркоче середнє та розмахи вибірок. Процеси, показники яких є безперервними величинами, використовуються для аналізу та управління даними карти. У нашому випадку це значення шорсткості поверхні.

На карту наносяться вибіркочі середні значення, щоб оцінити відхилення безперервної змінної від середнього. Щоб оцінити ступінь мінливості безперервного параметра, на карту наносяться значення розмахів вибірок.

Діаграми розкиду можна використовувати для визначення залежностей між двома різними типами даних. Крім того, можна використовувати дані діаграми для визначення зв'язку між будь-яким параметром якості та фактором, який впливає на нього.

У тих випадках, коли змінюється одна змінна, і коли потрібно визначити, чи існує зв'язок між двома параметрами, діаграма розкиду використовується. У випадку, якщо існує взаємозв'язок, зміна одного параметра може усунути відхилення іншого. Тим не менш, у цьому випадку можуть виникнути як позитивні, так і негативні зв'язки, але можуть взагалі бути відсутні [24, 40, 73].

3.3 Аналіз процесу електроіскрового легування за допомогою контрольних карток

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Побудуємо контрольні карти, щоб провести аналіз стабільності електроіскрового легування.

Значення шорсткості поверхні покриття були отримані раніше в програмі; ми використовуємо ці значення для проведення розрахунків і створимо контрольні карти на основі цих даних (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Дані для побудови \bar{X} і \bar{R} контрольних карт

№ підгрупи	X1	X2	\bar{X}	R
1	1,70	1,74	3,44	0,04
2	1,85	1,82	3,67	0,03
3	1,96	1,93	3,89	0,03
4	2,22	2,12	4,34	0,10
5	2,42	2,37	4,79	0,05
6	2,72	2,67	5,39	0,05
7	2,96	3,04	6,0	0,08
8	3,09	3,12	6,21	0,03
9	3,35	3,42	6,77	0,07
10	3,52	3,51	7,03	0,01
11	3,86	3,96	7,82	0,10
12	4,10	4,04	8,14	0,06
13	4,38	4,35	8,70	0,03
14	5,0	4,85	9,85	0,15
15	6,17	6,0	12,17	0,17

Середнє $\bar{X}=3,3=0,07$

\bar{R}

Де X1 та X2 – шорсткість поверхні покриття, отримана на кожній ділянці пластини, і яка відповідає певному електричному режиму та режиму частоти вібрації;

\bar{X} - Середнє значення шорсткості поверхні покриття; \bar{X} - загальне середнє значення шорсткості; R – розмах; \bar{R} - Середнє значення для розмаху R.

Усі необхідні формули для розрахунків беруться із літератури [24, 34, 73].

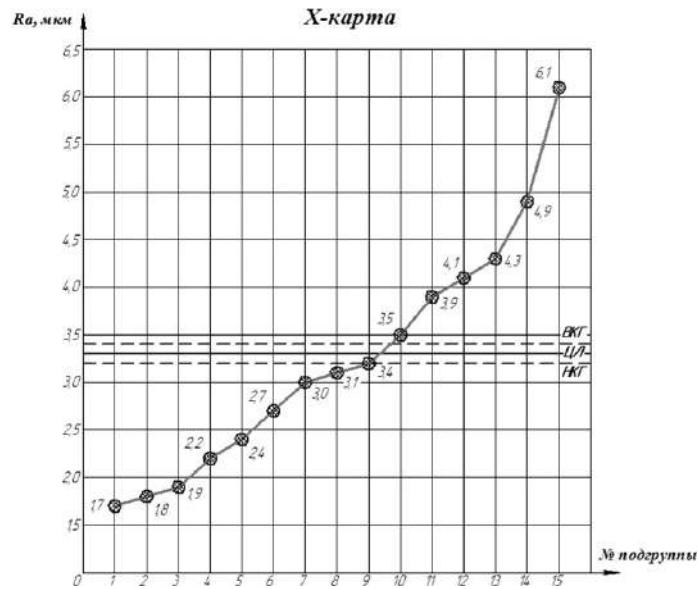


Рисунок 3.5 – Контрольна \bar{X} – карта

Аналіз X-карти показує тенденцію до зростання. Процес є статистично нестійким, оскільки більшість точок знаходяться за контрольними межами. Тим не менш, ці результати можна пояснити тим, що процес електроіскрового легування проводився в різних режимах електроіскрового легування, і в результаті більшість точок виходить за контрольні межі.

