

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

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Відновлення гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання
композитним покриттям на основі заліза»

КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_24
ГЛАДУН Олексій

Керівник: канд. техн. наук, доцент
ПОПОВ Станіслав

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Ефективне використання машин і обладнання сільськогосподарського виробництва забезпечується високим рівнем їх технічного обслуговування і ремонту, наявністю необхідної кількості запасних частин. Велику увагу приділено напрямкам підвищення технічного рівня техніки шляхом її модернізації при технічному сервісі, відновлення і зміцнення деталей із застосуванням нових технологічних процесів, доведення коефіцієнта технічної готовності машинно-тракторного парку до 95...98%. Найбільш відповідальним агрегатом сучасних машин є двигун, на частку якого припадає 36...52% від загальної кількості відмов. Ресурс двигуна залежить від зношування деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ), в першу чергу це відноситься до гільз циліндрів. Недостатня довговічність деталей ЦПГ, міжремонтний ресурс яких не перевищує 40% від ресурсу двигуна, вимагає частої заміни в процесі експлуатації.

Основними засобами відновлення працездатності гільз циліндрів є розточування або шліфування під ремонтний розмір, контактне приварювання сталеві стрічки, індукційне відцентрове наплавлення, термопластичне деформування, електродугова металізація, постановка додаткової ремонтної деталі, хромування і залізнення. Основними недоліками всіх способів є вплив високих температур, висока вартість матеріалів, недостатня якість відновленої поверхні, складна і дорога механічна обробка до та після відновлення, недостатній післяремонтний ресурс.

Перспективним напрямком відновлення гільз циліндрів є розробка технології нанесення композитних покриттів на основі заліза, що виключає застосування механічної обробки до і після відновлення.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Проблема відновлення зношених деталей

Ефективне використання машин і устаткування забезпечується високим рівнем їх технічного обслуговування і ремонту, наявністю необхідного числа запасних частин. Для відновлення працездатності зношених деталей потрібно в 5-8 разів менше технологічних операцій у порівнянні з виготовленням нових деталей [1, 2]. Розширення виробництва нових запасних частин пов'язано із збільшенням матеріальних і трудових витрат. Витрати на запасні частини досягають 50...70% від собівартості ремонту машин. У вартості нових деталей 75...80% складають витрати на метал. Якщо врахувати, що собівартість відновлення деталей не перевищує 30...60% від ціни нових, витрата матеріалів на 15...20 разів нижче, ніж на їх виготовлення, а витрата енергії в десятки разів менше, ніж при виготовленні нових, то основні шляхи зниження собівартості ремонту машин, а також витрат і дефіциту запасних частин – відновлення та повторне використання зношених деталей [1, 3, 4].

Близько 85% деталей, які надходять на ділянки відновлення втрачають не більше 1% вихідної маси і мають знос менше 0,3 мм, і найбільш ефективним способом їх відновлення є нанесення покриттів незначної товщини [1, 2, 3, 5, 6]. При цьому міцність деталей практично зберігається, а велика кількість елементів практично не зношується. Якщо врахувати, що при переплавленні металобрухту втрачається до 30% металу, то відновлення зношених деталей є найважливішим завданням в цілях економії матеріально-сировинних і енергетичних ресурсів.

При недостатньому бюджетному фінансуванні і великій зношеності парку машин, значення відновлення деталей суттєво зростає.

Зарубіжна практика показує, що науково обґрунтовані і технологія організація відновлення деталей машин дозволяють досягти нормативного напрацювання техніки, а в окремих випадках і перевершити напрацювання нових виробів. Частка

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

відновлюваних деталей в загальному обсязі споживання запасних частин розвинених зарубіжних країн становить 30...35%, а в окремих випадках, як наприклад в Японії, відновленням зношених деталей задовольняють 40% потреби в запасних частинах [7].

Порівняно із закордонними, обсяги відновлення зношених деталей в Україні залишаються на низькому рівні і продовжують знижуватися з кожним роком. Так, якщо в 1986 р частка відновлених деталей в АПК становила 19,6%, то в 1992 р. – 9,2%, тобто зменшилася в 2,5 рази, а в даний вона складає 2...8%.

Встановлено, що ресурс капітально відремонтованих тракторів і тракторних двигунів повинен бути не менше 80% від нових, однак при ремонті нерідко ресурс нових запасних частин складає 60% від ресурсу, передбаченого технічною документацією на виготовлення нової деталі [7, 8, 9].

Ресурс двигунів залежить від невеликого числа швидкозношуваних деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ), в першу чергу це відноситься до гільз циліндрів. Недостатня довговічність деталей ЦПГ, міжремонтний ресурс яких не перевищує 40% від ресурсу двигуна, вимагає частої заміни в процесі експлуатації. Так, при капітальному ремонті двигуна ці деталі підлягають 100% заміни і на термін служби двигуна потрібно 2...3 комплекти деталей ЦПГ. Середні темпи зносу гільз циліндрів сучасних тракторних двигунів зазвичай складають 30...34 мкм/1000 мото-год. Темпи зносу гільз в одному і тому ж двигуні зазвичай розрізняються в 1...3 рази. До 80% автотракторних гільз двигунів вибраковуюються з недовикористаним ресурсом [10], а ресурс гільз циліндрів двигунів типу ЯМЗ використовується лише на 34% [11]. Термін служби двигуна з гільзами, що має відхилення в геометрії, знижується до 50% [12]. Дослідження показують, що для підвищення ресурсу автотракторних двигунів потрібно підвищення зносостійкості внутрішньої поверхні гільз циліндрів в 1,6...2,5 рази шляхом нанесення композиційних покриттів [7]. Якщо врахувати, що ціна відновленої гільзи циліндра в 1,65 рази менша ціни нової, то її відновлення є пріоритетним напрямком зниження витрат на ремонт ЦПГ і двигунів в цілому.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Основним способом відновлення зношених гільз циліндрів є розточування або шліфування під ремонтний розмір, що тягне за собою зниження твердості контактної поверхні, внаслідок видалення зміцненого поверхневого шару та необхідність організації виробництва поршнів і поршневих кілець ремонтного розміру [2, 7, 8, 13, 14, 15, 16], при цьому ресурс ЦПГ зменшується на 40...50 %, а термін служби двигунів після ремонту становить 30... 47% ресурсу нових [17]. Поверхню гільз циліндрів при обробці під ремонтний розмір збільшують на 0,7 мм, а для гільз ЯМЗ-236, ЯМЗ-238НБ, ЯМЗ-238Б, А-01, А-41 – на 0,5 мм відносно номінального [2, 18].

Зношені деталі ЦПГ у більшості випадків після декількох розточувань доводиться замінювати на нові, в зв'язку з тим, що глибина поверхнево зміцненого шару дорівнює зносу поверхні і подальша експлуатація не доцільна [2]. Способи відновлення гільз циліндрів у номінальний розмір не знайшли широкого застосування внаслідок того, що не відповідають вимогам стандарту щодо якості і мають високу собівартість. Тільки 66% параметрів витримується при централізованому відновленні гільз циліндрів [8]. У зв'язку з цим, розробка методів відновлення гільз циліндрів в номінальний розмір, що відповідають вимогам стандартів, є актуальним завданням ремонтного виробництва.

Великі можливості підвищення ресурсу відновлених деталей при модернізації техніки відкривають технології нанесення зміцнюючих покриттів. Перспективним напрямком підвищення зносостійкості відновлених деталей є нанесення розмірних гальванічних покриттів.

Для реалізації розроблених процесів видана нормативно-технічна документація, а технологічні процеси були впроваджені на різних ремонтних підприємствах АПК для відновлення великої номенклатури деталей сільськогосподарської техніки. Однак в останнє десятиліття обсяги відновлення деталей гальванопокриттями в загальному обсязі різко знизилися. Однією з причин є недостатній технічний рівень технологічних процесів нанесення гальванічних покриттів, що не дозволяє отримувати покриття, що забезпечують необхідні

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

експлуатаційні характеристики. Структура технологічних процесів відновлення зношених деталей на ремонтних підприємствах представлена в таблиці 1.1 [10]:

Таблиця 1.1 – Структура технологічних процесів відновлення зношених деталей на ремонтних підприємствах

Технологічний процес (за способами усунення дефектів)	Частка у загальній кількості технологічних процесів, %
Дугове наплавлення	75
Контактне приварювання металевого шару	7
Газотермічне напилення	9
Нанесення гальванічних покриттів	3
Інше	9

Враховуючи, що гальванічні процеси відновлення деталей відносяться до «холодних» методів обробки матеріалів, і на відміну від більшості застосовуваних у даний час ремонтних технологій не змінюють структуру поверхневого шару відновлюваної деталі, не сприяють виникненню термічних напружень в матеріалі і її просторового викривлення. В АПК в даний час актуальна проблема відновлення зношених внутрішніх циліндричних поверхонь гільз циліндрів автотракторних двигунів методами розмірного гальванічного осадження осадів заданої товщини із заданими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