Побудова контрольної R-карти може гарантувати стабільність нашого процесу ЕІЛ.



Рисунок 3.6 – Контрольна R – карта

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Побудована контрольна R-карта показує, що процес електроіскрового легування залишається стабільним, незважаючи на дані, отримані під час створення X-карти. Це показує, що на R-карті всі точки знаходяться поблизу центральної лінії та не виходять за контрольні межі.

Зміна режимів електроіскрового легування («грубий», «середній», «м'який») пояснює розподіл точок на карті.

Порівнявши профілі контрольних карт за двома критеріями, можна зробити висновок, що немає ніякої залежності між ними. Тим не менш, ми побудуємо діаграму розкиду та проведемо кореляційний аналіз, щоб підтвердити або спростувати ці припущення.

Висновки

1. Управління якістю електроіскрового легування залежить від двох елементів. Перший стосується метрологічного забезпечення якості вимірювань, тобто вибору необхідних інструментів для вимірювання, а другий стосується технологічного процесу нанесення покриття. Статистичні методи можна вважати методами управління якістю.

2. З'ясувалося, що процес електроіскрового легування є стабільним після обробки результатів лабораторних досліджень за допомогою побудови контрольних карток. Раніше побудовані залежності підтвердили сильну залежність між шорсткістю та частотою вібрації електрода, як показано на побудованій діаграмі розкиду.

3. Після аналізу графіків були перебудовані, щоб перевірити результати на грубі помилки. Це було зроблено, оскільки на раніше побудованих залежностях були різні тенденції зростання шорсткості поверхні при зміні електричних режимів і частоти вібрації електрода. Відкинувши грубі помилки на кожному графіку, було виявлено спільну тенденцію зростання шорсткості поверхні від частоти вібрації електрода.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОКРИТТЯ НА ВИНИКАЮЧІ НАПРУГИ ПРИ ФРЕЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ

Під час механічної обробки поверхневому шарі деталей і ріжучих інструментів з'являється певний напружено - деформований стан, який характеризується деформованим зміцненням їх поверхонь і виникненням залишкових напруг. Різання металів супроводжується спрямованими деформаціями частинок поверхневого шару деталей та ріжучих інструментів, у зв'язку з цим під час взаємодії з нижніми шарами виникають залишкові напруги. Виникнення напружень, що розтягують, під час різання може бути пов'язане з нагріванням поверхневих шарів теплом, яке виділяється при різанні. Під час механічної обробки переважаючим фактором, що визначає появу залишкової напруги, є силове поле [23].

В процесі електроіскрового легування, як було зазначено раніше в роботі, поява залишкових напруг також викликані тепловими процесами, а саме фазовими і структурними перетвореннями, нестационарними процесами нагрівання та охолодження поверхневих шарів матеріалу електродів під впливом електричних імпульсів. Всі ці явища згодом і характеризують необоротний кінцевий напружений стан. Виникаючи в покриттях залишкові напруги можуть впливати на експлуатаційні властивості різальних інструментів і деталей машин.

Можна сказати, що поява залишкової напруги як при механічній обробці, так і при електроіскровому легуванні пов'язана з дією силових і температурних факторів. Силове поле в поверхневих шарах деталей і ріжучих інструментів може призвести до виникнення, як стискаючих так і напруг, що розтягують. Температурне поле за відсутності фазових напруг супроводжується появою тільки напруг, що розтягують.

Завдяки працям багатьох дослідників [10, 44, 59, 62] були отримані та проаналізовані різні математичні залежності для визначення залишкових напруг та теплових явищ у зонах механічної обробки. Температура процесу, як і

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

напруги ϵ , тими чинниками, які обмежують продуктивність операцій та істотно впливають на якість і точність виробів. Тому через ситуацію, що склалася, виникає необхідність управління тепловими явищами і напруженим станом під час механічної обробки матеріалів. Для цього дослідники розробляють різні математичні моделі та методики, щоб зрозуміти які фактори в кінцевому підсумку впливають на появу теплових явищ, напруг і як ці фактори впливають на механічну обробку. Велику роботу з розробки математичних моделей з управління тепловими явищами при механічній обробці матеріалів виконано Резниковим О.Н. [59], математичні моделі визначення залишкових напруг можна побачити у роботі Елкіна М.С. [28].

Написані даними авторами математичні моделі можна використовувати і за електроіскрового легування. У процесі ЕІЛ у міжелектродному просторі активно відбуваються термоелектричні та термомеханічні процеси та взаємодії елементів матеріалу електродів між собою. Знаючи температурні процеси в міжелектродному просторі, склад електродів, можна спрогнозувати склад кінцевих продуктів, що утворюються термохімічних реакцій, які формуються на поверхнях електродів. У роботі [44] автор зазначає, що відшарування покриття визначається за допомогою теплових процесів на поверхні деталі або ріжучого інструменту. Також автор у ході проведення дослідження встановив, що температура зміцненої поверхні прямо пропорційна потужності генератора і залежить від діаметра електрода, швидкості переміщення електрода та теплофізичних характеристик анода та катода. Залишкові напруги під час механічної обробки, так само можуть істотно впливати на покриття, а в подальшому і на катод (деталь або інструмент).

4.1 Методика проведення дослідження

Однією з головних причин поломок деталей та різальних інструментів є поява втомної міцності металу. Поява на поверхневому шарі деталей або

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ріжучих інструментів тріщин втоми, сприяє зменшенню втомної міцності металу. Для того, щоб пригальмувати утворення тріщин, поверхневий шар деталей та ріжучих інструментів повинен мати певні параметри якості, до яких можна віднести: шорсткість, залишкова напруга, яка залежить від параметрів процесу різання. Сила, напруга, температура різання відносяться до параметрів процесу різання, які впливають на якість, довговічність та надійність деталей машин та різальних інструментів. Нанесення покриттів може сприяти зміні параметрів процесу різання: вони можуть зменшити довжину контакту стружки з поверхнями різального інструменту, силу різання, знизити температуру різання, величину напружень, що виникають і т.д.

Багато дослідників у своїх роботах в основному проводять дослідження з впливу нанесеного покриття методом електроіскрового легування на температурі, що виникають, на поверхнях ріжучих інструментів і деталей машин, а випробування з напруг, що виникають, на поверхнях інструментів і деталей машин з покриттями майже не проводиться.

У зв'язку з цим нами була поставлена наступна мета: дослідити вплив нанесеного захисного покриття на виникаючі напруги в ріжучому інструменті під час механічної обробки. Дослідження проводилося на прикладі фрезерної операції торцевою фрезою.

Перед тим як розпочати дослідження в програмі «КОМПАС-3D» розробили тривимірну модель різального інструменту - торцеву фрезу, оснащену знімними ножами. Як матеріал ріжучих ножів була взята швидкорізальна сталь Р6М5. На (рисунок 4.1) показано розроблену фрезу.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70



Рисунок 4.1 – Фреза торцева зі знімними ножами зі швидкорізальної сталі Р6М5

Як матеріал захисного покриття, яке буде наноситися на ріжучі ножі, вибрали TiN. На думку автора [66], це покриття сприятиме виникненню найменших напруг на ріжучому інструменті під час механічної обробки.

Для того, щоб дізнатися, яка напруга виникатиме на ножах з покриттям і без неї, змодельовали процес фрезерування за допомогою програмного модуля «ANSYS Workbench». Методика експерименту полягала в наступному: на ріжучі ножі під час фрезерування накладалися різні сили різання, які залежали від глибини різання, внаслідок чого виникали різні напруження.

Оскільки сили різання, які прикладалися до різальних ножів, залежали від глибини фрезерування, нами було зроблено розрахунки режимів різання кожної глибини різання. Були вибрані наступні значення глибини різання t : 0,25 мм; 0,75 мм; 1,0 мм; 1,5 мм; 2,0 мм; 2,5мм. Як оброблюваний матеріал була взята сталь 40. Для даної операції був обраний вертикально-фрезерний верстат з ЧПУ 6Р13Ф3. Формули та інші дані для розрахунків було обрано з літератури [6, 65].

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

4.2 Визначення сил різання

Отримані значення сил різання завантажили програму ANSYS і змоделювали процес фрезерування. На (рисунку 4.2) показані місця застосування сил на ножах і закріплення фрези в процесі обробки. Приклад напруг, що виникають на ріжучих ножах з покриттям представлений на (рисунку 4.3).