1.2 Умови роботи та аналіз дефектів гільз циліндрів

Виходячи з функціонального призначення, гільзи циліндрів є найбільш відповідальною деталлю циліндропоршневої групи. Спряження «гільза-поршневе кільце» працює у важких умовах. Максимальний питомий тиск верхнього компресійного кільця на поверхню гільзи може досягати 8-9 МПа [1], максимальна

температура цього спряження – 230...240°C, а середня швидкість поршня, наприклад для двигунів сімейства СМД-14, дорівнює 7...8 м/с [9], на долю спряження припадає 45% витрат двигуна на тертя [19]. Встановлено, що основним дефектом гільз циліндрів, що відпрацювали міжремонтний ресурс, є знос внутрішньої поверхні, який є наслідком комплексного впливу на стінки гільзи численних фізичних і хімічних швидкоплинних процесів. За характером прояву розрізняють ерозійне, корозійне і абразивне зношування. Корозійний зношування пов'язано із руйнуванням поверхневого шару металу, що викликається хімічними та електрохімічними процесами. Хімічна корозія є наслідком дії на стінку гільзи сухих газів (сірчастого, кисню та його сполук). Електрохімічна корозія пов'язана з впливом на стінку гільзи електролітів сірчаної, вугільної та інших кислот, що отримуються при зниженому тепловому стані двигуна в результаті послідовного контактування з конденсатом води і киснем сірчастого ангідриду і вуглекислого газу, які є складовою частиною продуктів згоряння палива [20]. Корозійний знос інтенсифікується при появі на деталі ЦПГ конденсату водяної пари, подальшим попаданням води в картер і розрідженням масла, яке спостерігається при холодному пуску двигуна і триває до нормалізації робочого процесу і прогріву двигуна, попаданням солей, що призводять до інтенсифікації зносу на 15...25%. При великих перервах у роботі двигуна також спостерігається пряме іржавіння деталей ЦПГ. За результатами досліджень, наявність 2-3% води в олії збільшує знос гільз і кілець у кілька разів [20, 21, 22].

Абразивний знос пов'язаний з попаданням пилу з повітрям через масляний фільтр і становить 35...78% від загального зносу в залежності від погодних умов, району експлуатації, стану доріг і виду ґрунту, складу палива і мастильних матеріалів, що викликає утворення нагару, наявністю в маслі продуктів зносу як наслідок ерозії і корозії стінок гільзи [20, 21].

Ерозійний знос спостерігається при безпосередньому контакті кілець зі стінкою гільзи, і проявляється в утворенні металевих зв'язків між ними. Тут важливим фактором є тиск верхнього компресійного кільця, як сприймає основне

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

навантаження від потоку гарячих газів притискаючих його до стінки гільзи і швидкість його ковзання. Цей вид зносу пов'язаний з відсутністю мастила між тертьовими поверхнями, особливо у ВМТ, внаслідок видавлювання її кільцями, і стимулюється потоком гарячих газів. У зоні дії потоку, стінки промиваються рідиннофазним бензином, знежирюються, внаслідок чого, утворення вогнищ захоплення полегшується [20]. При швидкостях близьких до нуля спостерігаються місцеві миттєві розриви масляного шару і напівсухе тертя [19].

Також слід зазначити взаємний вплив видів зносу один на одного [20]. Встановити який з видів зношування є основним неможливо, так як вони протікають одночасно, а не окремо і отримують більший або менший розвиток в залежності від умов експлуатації двигуна [23].

Всі перераховані вище явища викликають появу рисок на поверхні гільз. Глибина окремих рисок може досягати 0,8...1,3 мм, що в подальшому викликає задирки поршневих кілець і поршнів. Також слід зазначити зворотне – поява тріщин і сколів хрому на поршневих кільцях викликає згодом задирки на поверхні гільз [24]. З практики відомо, що нанесення шпаринного хромового покриття на верхнє компресійне кільце товщиною до 200 мкм в 1,5 рази збільшує зносостійкість гільзи і в 2...3 рази кільця [3]. З вищесказаного випливає, що для підвищення ресурсу ЦПГ слід розглядати пару тертя «гільза-поршневе кільце» в цілому, а не її елементи окремо.

Дослідження показали, що в гільзах в процесі експлуатації спостерігається підвищення мікротвердості робочої поверхні на 10...15% порівняно з вихідною, і подальше її зменшення, яке на думку автора [25] відбувається внаслідок виникнення знакозмінних навантажень при русі поршневих кілець, що відбувається в період припрацювання, а також наявність розтягуючих залишкових напружень, що міняють свій знак на стискаючі до кінця періоду припрацювання, викликана накопиченням пластичних деформацій в поверхневому шарі.

Підвищений знос деталей спостерігається під час пуску і прогріву двигуна на холостому ходу, і становить 26...30% влітку і 45...65% взимку, при цьому 80%

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

зносу припадає на період з початку пуску до встановлення частоти обертання колінчастого вала, що відповідає холостому ходу. Наприклад, сто холодних пусків двигуна Д-54А з наступним прогріванням за зношування відповідають 800...1000 годинам звичайної його роботи. При настанні граничних зносів деталей ЦПГ спостерігається збільшення прориву газів у картер, підвищений витрата масла на чад, зростання токсичності продуктів згоряння, зниження потужності двигуна на 5%, збільшення на 4...5% питомої витрати палива [21]. Знос пари тертя «гільза-поршневе кільце» проявляється у різноманітності форм і залежить від великої кількості одночасно діючих факторів, тому гільзи циліндрів повинні володіти великою механічною міцністю, підвищеною жорсткістю, а їх контактна поверхня добре протистояти різним видам зношування.

Найбільший знос спостерігається на відстані 22...25 мм від верхньої кромки в зоні зупинки кільця у верхній мертвій точці і коливається в широких межах від 0,005 до 0,5 мм Гільзи циліндрів двигуна СМД-14, Д-50, КамАЗ-740, СМД-60, що відпрацювали міжремонтний ресурс, мають середній знос внутрішньої поверхні 0,14... 0,22 мм, максимальний знос не перевищує 0,33...0,51 мм. При цьому 4...7% гільз підлягають вибракуванню за причини тріщин і сколів; 83...86% гільз вимагають відновлення до номінального або ремонтного розміру. Підлягають вибракуванню гільзи зі зносом внутрішньої робочої поверхні більше 0,4 мм (для двигунів типу ЯМЗ – 0,35 мм). Овальність і конусність внутрішньої поверхні не повинні перевищувати 0,02 мм, шорсткість повинна бути не більше R_a 0,32... 0,16 мкм [2]. За хімічним складом і розмірами гільзи незначно відрізняються друг від друга і являють собою тонкостінні порожнисті циліндри змінного перерізу (рисунок 1.1).

Гільзи циліндрів двигунів Д-50, Д-65 виготовляють з чавуну СЧ21-40, двигунів ЯМЗ-240Б, ЯМЗ-238НБ, А-01, А-41, Д-240, СМД-60, СМД-14 – зі спеціального чавуну; двигунів КДМ-46, КДМ-100, Д-108 – з легованого чавуну ЛЧ-Г. Внутрішню робочу поверхню гільз загартовують струмами високої частоти на глибину не менше 1,5 мм із наступним відпусканням для отримання твердості

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

не нижче HRC 40 для гільз двигунів СМД-14, СМД-60, Д-50, Д-65Н, Д-108, КДМ-46, КД-100 і твердість HRC 42...50 для гільз двигунів ЯМЗ-238Н, ЯМЗ-240Б, А-01М, А-41 [2].

Рисунок 1.1 – Гільза циліндра двигуна СМД-60

1.3 Аналіз способів відновлення гільз циліндрів

За даними досліджень, знос різних груп деталей тракторів, автомобілів і сільськогосподарських машин знаходиться в межах 0,01...10 мм. При цьому близько 83% деталей мають знос до 0,6 мм. Знос поверхонь деталей розподіляється приблизно наступним чином: циліндричних – 52%; конічних і сферичних – 3%; шліців – 3%; пазів, канавок, лисок – 5%; різьб – 10%; плоских поверхонь – 1%; зубів шестерень – 2%; профільних, фасонних поверхонь – 1%; тріщин і зламів – 9%; порушення геометричної форми – 13%. При цьому 60% найбільш частого дефекту, зносу циліндричної поверхні, складає знос внутрішньої циліндричної поверхні [26, 27].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Проблемі відновлення зношених внутрішніх поверхонь гільз циліндрів автотракторних двигунів, як однієї з найбільш актуальних, в наш час, присвячено велику кількість досліджень. Розроблені та запроваджені у виробництво нові способи відновлення і зміцнення, засновані на передових технологіях ремонтного виробництва, які за своєю технологією діляться на розточування під ремонтний розмір і відновлення до номінального розміру [1, 2, 4, 5, 7, 8, 15, 26, 28, 29].