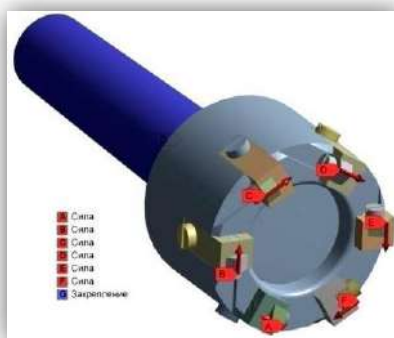


Рисунок 4.2 – Місця застосування сил та закріплення фрези

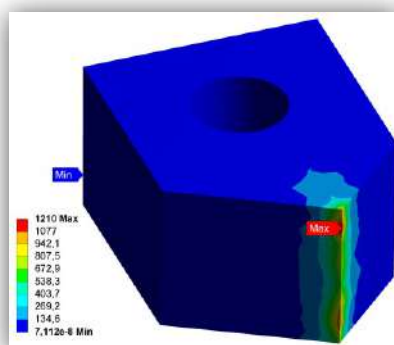


Рисунок 4.3 – Виникаюча напруга на ріжучих ножах з покриттям при силі різання

$$P_z=1424 \text{ Н}$$

По (рисунку 4.3), можна сказати, що на різальних ножах фрези максимальні значення напруги спостерігаються поблизу ріжучої кромки.

Отримані значення напруг у процесі моделювання, занесли в (таблицю 4.1).

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Таблиця 4.1 – Значення напруги на ножах після моделювання

№	Глибина різання t , мм	Сила різання P_z , Н	Напруги σ , МПа	
			з покриттям	без покриття
1	0,25	198	785	920
2	0,75	561	955	1150
3	1,0	737	1070	1306
4	1,5	1084	1110	1400
5	2,0	1424	1210	1540
6	2,5	1761	1460	1870

За отриманими даними побудуємо графік залежності напруг σ , МПа від сили різання P_z , Н. На (рис. 4.4) показаний отриманий графік.

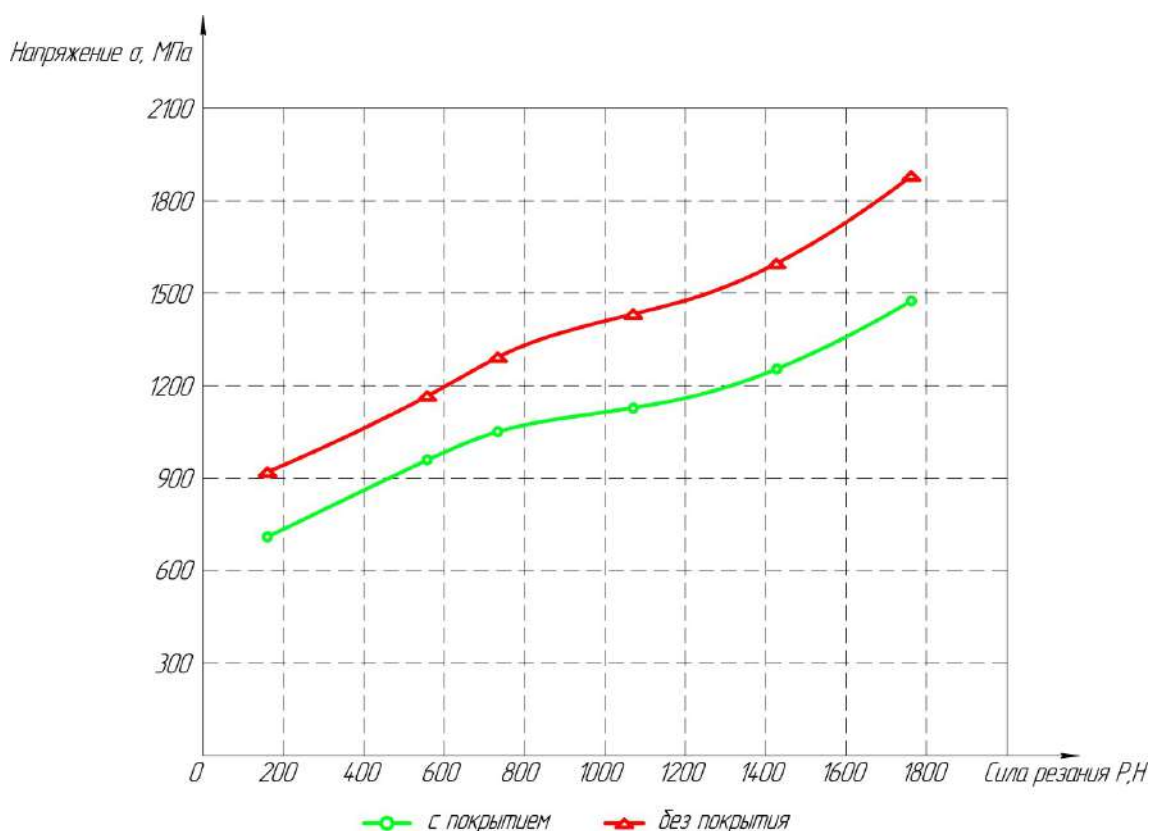


Рисунок 4.4 – Графік залежності напруг σ від сили різання P_z

На отриманому графіку видно, що зі збільшенням сили різання спостерігається зростання напруги. Однак напруги, що виникають на ножах з покриттям значно менше напруги, які утворюються на ножах без нанесеного на них покриття.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Покриття, нанесене на ріжучі ножі, в цілому сприяє зниженню напруг, що виникають в 1,2 рази. Тому, можна сказати, що для зниження напруг, що виникають, використовувати покриття доцільно.

Висновки

1. Напруги, що виникають, як на інструменті з покриттям, так і без нього можуть вплинути на експлуатаційні властивості ріжучого інструменту.

2. Експериментальне дослідження з вивчення впливу нанесеного покриття на напругу в ріжучих ножах фрези показало, що переважним фактором, який визначає появу напруг під час механічної обробки, є сила різання, яка в свою чергу залежить від глибини різання.

3. Провівши дослідження на прикладі фрезерної операції, переконалися в тому, що на ріжучих ножах торцевої фрези напруги, що виникають, значно менше напруг, ніж у ріжучих ножів без покриття. Покриття дозволило знизити значення напруг, що виникають в 1,2 рази.

4. Таким чином, можна сказати, що нанесене покриття може допомогти запобігти руйнуванню ріжучого інструменту під час механічної обробки. Це свідчить про те, що використання захисних покриттів є корисним для підвищення зносостійкості ріжучого інструменту.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було виконано таке:

1. Було проведено пошук і аналіз літературних даних з метою отримання необхідної інформації щодо напрямку процесу електроіскрового легування.

2. Лабораторне дослідження проводилося на зразку з покриттям, яке було піддано методу електроіскрового легування. Мета дослідження полягала в тому, щоб визначити, наскільки високою є поверхня, отримана в результаті цього процесу.

- експериментально встановлено, що зміна електричних режимів та частоти вібрації електрода призводить до збільшення шорсткості покриття.

3. було розроблено та запропоновано рекомендації щодо використання електроіскрового легування для нанесення покриттів на ріжучий інструмент і деталі машин, щоб підвищити їх зносостійкість.

4. Використовувалися статистичні методи для аналізу та обробки результатів лабораторних досліджень. Провівши аналіз за допомогою побудови контрольних карток, було встановлено, що процес електролізу компактного електрода за допомогою вібрації є стабільним. Підтверджено той факт, що частота вібрації електрода значно впливає на якість одержуваного покриття, створивши діаграму розкиду та виключивши грубі помилки.

5. Дослідження стосувалося впливу покриття на напругу, що виникає на ріжучих ножах фрези під час механічної обробки. На відміну від ножів без покриття напруги, на ножах є покриття, яке з'являється значно менше. Покриття ріжучих ножів зменшило напругу в 1,2 рази.