Окремий інтерес становлять способи відновлення в номінальний розмір, які дозволяють багаторазово відновлювати внутрішню поверхню гільз циліндрів двигунів, включаючи ті, що вийшли за ремонтний розмір, і виключають необхідність у виробництві поршнів і поршневих кілець.

Всі способи відновлення гільз **в номінальний розмір** можна розділити на три категорії: механічні, електричні, електрохімічні. До механічних способів належить постановка додаткової ремонтної деталі (ДРД) у вигляді згорнутої сталеві стрічки. До електричних відносяться наступні способи: індукційне відцентрове наплавлення, контактне приварювання сталеві стрічки, термопластичне деформування гільз, електродугова металізація. До електрохімічних способів слід віднести способи, засновані на застосуванні електролітичного осадження металів: хромування і залізнення (осталювання) [1, 4, 5, 7, 8, 18, 26, 30].

У літературі представлено ряд досліджень, спрямованих на підвищення ресурсу гільз. Способи поверхневого пластичного деформування з одночасною подачею металоплакуючого змащення в зону обкатки [31], вібраційного накочування із застосуванням кульки або алмазного наконечника [7], електроіскрового легування графітовим електродом з подальшим поверхневим пластичним деформуванням ельборовим інструментом [22], електрохімічного хонінгування [18], електромеханічного зміцнення [31], спрямовані на зміцнення внутрішньої поверхні гільз після розточування до ремонтного розміру, способи фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО) [32, 33] і низькотемпературного сульфохромування [24], спрямовані на скорочення періоду припрацювання, проблеми відновлення в номінальний розмір не вирішують і

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

розглядатися не будуть.

Електричні способи

Контактне приварювання сталеві стрічки. Застосування способу для відновлення внутрішньої поверхні гільз циліндрів двигунів широко розглянуто в літературі. Розроблено обладнання для контактного зварювання сталеві стрічки [5, 7, 8] вибрані оптимальні режими приварювання, наведені марки сталі, з якої виготовляють стрічку і твердість привареного шару залежно від матеріалу стрічки [2, 4, 13, 15].

Сутність процесу відновлення полягає в приварюванні потужними імпульсами струму до зношеної поверхні деталі компактних (стрічка, дріт) або порошкових матеріалів. Процес відрізняється тим, що в зварювальній точці, що утворюється від дії імпульсу струму, відбувається з'єднання основного (деталь) і присадочного металів. Суцільне приварювання металевому шару відбувається в результаті впливу зварювальних імпульсів, що утворюють зварювальні точки, які перекривають одна одну вздовж і між рядами. При цьому метал стрічки розплавляється тільки в тонкому поверхневому шарі в місці її контакту з відновлюваною деталлю. Процес контактного зварювання стрічки (рисунок 2.1) здійснюється спільним деформуванням стрічки, що приварюється, та поверхневого шару основного металу (деталь), нагрітих в зоні деформації до пластичного стану короткими 0,02...0,16 с імпульсами струму 4...30 кА. Перекриття зварювальних точок між собою досягається обертанням деталей зі швидкістю, пропорційною частоті імпульсів струму, і повздовжньою подачею циліндричних електродів. Електроконтактне приварювання стрічки до циліндричної поверхні деталі характеризується наступними параметрами: імпульсами струму ($J_{св}$), тривалістю імпульсу ($t_{св}$), зусиллям стиснення електродів ($Q_{сж}$), частотою обертання шпинделя (n) і подачею зварювальних електродів. Щоб забезпечити необхідний високоякісний рівень відновлення деталей необхідною умовою є утворення в

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

зварювальній точці загальних зерен (для однорідних або близьких за хімічним складом матеріалів, що з'єднуються) або нових фаз (для зварювання різнорідних матеріалів). Властивості міцності зварного з'єднання, що містить новостворені фази, визначаються властивостями цих фаз. При оптимальних параметрах електроконтактного приварювання міцність з'єднання основного (деталь) і присадочного (стрічка) матеріалів досягає значень, порівнянних з міцністю одного із з'єднаних матеріалів. У цьому випадку руйнування зразків відбувається не по зоні з'єднання, а по найменш міцному основному або присадочному матеріалу.

Рисунок 1.2 – Схема електроконтактного приварювання стрічки на деталь типу вал (а) і перекриття зварювальних точок (б): 1 – переривач струму; 2 – трансформатор; 3 – патрон для кріплення деталі; 4 – деталь, що відновлюється; 5 – роликові електроди; 6 – стрічка, що приварюється

Дослідження показали, що мікротвердість у поверхні шва і перекриттів зон покриття, в залежності від марки стрічки та режимів приварювання, коливається в межах 5600...8400 МПа, міцність зчеплення 100...250 МПа [5, 8]. Однак, після контактного зварювання, гільза знаходиться в складному напруженому стані, що характеризується розтягуючими залишковими напруженнями у внутрішній

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

поверхні і стискаючими у зовнішній, міцність матеріалу відновленої гільзи становить 55...95% від нової [34], може спостерігатися розтріскування гільзи вздовж твірної [35]. Спосіб вимагає застосування додаткового обладнання для згинання та різання стрічки, застосування відпускання для зняття внутрішніх напружень, відрізняється складністю обробки привареного шару і великою витратою дорогого інструменту при цьому [36]. Після відпускання спостерігаються коливання мікротвердості у привареному шарі до 30% [35]. В наслідок неправильно вибраних режимів спостерігається несплавлення в окремих місцях матеріалу стрічки зі стінкою гільзи. Спосіб відрізняється малою автоматизацією [5]. Дослідження зносостійкості відновленої поверхні в літературі відсутні.

Індукційне відцентрове наплавлення і напикання. В літературі описані способи із застосуванням різних порошкових матеріалів і їх сумішей, при різній температурі і швидкості обертання відновлюваної гільзи [4, 8, 26, 18], розроблена установка і досліджені режими механічної обробки покриттів (рисунок 1.3).

Установка для реалізації способу індукційного наплавлення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів 1 з буртиками (рисунок 1.3, а) складається з відцентрової машини 2 і високочастотного генератора 3.

Відцентрова машина має станину 4, на якій закріплені: каретка 5, несуча привід обертання 6 заготовки 1, дозатор 7 подачі порошкової суміші 8 (рисунок 1.3, б) і вузол охолодження 9.

На генераторі 3 закріплений індуктор 10 односторонньої дії, виконаний комбінованим з двох частин, для буртової частини у вигляді щілинного індуктора 11 і для циліндричної частини втулки у вигляді n-напіввитків 12 (рисунок 1.3, в).

Спосіб здійснюється за наступною технологією.

Попередньо виготовляють заготовку 1, яку виконують у вигляді катушки з монолітного шматка металу з урахуванням припусків на механічну обробку, проточують в заготовці канавки 13 під упорні буртики 14 втулки 15.

Потім заготовку 1 кріплять однією стороною в патроні обертача 6, причому одночасно розміщують її всередині індуктора 10 таким чином, що друга буртова

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

частину заготовки охоплюється щілинної частиною індуктора 11, а циліндрична – напіввитками 12 до середини заготовки.

Рисунок 1.3 – Індукційне відцентрове наплавлення: а – загальний вигляд установки; б – технологічна послідовність виготовлення; в – індуктор

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Після цього необхідну кількість порошкової суміші 8 подають дозатором 7 на обертову внутрішню поверхню заготовки 1. За рахунок відцентрових сил дозована наплавочна шихта утримується біля стінок втулки і заповнює канавку 13.

Індуктор, завдяки своїм конструктивним особливостям, рівномірно прогріває буртову частину заготовки і циліндричну, здійснюючи розплавлення шихти. Для посилення інтенсивності нагріву буртика втулки з метою зміни зазору індуктор-деталь і нагрівання до розплавлення шихти в порожнині канавки, каретку 5, несучу обертач 6 із заготовкою, зміщують відносно осі обертання заготовки.

Після того, як проведено наплавлення з одного боку, заготовку повертають, закріплюють іншою стороною і процес повторюють. Потім, в залежності від того, який виріб ми хочемо отримати – втулку з двома буртами або з одним – розрізаємо заготовку і здійснюємо механічну обробку до отримання заданих розмірів втулок з буртиками.