6. У ході досліджень було виявлено, що покриття може допомогти зменшити руйнування ріжучого інструменту під час механічної обробки. Як наслідок, покриття може підвищити зносостійкість ріжучого інструменту.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абляз, Т. Р. Аналіз структурних змін у поверхневому шарі деталей після електроерозійної обробки [Текст] / Т. Р. Абляз // Вісник Південно-Українського державного університету. Серія "Машинобудування". -2015. - Т.15, №4. - С. 62-69.
2. Аладьєв, Н. А. Можливості використання статистичних методів в управлінні якістю [Текст] / Н. А. Аладьєв // Інноваційна наука. – 2016. – №4–3. - С. 12-16.
3. Артамонов, Б. А. Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів [Текст]: навч. посібник (у 2-х томах). Т.І. Обробка матеріалів із застосуванням інструменту. / Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. І. Дрожалова [та ін]; за ред. Смоленцева У. П. – Київ. : Вища школа, 1983. – 247 з., іл.
4. Артамонов, Б. А. Електрофізичні та електрохімічні методи обробки матеріалів [Текст]: навч. посібник (у 2-х томах). Т.ІІ. Обробка матеріалів із використанням висококонцентрованих джерел енергії. / Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. І. Дрожалова [та ін]; за ред. В. П. Смоленцева. - Київ.: Вища школа, 1983. - 208 с., Іл.
5. Верещака, А. С. Працездатність різального інструменту зі зносостійкими покриттями [Текст] / А. С. Верещака - Київ.: Машинобудування. 1993 - 337 с., Іл.
6. Верещака, А. С. Ріжучі інструменти із зносостійкими покриттями [Текст] / А. С. Верещака, І. П. Третьяков - Київ.: Машинобудування. 1986. - 192с., Іл.
7. Верхотуров, А. Д. Білий чавун як електроди для електроіскрової обробки [Текст] / А. Д. Верхотуров, Є. В. Муромцева, С. Н. Хімухін // Перспективні матеріали. 2005. №2. С. 61-66.
8. Верхотуров, О. Д. Технологія електроіскрового легування металевих поверхонь [Текст] / О. Д. Верхотуров, І. М. Муха – Київ: Техніка. 1982. - 184 с.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

9. Верхотуров, А. Д. Формування зносостійкого покриття методом ЕІЛ твердими сплавами та перехідними металами IV – VI груп [Текст] / А. Д. Верхотуров, Л. А. Конєвцов, Я. А. Востриков // Вісник інституту тяги та рухомого складу. - 2014. - №10. - С. 3-8.

10. Вольферц, Г. А. Електроіскрове легування робочих органів ґрунтообробних машин [Текст] / Г. А. Вольферц, А. А. Максимов, В. В. Цицилін, В. М. Бояринцев // Повзунівський альманах. - 2004. - №4. - С. 138-139.

11. Востриков, Я. А. Класифікація електродних матеріалів для електроіскрового легування [Текст] / Я. А. Востриков, Л. А. Конєвцов, В. М. Макієнко, А. Д. Верхотуров // Науково-технічна та економічна співпраця країн АТР у ХХІ столітті. - 2013. - Т.1. - З 93-97.

12. Гадалов, В. Н. Зміцнення швидкорізальних сталей [Текст] / В. Н. Гадалов, Р. Є. Абашкін // У збірнику: Сучасні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації / матеріали VIII Міжнародна науково-технічна конференція: у двох частинах. – 2011. – с. 119-124.

13. Зейналов, Р. Р. Про основні засади статистичних методів управління якістю продукції [Текст] / Р. Р. Зейналов, С. Д. Довлатов, Т. Г. Асадов // Автоматизація, телемеханізація та зв'язок у нафтовій промисловості. - 2013. - №4. - С. 19-23.

14. Іванов, В. І. Зміцнення та збільшення ресурсу об'єктів електроіскровим методом: класифікація, особливості технології [Текст]/В. І. Іванов, Ф. Х. Бурумкулов // Електронна обробка матеріалів. - 2010. - № 5 (265). - С. 27-36.

15. Козлов, Д. А. Вплив складу бронзи на властивості сталі 30ХГСН2А при електроіскровому легуванні [Текст] / Д. А. Козлов, В. В. Овчинніков // Зміцнюючі технології та покриття. - 2008. - №9 (45). - С. 27-33.

16. Кудряшов, А. Є. Вплив вторинної електроіскрової обробки вуглецевими матеріалами на властивості титанових сплавів [Текст] / А. Є. Кудряшов, Ж. В. Єремєєва, Є. І. Замулаєва [та ін.] // Зміцнюючі технології та

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

покриття. - 2010. - №5 (65). - С. 17-22.

17. Назаров, Д. В. Дослідження впливу зносостійких покриттів при фрезерування [Текст] / Д. В. Назаров, К. О. Семенов // Новий університет. Серія: Технічні науки - 2016. - №1 (47). - С. 44-48.