Даний спосіб дозволяє одержувати покриття з твердістю HRC 55...58 [4, 18]. Дані по зносостійкості відновлених гільз розходяться. Наприклад в [18] стверджується, що зносостійкість відновлених гільз двигунів підвищується в 4,8...5,5 рази, у [26] наведені дані про підвищення зносостійкості в 1,8...2,5 рази, а в [1] в 2...8 разів у порівнянні з серійними деталями. Автор [8] стверджує про підвищення довговічності в 2...3 рази порівняно із розточеними під ремонтний розмір. Міцність зчеплення покриття з гільзою складала 170...205 МПа, твердість вище в 2,25...2,85 рази порівняно із розточеними під ремонтний розмір [1]. Істотними недоліками даного способу, що обмежують його застосування, є неможливість нанесення шару невеликої товщини і відповідно більші витрати на механічну обробку, висока енергоємність процесу, виникаючі розтягуючі залишкові напруження величиною 400...600 МПа, що викликають жолоблення і розтріскування наплавлюваного шару, для зниження яких необхідно застосовувати високотемпературне відпускання, висока вартість матеріалу [8, 18, 26]. Застосування способів наплавлення веде до зниження втомної міцності матеріалу деталі на 30...35% [30].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Термопластичне деформування (обтискання, ТПД). Розроблені та запроваджені на ремонтних підприємствах декілька різновидів способу відновлення гільз циліндрів двигунів ТПД, що відрізняються наявністю або відсутністю жорсткої охолоджуючої матриці і взаємним розташуванням індуктора і спреєра [1, 4, 8].

На рисунку 1.4 показана установка для здійснення способу.

Рисунок 1.4 – Схема обробки деталі: а – при розташуванні джерел нагрівання та охолодження всередині деталі; б – при розташуванні джерела нагріву зовні деталі, а джерела охолодження всередині неї; в – при розташуванні джерел нагріву і охолодження зовні деталі; 1 – відновлювана деталь;
2 – джерело нагріву; 3 – джерело охолодження

Спосіб полягає у відновленні зношеної внутрішньої циліндричної поверхні переважно сталевих і чавунних деталей типу гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння шляхом створення градієнта температур шляхом впливу на деталь 1 джерела нагріву 2 і джерела охолодження 3. При цьому градієнт температур створюють в стінці деталі безперервно-послідовно вздовж осі деталі, нагрівання здійснюють, наприклад, струмом високої частоти (СВЧ), а охолоджують, наприклад, струменями води.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

При нагріванні і охолодженні деталь переміщують відносно джерел на нагрівання СВЧ та охолодження зі швидкістю не більш 3-4 мм/с, а температуру нагрівання встановлюють при цьому не більш 870-920°C.

В результаті створення температурного градієнта виникають різко змінні (як від точки до точки тіла, так і в кожній точці в часі) теплові (термічні) напруження. При цьому в нагрітих ділянках виникають колові напруження стиску, а в холодних – напруження розтягу. Нагріті ділянки металу прагнуть розширитися, але цьому перешкоджають більш холодні ділянки циліндра, тому нагріті ділянки виявляються стиснутими, і, в свою чергу, діють на холодну частину циліндра як симетрично прикладена сила розтягу. Оскільки межа міцності металу з підвищенням температури падає, то буде відбуватися деформація в бік стиску, тобто всередину циліндра.

Результати дослідження показують, що при створенні в порожнистій деталі осьового температурного градієнта в ній з'являється пластична деформація (зменшення внутрішнього діаметру).

Пластична деформація спостерігається як у деталі, виготовленої з чавуну, так і зі сталі.

Величина деформації залежить від цілого ряду факторів, основними з яких є максимальна температура нагріву і форма температурного поля в деталі, фізико-механічні властивості матеріалу деталі, швидкість переміщення джерел нагріву і охолодження відносно деталі, геометричні розміри деталі, інтенсивність охолодження.

Процес здійснюється наступним чином.

Чавунна деталь-гільза двигуна встановлюється на стіл пристрою. Потім зі швидкістю 1,5 мм/с відносно індуктора гільза переміщається з безперервно-послідовним нагріванням внутрішньої поверхні до 870°C і охолодженням струменями води з температурою 20°C і витратою 15 л/хв. При цьому величина радіальної деформації становить в середньому 0,7 мм. Витрата підготовчого, основного і заключного часу на відновлення однієї гільзи становить 2 хв.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

При відновленні в матриці усадка внутрішньої поверхні гільзи становить 0,75...0,90 мм [4]. При цьому у відновлених гільз відбувається утворення тріщин внаслідок високих залишкових напружень. Усадка зовнішніх посадочних пасків становить 0,5...0,6 мм на діаметр. В стінці гільзи отримані стискаючі залишкові напруження 80...120 МПа [19]. Автор [19] стверджує, що ресурс відновленої гільзи становить не менше 100% від ресурсу нової, однак в [8] наведені дані 85...90%. Твердість внутрішньої поверхні збільшується на 2... 3% [4] і становить HRC 42...45 [19], зносостійкість зберігається.

Суттєвими недоліками даного способу є наявність великого числа операцій механічної обробки. Поряд з усадкою внутрішньої поверхні гільзи відбувається усадка зовнішньої її поверхні. У зв'язку з усадкою зовнішньої поверхні гільзи вводиться додаткова операція електродугової металізації посадочних поясоків з їх подальшою механічною обробкою [19], що вимагає застосування додаткового обладнання та істотно здорожує даний спосіб. Для відновлення деяких марок гільз циліндрів вимагається застосування середнього відпускання для зняття високих залишкових розтягуючих напружень. Спосіб неможливо застосовувати для відновлення гільз циліндрів двигунів з повітряним охолодженням. Чисельні дані по мікротвердості в літературі відсутні.

Електродугова металізація. Розроблена установка для відновлення внутрішньої і зовнішньої поверхні гільз [7], технологія відновлення гільз, включаючи гільзи з повітряним охолодженням, проведені дослідження працездатності відновлених гільз металізацією з подальшим електроімпульсним легуванням різними матеріалами.

Даний спосіб не дає високої міцності зчеплення покриття з деталлю (рисунок 1.5).

Спостерігається також вигоряння легуючих елементів напилюваного металу. Однак тут може бути використано дріт з легованих сталей.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Мікротвердість покриттів коливається в межах HRC 22...50, пористість 10...29% , адгезійна міцність 31,5 МПа. У покритті отримані розтягуючі залишкові напруження, що змінюють знак на глибині 40...60 мкм [25].

Рисунок 1.5 – Схема електродугового напилення:

1 – деталь; 2 – струмінь розплавлених частинок металу дроту; 3 – дріт

Істотними недоліками даного способу є наявність великого числа операцій механічного оброблення, що включає в себе абразивно-струминну і токарну обробку перед нанесенням, розточування та хонінгування після нанесення покриття, низьку адгезійну міцність. Дані щодо зносостійкості і практичного застосування відсутні.

Механічні способи

Постановка додаткової ремонтної деталі (ДРД). Технологія, матеріали стрічок і перелік обладнання для відновлення гільз циліндрів постановкою ДРД у вигляді згорнутої сталеві стрічки (втулки) розглянуті в [4, 8, 15, 18].

Спосіб відновлення внутрішньої поверхні гільз циліндрів внутрішнього згорання ремонтною втулкою дозволяє збільшити відсоток повторно використовуваних гільз, так як з'являється можливість ремонтувати гільзи при зносі внутрішньої поверхні, що перевищує 0,4 мм.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Спосіб здійснюється наступним чином (рисунок 1.6).

Рисунок 1.6 – Спосіб відновлення постановкою втулки:

а – гільза; б – ремонтна втулка; в – гільза з напресованою втулкою

Вимірюють зону зносів 1 внутрішньої робочої поверхні гільзи 2, на зовнішній поверхні якої від верхньої кромки роблять проточку 3 на довжину 5...10 мм, що перевищує зону зносів внутрішньої робочої поверхні гільзи. Глибина проточки не повинна перевищувати 0,5 товщини стінки гільзи. Виточують ремонтну сталеву втулку 4, конфігурація якої відповідає видаленій ділянці гільзи. Внутрішній діаметр втулки 4 та зовнішній діаметр проточеної частини гільзи 2 підбирають з урахуванням допуску на пресову посадку.

На рисунку 1.6 а, б представлені відповідно гільза і ремонтна втулка на підготовчій стадії; на рисунку 3.9, в – гільза, що пройшла відновлювальний ремонт.

Зовнішню поверхню втулки виточують з допусками на подальше доведення до номінальних розмірів гільзи після операції запресовування. Виготовлену втулку 4 нагрівають до 300...400°C і насаджують на підготовлену ділянку гільзи. При охолодженні втулки відбувається обтискання гільзи, за рахунок чого відновлюється внутрішній діаметр гільзи. На закінчення обробляють внутрішню і зовнішню поверхні гільзи під номінальні розміри.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

У практиці авторемонтного виробництва часто використовується технологічний процес відновлення зношеної внутрішньої поверхні гільзи циліндрів з використанням легкоз'ємних сталевих пластин (рисунок 1.7).

Рисунок 1.7 – Схема для переміщення згорнутої пластини з прес-форми в деталь: 1 – шток гідравлічного преса; 2 – ступінчаста оправка; 3 – згорнута в циліндр пластина; 4 – прес-форма; 5 – деталь (гільза); 6 – стіл

Пластини повинні мати точно витримані розміри, які залежать від внутрішнього діаметру попередньо розточеної гільзи. При надходженні в ремонт граничне значення радіального зносу гільзи у двигуна ЯМЗ-236 становить 0,18...0,20 мм. Основні операції технологічного процесу відновлення гільз циліндрів пластинуванням наступні: підготовка гільз під облицювання пластинами; виготовлення пластин; облицювання внутрішньої поверхні гільз циліндрів пластинами; обробка гільз циліндрів після облицювання. Підготовка гільз циліндрів під облицювання пластинами полягає в їх розточці під запресовування згорнутих пластин. Розточка гільз здійснюється ельборовим різцем на алмазно-розточувальні верстати в спеціальному пристосуванні.

Сутність виготовлення пластин полягає в підборі сталевий стрічки для різання її на пластини, виборі товщини пластини, визначення натягу при запресовуванні і зусилля запресовування, визначення довжини пластини, розкрій сталевий стрічки

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

на дрібні шматки, різання стрічки та шліфування крайків пластини. Для виготовлення пластин застосовують холоднокатану стрічку з вуглецевої сталі марок 18А, 65Т. Для відновлення гільз циліндрів двигуна ЯМЗ-236 рекомендується товщина пластини 0,6 мм. Облицювання внутрішньої поверхні гільз циліндрів пластиною і переміщення її з прес-форми в гільзу під дією гідравлічного преса представлено на рисунку 1.7. Завдяки пружним властивостям і невеликій товщині пластини щільно прилягають до поверхні внутрішнього діаметра гільзи циліндра. Пластини повинні бути притиснуті по торця із зусиллям в 10-12 разів більшим, ніж зусилля запресовування їх в циліндр.

В отворі запресованої пластини зенкують фаску і проводять хонінгування отвору. Доведення гільз виконують на вертикальних хонінгувальних верстатах хонінгувальними головками (рисунок 1.8) з подачею охолоджувальної рідини в зону тертя.

Рисунок 1.8 – Хонінгувальна головка (хон, хона): 1 – нижній диск;
2 – пружина; 3 – стрижень; 4 – державка; 5 – абразивні бруски; 6 – тяга;
7 – пружна коронка; 8 – натяжна гайка; 9 – верхній диск

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

У джерелі [7] стверджується, що ресурс відновленої гільзи порівняний з ресурсом нової, наведено результати досліджень припрацювання покриттів з різних марок стрічки. За даними [37] знос гільз відновлених постановкою ДРД в 2...2,5 рази менше ніж у гільз, відновлених за стандартною технологією. Твердість відновленої поверхні залежить від матеріалу стрічки. Основними недоліками технологічного процесу відновлення є велике число операцій механічної обробки і необхідність застосування додаткових обладнання для гнуття, шліфування і запресовування мірних заготовок, що значно здорожує процес, відсутність зчеплення матеріалу стрічки зі стінкою гільзи, порушення теплообміну в стінці гільзи [4, 8]. Процес вимагає високого ступеня точності всіх операцій.

Електрохімічні способи

Великий внесок у вирішення проблеми відновлення деталей електроосаджуванням внесли дослідження Мелкова М.П., Батищева А.М., Швецова А. М., Закірова Ш.З., Петрова Ю.М. та ін. Способи відновлення деталей електроосаджуванням наведені на рисунку 1.9.

Найбільше застосування на практиці для відновлення розмірів і підвищення ефективності фізико-механічних властивостей гільз циліндрів двигунів знайшли залізнення (осталювання) і хромування. Процеси нікелювання, міднення і цинкування через свої властивості не можуть застосовуватися для відновлення гільз циліндрів і складають лише 7% від загального числа гальванічних процесів.

Хромування. Деталь, яка хромується, поміщається у ванну, заповнену електролітом. До неї підключається позитивний дріт від джерела струму. До негативного полюса підключається будь-яка заготовка з хрому. Після подачі струму буде відбуватися наступне: за рахунок дифузії від заготовки будуть відокремлюватися іони цинку. Вони є носіями струму, тому через рідке середовище почнеться рух у бік деталі. Іони будуть осідати на поверхні,

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

створюючи захисний шар. Зв'язок металу деталі і шару хрому буде забезпечений на іонному рівні.

Рисунок 1.9 – Способи відновлення деталей електроосаджуванням

Конструкція анода, що забезпечує отримання рівномірних осадів хрому по висоті деталі, представлена на рисунку 1.10. Електроліт під певним тиском подається в міжелектродний простір через розподілені по висоті свердління в трубках анода. Під дією надлишкового тиску відпрацьований електроліт спільно з газоподібними продуктами реакцій видаляється з зони електролізу через щілини між трубками у внутрішню порожнину анода, де подальший його рух знизу вгору не впливає на процес електролізу.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Рисунок 1.10 – Конструкція анода для рівномірного хромування гільз циліндрів:

1 – кільце, що центрує; 2 – струмоведучі трубки; 3 – радіальні канали для підведення електроліту; 4 – опорний диск

Аноди відливають з трикомпонентного сплаву олово-свинець-сурма (85, 10 і 5% відповідно). Різна міжелектродна відстань від 5 до 30 мм задається шляхом зміни діаметра анода. Швидкість потоку електроліту від 0 до 2 м/сек.

У науково-технічній літературі описаний технологічний процес відновлення внутрішньої поверхні гільз циліндрів проточним хромуванням в холодному саморегулюючому електроліті. Мікротвердість осадів вище на 20...25% у порівнянні з осадами, отриманими в стаціонарних умовах і становить, в залежності від умов електролізу, 8000... 13500 МПа. Максимальна міцність зчеплення хрому з чавуном становить 210 Па [26]. Швидкість осадження до 0,5 мм покриття на годину, зносостійкість в 2...3 рази більше ніж у нових гільз, однак даний спосіб вимагає застосування шліфування та хонінгування до і після осадження [15].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

В [38] представлено дослідження отримання пористих хромових покриттів і підвищення їх пористості механічним і електролітичним способами, описаний технологічний процес хромування за попередньо накатаним механічним способом дзеркала гільзи, дані рекомендації по товщині покриттів. При цьому стверджується, що зносостійкість гільзи, після хромування за попередньо накатаною поверхнею, підвищується у 8...10 разів, а після підвищення пористості травленням в 3...4 рази. Технологічний процес включає в себе велику кількість операцій механічної обробки і операцію термообробки (знеуглеводнення).

Автором [4] розроблено оснащення та проведені дослідження з відновлення гільз циліндрів гальваномеханічним хромуванням в універсальному електроліті із застосуванням в якості активуючого інструменту абразивних брусків, проведено дослідження зміни тиску активуючого інструменту на властивості покриття. Швидкість осадження покриття до 1,2 мм/год, змочуваність і маслоємність покриттів в 1,5 рази вище, ніж у покриттів осаджених у стаціонарних та проточних умовах, міцність зчеплення 180...200 МПа, вихід за струмом 30...35%. Знос гільз циліндрів відновлених ГМХ в 2...4 рази менше зносу серійних при рівному зносі поршневих кілець. У роботі відсутні чисельні дані по напруженням. Застосування даного способу дозволяє отримувати пористі покриття з нерівномірністю по товщині 0,02...0,03 мм, однак не виключає необхідність застосування механічної обробки (до) і хонінгування (після нанесення покриття). Розроблений технологічний процес і оснастка для гальваномеханічного хромування гільз циліндрів двигунів ЯМЗ-238 і ЯМЗ-240, забезпечує нанесення рівномірних покриттів товщиною понад 0,35 мм, з шорсткістю R_a 0,32... 1,3 мкм і відхиленням від циліндричності не більше 0,03...0,05 мм [39].

В [40] представлено дослідження зчеплення електролітичного хрому з внутрішньою поверхнею гільзи двигуна Д-48, технологічний процес анодно-струменевого хромування гільз Д-48 і СМД-14 у саморегулюючому електроліті, дані по довговічності гільз циліндрів двигуна Д-50, відновлених в електроліті з

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

добавкою кобальту, запропоновано нанесення пористості на дзеркало гільзи накаткою.

В [41] сказано, що хромування гільз підвищує їх зносостійкість в 3...5 разів, а спряжених з ними кілець в 2...3 рази, при цьому виявлено, що з точки зору зносостійкості оптимальна мікротвердість хромованої поверхні гільзи становить 8500...9500 МПа, пористість 25...35%. Представлені результати випробування тепловозного дизеля Д100 укомплектованого гільзами з різним покриттям.

Відомий спосіб відновлення не всієї поверхні гільзи, а тільки верхньої її частини [12], розроблена технологія і конструкція анода, що дозволяє наносити покриття тільки у верхній частині. Зносостійкість гільз в 1,5 рази вище, ніж у розточених під ремонтний розмір без зміцнення. Однак застосування даного способу спрямовано на зміцнення верхньої частини гільз ремонтного розміру, а не відновлення до номінального, не виключає необхідність застосування шліфування (до) і хонінгування (після нанесення покриття) та використання поршнів і поршневих кілець ремонтного розміру. Чисельні дані по адгезії і напруги відсутні.