18. Ніколенко, С. В. Закономірності утворення зміненого поверхневого шару при електроіскровому легуванні [Текст] / С. В. Ніколенко, А. Д. Верхотуров, Г. П. Комарова // Зміцнюючі технології та покриття. - 2008. - № 4 (40). - С. 20-28.

19. Пантелеєнко, Ф.І. Створення композиційних покриттів на основі карбіду титану електроіскровим легуванням [Текст]/Ф.І. Пантелеєнко [та ін] // Електронна обробка матеріалів. - 2011. - №44 (4). - С. 106-115.

20. Парамонов, А. М. Нові можливості методу електроіскрового легування для продовження терміну служби ріжучого інструменту [Текст]/А. М. Парамонов, А. В. Коваль// Електронна обробка матеріалів. - 2008. - №2. - С. 11-16.

21. Реут, О. П. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу та електроіскрової обробки для нанесення композиційних покриттів [Текст] / О. П. Реут, В. В. Саранцев, Б. Б. Хіна, Л. В. Маркова // Зміцнюючі технології та покриття. - 2007. - №12 (36). - С. 49-56.

22. Самсонов, Г. В. Електроіскрове легування металевих поверхонь [Текст]/Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сичов. - Київ: Наукова думка, 1976. - 219 с.

23. Туренко, А. Н. Інтегрування технології газотермічного напилення покриттів та методу електроіскрового легування [Текст] / А. Н. Туренко, А. С. Полянський, С. А. Лузан. // Автомобільний транспорт. - Випуск 28. - 2011. - С. 109-113.

24. Фельдштейн, Е. Е. Трибологічні характеристики покриттів, одержаних електроіскровим легуванням з подальшим лазерним зміцненням [Текст] / Є. Е. Фельдштейн, М. А. Кардаполова, Р. Гайда, Б. Хородискі, О. В.

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

Кавальчук. // Тертя та знос. - 2013. - Т.34. - №2. - С. 175-180.

25. Шликов, Е. С. Дрітово-вирізна електроерозійна обробка деталей після плазмового поверхневого загартування [Текст] / Є. С. Шликов, Т. Р. Абляз, Д. С. Белінін // Сучасні проблеми науки та освіти. – 2014. – №2.

26. Егіпті, А.Е. Електроерозійне зміцнення дереворізального інструменту [Текст] / А. Е. Егіпті, А. А. Поттер // Resources Technology. - 2005. - №5. - С. 153.

27. Agafii, VI Electrosark, що розташовуються для розподілу на алюмінієвому просторі Al-Sn coatings і їх wear resistance under friction [Text] / VI Agafii,

VI Петренко, VM Фомічев, VI Yurchenko, EV Yurchenko, AI Dikusar // Електронна обробка матеріалів. - 2013. - №49 (3). - Р. 1-8.

28. Mulin, Ju. I. Формування thick-layer coating by electrosark alloying method [Text] / Ju. I. Mulin, VD Vlasenko // Modern materials and Technologies. - 2013. - №1. - Р. 181-184.

29. Nikolenko, SV Nanostructuring steel surface з electrosark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide [Text] / SV Nikolenko, AP Kuzmenko, DI Timakov, PV Abakymov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. - 2011. - Vol. 47. - № 3. - Р. 217-224.

30. Pyachin, SA Electrosark Ti-Al coatings: deposition, structure and properties [Text] / SA Pyachin, AA Burkov // Модер матеріалів і Технології. - 2013. - №1. - Р. 248-251.

31. Pyachin, SA Electrosark coating заснований на WC-Co всієї з aluminium oxide and carbon additives [Text] / SA Pyachin, SV Nikolenko, AA Burkov, NA Suy // Materials Sciences and Applications. - 2013. - №4. - Р. 186-190.

32. Ribalko, AV Сучасна representation behaviour electrosark, що витягують сталь за hard alloy [Text] / AV Ribalko, O. Sahin // Surface and Coating

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Technology. - 2006. - Vol. 201. - № 3-4. - P. 1724-1730.

33. Sahin, O. Electrosark Deposition: Mass Transfer [Text] / O. Sahin, AV Ribalko; edited by Hironori Nakajima. - Mass Transfer-Advanced Aspects, 2011. - P. 481-504.

					<i>КРММТВА 2524369. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

ДОДАТКИ

					КРММТВА 2524369. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81