До основних недоліків хромування слід віднести низький вихід металу по струму (10...16%), високі залишкові напруження, зниження втомної міцності відновлюваної деталі на 30...40%, за деякими даними до 63% [42], високу вартість матеріалів [36], складність технологічних процесів, складний процес очищення стічних вод, трудомісткі і складні операції механічної обробки. Покриття в процесі експлуатації зменшується в об'ємі на 15%, внаслідок чого спостерігається його розтріскування і відшарування [38]. Зважаючи на перераховані вище недоліки широкого застосування для відновлення гільз хромування не отримало.

Залізнення (осталювання). У науково-технічній та журнальній літературі питанням відновленню деталей гальванопокриттями на основі заліза приділено багато уваги: представлені дослідження антифрикційних властивостей покриттів, обладнання гальванічних цехів, процеси, що протікають в електролітах при залізненні, дослідження процесів електроосадження з електролітів, що містять різні добавки, нові технологічні процеси, дані рекомендації щодо приготування та

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

контролю електролітів, проектування установок залізнення, футеровці ванн, вибору режимів електролізу [3, 6, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

Принцип ступеневого позаванного залізнення полягає у наступному. За допомогою насоса електроліт подають струменями в межелектродний простір через отвори насадки. Насадка одночасно слугує анодом і місцевою ванночкою. Для одержання рівномірного покриття деталь обертається з частотою до 20 хв^{-1} . Залізнення можливо з концентрованого холодного хлористого електроліту при щільності струму $40 \dots 55 \text{ А/дм}^2$ з продуктивністю $0,4 \text{ мм/год}$. Для спрощення технологічного процесу ремонту шийок колінчастих валів розроблена електролітична комірка (рисунок 1.11), яка дає можливість вести залізнення і хромування шийок без обертання деталі. В цю комірку електроліт надходить під тиском через патрубок 1 і завдяки похилому розташуванню отворів в циліндричному аноді 8 набуває обертальний рух навколо катода. Швидкість протікання електроліту в анодно-катодному просторі приймають $100 \dots 150 \text{ см/с}$ при його питомій витраті $40 \dots 45 \text{ л/хв}$ на 1 дм^2 поверхні, що покривається.

Рисунок 1.11 – Схема електролітичної комірки для анодно-струменевого осадження металів: 1 – патрубок підведення; 2 – патрубок відведення; 3 – кабель для підведення струму; 4 – верхній корпус комірки; 5 – ущільнювальна прокладка; 6 – катод; 7 – затискач; 8 – анод; 9 – нижній корпус комірки

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Принцип проточного залізнення полягає у наступному (рисунок 1.12). За допомогою пристосувань зношений отвір деталі перетворюється на закриту місцеву гальванічну ванну. В її центр встановлюють анод 5 і через неї прокачують насосом електроліт. Анод і деталь нерухомі. При їх підключенні до джерела постійного струму на поверхні отвору осідає залізо. Електроліт протікає в катодно-анодному просторі зі швидкістю 15...18 см/с. Температура електроліту – 75...80°C, катодна щільність струму – 25... 30 А/дм². Осаджуються якісні гладкі покриття зі швидкістю 0,3 мм/год, товщиною до 0,7 мм і твердістю 4000...4500 МПа. Зносостійкість відновлених даними способом посадочних поверхонь на 25...50% вище зносостійкості нових.

Рисунок 1.12 – Схема електролітичної комірки для проточного осадження металів:

- 1 – підвідний штуцер; 2 – штуцер для відводу газів;
 3 – струмопровід; 4 – верхня кришка; 5 – анод; 6 – гайка; 7 – картер коробки передач; 8 – нижня кришка; 9 – зливний штуцер; 10 – кришка плита

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Також одним із методів залізнення є метод електронатирання. При цьому способі осадження металу деталь не опускається у ванну, а встановлюється або на спеціальному столі, або в центрах (патрон) токарного верстата і приєднується до катода, що є джерелом постійного струму (рисунок 1.13).

Рисунок 1.13 – Схема процесу залізнення шляхом електронатирання:

1 – ємність з електролітом; 2 – кран; 3 – випрямляч; 4 – графітовий анод;
5 – тампон; 6 –пластмасовий ковпачок; 7 – алюмінієвий корпус з ребрами для охолодження; 8 – деталь; 9 – ванна для електроліту; 10 – гніздо для клеми;
11 – пластмасова гайка; 12 – клема кабелю

Анодом служить стрижень 4, виготовлений з будь-якого металу або графіту і обгорнутий яким-небудь адсорбуючим матеріалом так, щоб утворився щільний тампон 5. Тампон в залежності від необхідного покриття просочують електролітом до повного його насичення і за допомогою кабелю з'єднують з анодом джерела струму. Анодний тампон, безперервно змочується електролітом, з ємності 1 накладають на деталь 8, яка повільно обертається, і встановлюють необхідну

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

щільність струму. В системі катод (деталь 8) – тампон 5 (свого роду гальванічна ванна) – анод (стрижень 4) протікає електрохімічна реакція і на поверхні катода (деталі) осідає той чи інший метал. Електроліт, що стікає, збирається у ванну 9 для повторного використання. Постійне надходження в зону електролізу свіжого електроліту і переміщення анода по поверхні перешкоджають зростанню кристалів металу, знижують ранкові напруження в покритті і зменшують дендрітоутворення. Все це дозволяє отримувати дрібнозернисті покриття високої якості. Цей спосіб залізнення доцільно застосовувати для відновлення посадочних поверхонь великих валів, осей та корпусних деталей.

Апробований на виробництві процес відновлення гільз циліндрів залізненням в метилсульфатнохлористому електроліті. Відновлювалися гільзи двигуна 1Д12. Товщина покриття після обробки склала 0,3...0,6 мм, мікротвердість 5200...5800 МПа. Міцність зчеплення покриттів з сірим, високоміцним і чавунами інших марок близька до міцності цих матеріалів на розрив [26].

Досліджено процес відновлення гільз циліндрів двигунів СМД-14, СМД-62 композиційним покриттям Fe-SiC з застосуванням обертового анода, що дозволяє в 3...4 рази підвищити працездатність гільз порівняно з серійними, підвищити зносостійкість у порівнянні зі звичайним залізненням і зменшити знос поршневих кілець [50, 51], процес відновлення гільз двигунів СМД-14 композиційним покриттям Fe-Al₂O₃, що підвищив зносостійкість гільз і кільця в кілька разів [17], розроблено процес відновлення гільз сплавом Fe-Ni, що підвищив зносостійкість в 1,3... 1,5 рази в порівнянні із звичайним залізненням [52].

У [47] представлені технологічний процес і результати випробувань гільз циліндрів тракторів «Універсал» і КД-35, відновлених залізненням в електролітах з органічними добавками. Особливістю було застосування відпалювання при $t=250...350^{\circ}\text{C}$. Знос відновлених гільз був на рівні серійних, знос кілець зменшився.

Розроблено технологічний процес і оснащення для гальваномеханічного залізнення гільз циліндрів двигунів Д-240 і Д-50, що забезпечує нанесення рівномірних покриттів завтовшки понад 0,35 мм, з шорсткістю R_a 0,32...1,3 мкм і

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

відхиленням від циліндричності не більше 0,03...0,05 мм. Велися роботи зі створення дослідно-промислової установки для відновлення гільз циліндрів Д-144 [39].

Залізнення порівняно з хромуванням володіє рядом переваг: високий вихід металу по струму (85...95%), дешевизна вихідних матеріалів, можливість нанесення якісних покриттів товщиною до 3 мм, швидкість осадження покриття до 0,5 мм/год [3], краща розсіювальна здатність електролітів, міцність зчеплення 450...500 МПа [45], змочуваність осаду в 5 разів вище ніж у хрому. Залізнення перевершує хромування за техніко-економічним показником у 1,5 рази, енергетичним показником в 4,5 рази [52]. При терті у заліза, на відміну від хрому, на поверхні відбувається утворення окислів, і спостерігається підвищення мікротвердості осаду в 5...6 разів. Залізо має більший ніж у хрому коефіцієнт лінійного розширення ($11,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹), відносне подовження 10...50% [3], що є позитивним фактором при використанні його в гільзах циліндрів. Основними недоліками, що обмежують застосування залізнення, є низька мікротвердість і зносостійкість покриттів.

У свою чергу, в літературі представлені різні, а іноді суперечливі, дані щодо технологічних процесів відновлення деталей залізненням. Як вже було зазначено вище, виходячи з умов роботи гільз циліндрів, важливим є температурний фактор. У літературі представлені суперечливі дані щодо впливу температури на фізико-механічні властивості електроосажденного заліза: одні стверджують, що нагрівання деталі вище 200⁰...250⁰С викликає зменшення мікротвердості на 5...10%, втомної міцності і збільшення зносу [6, 42, 45]. У [43] представлено значення 327⁰С, [48] – 450⁰С, а інші [47, 49, 53] стверджують, що нагрівання до 200⁰...300⁰С з витримкою 1...3 години навпаки збільшує мікротвердість до 30%, а автор [52] стверджує, що відпускання при 250⁰...350⁰С збільшує мікротвердість всього на 5... 10%, при цьому в інтервалі 300⁰...350⁰С відбувається збільшення міцності зчеплення з чавуном до 546 кгс/см² [47] і видалення більшої частини водню. При цьому при 500⁰...600⁰С мікротвердість падає на 40...45% [52]. Немає загальної думки і з приводу впливу

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

наводнення осадів на фізико-механічні властивості покриттів і єдиних даних по мікротвердості, міцності зчеплення і залишковим напруженням.

З практики відомо, що наводнення деталей, особливо зі сталі, викликає її крихкість і розтріскування [42]. Для видалення водню використовують термообробку, що дозволяє видалити при нагріванні до $200^0 \dots 300^0\text{C}$ до 90% водню з покриття [49]. У дослідженні [28] стверджується, що водень, який потрапив до металу деталі, не впливає на її втомну міцність, а опади виходять тріщинуватими.

Представлені суперечливі дані щодо мікротвердості опадів: 6700...6900 МПа [45], 1200...6100 МПа [46], 5000...9250 МПа [43], до 8000 МПа [38], до 7800 МПа [3, 54]. При цьому зазначено, що оптимальною зносостійкістю володіють покриття мікротвердістю 4500...5500 МПа [46, 48]. Відзначено, що у всіх випадках осадження, в покриттях спостерігаються залишкові напруження розтягу, що сягають 1000 МПа [53], які можна зняти термічною обробкою, аж до нульових значень. При цьому стверджується, що напруження розтягу, особливо в покриттях осаджених на внутрішні поверхні, покращують зносостійкість [43], а напруження стиску – межу витривалості деталей [47]. При цьому автор [43] стверджує, що зі збільшенням товщини покриття, відбувається зменшення внутрішніх напружень, а автор [47] стверджує зворотне.

У літературі представлені дані щодо міцності зчеплення з основою: 396 МПа [48], 180 МПа [16]. Також різняться дані по товщині покриття, що осаджується, та швидкості його осадження: $V = 0,2 \dots 0,35$ мм/год, $h = 0,7$ мм [48], $V = 1,8$ мм/год [26], $V = 6$ мм/год [16], $V = 0,2 \dots 0,5$ мм/год, $h = 3$ мм [3], $h = 8$ мм [52], $V = 0,8 \dots 1,2$ мм/год [45]. Межа міцності коливається від 300 МПа [16] до 600 МПа [49], при цьому стверджується, що у деталей з сірого чавуну після осадження заліза межа міцності збільшується на 50% [47].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

1.4 Удосконалення технології залізнення

Поряд з недоліками, відновлення деталей електролітичним осадженням заліза дозволяє підвищити зносостійкість і твердість введенням легуючих добавок, та осадженням декількох шарів з різними фізико-механічними властивостями. Першим напрямком підвищення фізико-механічних властивостей є осадження двокомпонентних Fe-P, Fe-Mn, Fe-Co, Fe-Ni, Fe-Cr, Fe-Ti, Fe-Mo, Fe-W, Fe-B, Fe-V, трикомпонентних Fe-Ni-Co, Fe-Ni-Cr, Fe-Ni-P, Fe-Mn-P, Fe-Co-Mn і чотирьохкомпонентних Fe-Ni-Co-Mn сплавів на основі заліза [3, 44, 54, 55, 52, 56, 57, 58]. При цьому відзначається значне збільшення мікротвердості до 16000 МПа [54], міцності зчеплення з основою в 1,5...2 рази [49], зносостійкості до 25 разів, припрацьовуваності до 30 разів, втомної міцності, теплостійкості в 2...2,5 рази порівняно з хромом, зменшення коефіцієнта тертя [22].

Другим напрямком підвищення фізико-механічних властивостей є осадження композиційних електрохімічних покриттів (КЕП), засноване на введення в електроліт боридів, карбідів, нітридів, силіцидів, графітів і т. д. Відомі дослідження в галузі відновлення деталей із застосуванням поліамідної смоли П-68, полівінілхлориду Е-62, компаунда ПЕП-219, Fe-B₄C, Fe-Al₂O₃, Fe-SiC, Fe-ZrO₂, Fe-TiO₂, Fe-MoS₂, Fe-WS₂, Fe-W₂B₅, Fe-V, Fe-W [17, 54, 55], при цьому відбувається збільшення мікротвердості до 17000 МПа [55], зносостійкості в 5-10 разів [17], зменшення коефіцієнта тертя та внутрішніх напружень [52]. Проводилися дослідження щодо осадження сплавів Fe-Co з добавкою полімерного матеріалу [12].

Третім напрямком підвищення фізико-механічних властивостей є пошарове осадження різних металів, наприклад, осадження хрому поверх заліза. Такий метод застосовується при відновленні циліндрових втулок судових дизелів: спочатку осаджують залізо товщиною 3...4 мм, а потім шар хрому товщиною 0,8 мм. Відомо осадження окисованого шару заліза товщиною 7...8 мкм на пористе хромове покриття верхнього компресійного кільця [3, 52, 54].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Одним із шляхів підвищення продуктивності електроосадження є застосування нових технологічних процесів. Одним з таких процесів є гальваномеханічне осадження із застосуванням м'яких матеріалів, абразивних брусків або брусків з мінералокераміки [3, 54]. З практики відновлення деталей відомо, що механічне вплив на деталь в процесі електролізу дозволяє збільшити допустиму щільність струму до 300 А/дм² [3, 54], швидкість осадження до 2,8 мм/год, мікротвердість до 10000 МПа, товщину покриття до 8 мм [52], поліпшити зчеплення з основою і зменшити залишкові напруження [33]. Як вже зазначалося раніше, суттєвим недоліком при осадженні електролітичних покриттів є необхідність застосування механічної обробки (шліфування, хонінгування, розточування) деталі до нанесення покриттів і покриття після нього, що веде до значного подорожчання процесу і збільшення кількості браку. Зокрема, застосування шліфування знижує мікротвердість покриттів від 5 до 25%, збільшує пористість до 60 разів, шорсткість, викликає відшарування покриттів, появу шліфувальних тріщин у основному металі, прижогів і є причиною передчасного руйнування деталі, особливо при нанесенні хромових покриттів на сталь [45]. Відзначено, що відсоток браку за зчепленням перевищує 5% на 54% підприємств, що займаються відновленням деталей на стадії нанесення покриття, і на 38% підприємств при механічній обробці [16]. При цьому миттєва температура в зоні тертя досягає 1000...1600⁰С, що не прийнятно для електролітичних залізних покриттів, у яких при високих температурах спостерігається різке зменшення мікротвердості і зносостійкості.

Принципово новим способом відновлення деталей є гальваноконтактне осадження (ГКО) композитних покриттів. Полягає в пошаровому деформуванні покриття при його осадженні з одночасним масовим перенесенням частинок інструментального матеріалу в покриття, що дозволяє наносити покриття заданої товщини із заданими фізико-механічними властивостями і виключити операції механічної обробки деталі до нанесення і самого покриття після нього [58, 59]. Спосіб забезпечує різну швидкість осадження покриття на різні ділянки

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

відновлюваної деталі в залежності від її зносу, дозволяючи усувати геометричні похибки деталей, викликані зносом не використовуючи механічну обробку деталі до відновлення та/або покриття після нанесення, по-друге, регульоване впровадження інструментального матеріалу в покриття, дозволяє підвищити його мікротвердість і зносостійкість порівняно з покриттями, що отримані відомими на сьогоднішній день технологіями. У якості інструментального матеріалу застосовуються бруски спечені з карбідів металів. Як вже зазначалося вище, застосування карбідів дозволяє підвищити фізико-механічні властивості електроосаджених залізних покриттів. Основною проблемою в застосуванні залізнення в гільзах циліндрів, є наявність при роботі високих температур, що викликає зменшення мікротвердості і необхідність шліфування гільз до нанесення покриття та шліфування і хонінгування після нього, що викликає похибку форми. При відновленні гільз відомими способами R_a 0,32...1,3 мкм, при допустимій R_a 0,32...0,16 мкм і відхилення від циліндричності 0,03...0,05 мм, при допустимому 0,02 мм. Спосіб ГКО дозволяє наносити покриття з R_a 0,02...0,04 мкм з точністю, що дорівнює 4...5 квалітету, підвищити продуктивність процесу в 9...12 разів, знизити собівартість відновлення в 6 разів [58].

1.5 Спосіб гальваноконтактного нанесення композитних покриттів на внутрішні поверхні гільз циліндрів

Високі фізико-механічні властивості поверхневого шару, а також його мікрогеометрія, що гарантує необхідну маслоємність, можуть бути отримані на внутрішній циліндричній поверхні гільз циліндрів за рахунок застосування технології гальваноконтактного осадження (ГКО) композитних покриттів на основі заліза, що забезпечить рівномірність осадженого покриття, високу корозійну стійкість і зносостійкість в умовах високих температур. Необхідними умовами процесу є:

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

- підтримка заданого тиску інструменту на зростаючі шари покриття під час його осадження;

- стабільність режимних параметрів осадження покриття (щільності струму, температури електроліту, швидкості головного і допоміжного руху, що реалізуються обладнанням ГКО);

- контроль ступеня зносу інструмента.

Слід відзначити, що дослідження в галузі відновлення деталей гальваноконтатним осадженням (ГКО) композитних покриттів на основі заліза в літературі відсутні зовсім. В [60] дано рекомендації по вибору режимів ГКО для ведення процесу осадження композитних хромових покриттів на внутрішні поверхні гільз гідроциліндрів і отримання герметичних покриттів. Однак гільзи гідроциліндрів працюють в умовах низьких температур, на відміну від гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння. Як зазначалося раніше, гільзи повинні добре протистояти явищам хімічної та електрохімічної корозії, пов'язаної з впливом на стінку гільзи сухих газів і електролітів сірчаної, вугільної та інших кислот. Також покриття повинне мати високу маслоємність, пористість, змочуваність, адгезію до основи, низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість в умовах впливу високих температур. Аналіз літературних даних, проведений в роботі, показав, що всі способи, що застосовуються для відновлення гільз циліндрів в даний час, вимагають, в тій чи іншій мірі, механічної обробки деталі до відновлення (гальваномеханічне осадження) або деталі до відновлення та/або покриття після гальванічного осадження металу (стандартна технологія відновлення), що вимагає застосування дорогого інструменту, який є недовговічним і вимагає частої заміни, значно підвищуючи трудомісткість і собівартість відновлення. Нам потрібно вибрати оптимальні режими електролізу і розробити технологію відновлення зношеної внутрішньої поверхні гільз циліндрів дизельних двигунів при якому механічна обробка, як деталі, так і покриття після його осадження, буде повністю усунена.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Відомо, що при відновленні деталей композитними покриттями може у ряді випадків відбуватися нерівномірний розподіл наповнювача за об'ємом гальванічної матриці. Ще однією проблемою є неможливість ванного відновлення великогабаритних деталей і необхідність позаванного відновлення в електролітичних комірках. Для вирішення цих проблем нами використовується спеціальний пристрій. Застосування якого дозволяє відновлювати деталі позаванним способом, підвищує рівномірність розподілу наповнювача за об'ємом композитної матриці і рівномірність покриття по висоті деталі за рахунок рівномірного оновлення електроліту в міжелектродному просторі.

Схема пристрою представлена на рисунках 1.14, 1.15. На рисунку 1.14 показана фронтальна проекція пристрою та розріз А-А. На рисунку 1.15 – електролітична комірка для нанесення покриттів на внутрішню поверхню гільз циліндрів.

Рисунок 1.14 – Схема пристрою для відновлення деталі
композитним покриттям

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Рисунок 1.15 – Електролітична комірка для нанесення покриттів
на внутрішню поверхню гільз циліндрів

Пристрій містить корпус у вигляді системи металевих трубок 1, з'єднаних з опорним 2 та центруючим 3 дисками. В трубках виконані отвори 4 для підведення електроліту. Причому отвори в горизонтальних площинах розташовані похило до радіальних напрямків під кутом $15...40^{\circ}$, а за висотою трубок отвори виконані з кроком, що зменшується догори на $1,0...2,0$ мм. Опорний диск 2 з'єднаний із розподільником електроліту 6, в який вмонтовано підвідний штуцер 5. На центрувальний диск 3 за допомогою трьох шпильок 11 монтується кришка 9, в якій встановлено зливний штуцер 8. Деталь 7 встановлюється спеціально підготовлені пази в розподільнику електроліту 6 і кришці 9 через ущільнювачі 10. До деталі підведені інструментальні гребінки 13 із брусками зі спеціального

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

композитного матеріалу 12. Слід зазначити, що вертикальне відхилення від рівномірного кроку і кутове відхилення каналів для витікання електроліту розраховуються для кожної конкретної деталі.

Пристрій працює наступним чином. Електроліт від насосної установки через підвідний штуцер 5, розподільник електроліту 6, виконаний в вигляді замкнутої кільцевої порожнини, і далі по трубках 1 через отвори 4 в них подається до поверхні оброблюваної деталі 7. Відведення електроліту із зони електролізу здійснюється через щілини між трубками 1 у внутрішню порожнину, утворену ними, і далі через зливний штуцер 8. Герметичність електролітичної комірки забезпечується щільним притисненням кришки 9 через ущільнення 10 за допомогою трьох шпильок 11.

Зменшення відстані між отворами дозволяє компенсувати різну швидкість витікання струменів електроліту з нижніх отворів (велика швидкість) і верхніх отворів (менша швидкість), а зміна кутів витікання дозволяє поліпшити циркуляцію в міжелектродному просторі. Експериментально встановлено, що для деталей висотою до 50 мм оптимальною величиною зниження відстаней між отворами є 1,0 мм, а для деталей висотою 600 мм – 2,0 мм. Застосування даного пристрою дозволяє досягти рівномірного оновлення електроліту та отримання рівномірного осадження металу за висотою деталі і забезпечує більш швидке видалення водню із зони обробки, що знижує наводнення матеріалу підкладки і самого покриття.

Висновки до розділу 1

Практично всі сучасні способи відновлення і ремонту гільз циліндрів містять у своєму технологічному процесі операції механічної обробки, а деякі, як наприклад індукційне відцентрове наплавлення, вимагає застосування високих температур, що призводить до зміни структури поверхневого шару відновлюваної деталі, сприяє виникненню термічних напружень в матеріалі і просторового

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

викривлення деталі. Окремий інтерес становлять способи електролітичного відновлення деталей, оскільки вони дозволяють наносити покриття заданої товщини із заданими фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками при невеликих температурах, однак і вони потребують застосування механічної обробки. Залізнення, порівняно з хромуванням, володіє великою кількістю позитивних якостей, проте поступається йому по зносостійкості і володіє властивістю зниження мікротвердості під впливом високих температур, що,ходячи із умов роботи гільз, є важливим. Виходячи з вищезгаданого, спосіб повинен забезпечувати виконання наступних умов:

- забезпечення зносостійкості гільзи не нижче рівня нової;
- відновлення початкових параметрів без застосування механічної обробки;
- підвищення жаростійкості покриття;
- стійкість до процесів корозії;
- міцність зчеплення покриття з деталлю на рівні міцності матеріалу гільзи на розрив;
- рівність коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів гільзи і покриття;
- забезпечувати продуктивність і економічність;
- створювати хороші санітарно-гігієнічні умови процесу.

Найбільш оптимальним способом відновлення гільз циліндрів, що забезпечує виконання всіх умов, є гальваноконтактне осадження (ГКО) композитних покриттів на основі заліза. В літературі дослідження в області гальваноконтактного осадження композитних покриттів на основі заліза відсутні.

Отже, **мета дослідження** – підвищення довговічності та зниження собівартості відновлення гільз циліндрів двигунів шляхом гальваноконтактного осаджування композитного покриття на основі заліза. **Об'єктом** розробки є процес відновлення гільзи ДВЗ, а **предметом** – вплив технологічних факторів на обробку гальваноконтактним осадженням.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

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

- побудувати моделі формоутворення товстошарових композитних покриттів на основі заліза із залишковими напруженнями стиску;
- розробити технологію нанесення композитних покриттів на основі заліза;
- дослідити вплив режимних параметрів нанесення композитних покриттів на основі заліза на їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики;
- визначити технологічні режими нанесення композитних покриттів на основі гальванічного заліза, що забезпечать потрібні фізико-механічні властивості покриття при нанесенні його на внутрішні циліндричні поверхні;
- приділити увагу питанням охорони праці, економічної ефективності та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Моделювання зусилля механічної дії на композит, що росте, із метою прогнозування фізико-механічних властивостей покриття

В даний час великий інтерес для промисловості і для відновлення техніки зокрема, представляють покриття із завчасно заданими властивостями. Для прогнозування фізико-механічних та експлуатаційних властивостей одержуваних композитних покриттів способом ГКО необхідно вміти прораховувати напруження, що виникають в покритті, що наноситься, в процесі його гальванічного осадження. Як зазначалося раніше, процес ГКО характеризується одночасним механічним впливом на гальванічно осаджуване покриття. Причому, в якості інструменту використовується знов синтезований матеріал, що забезпечує регульоване масове перенесення інструментального матеріалу в осаджуване покриття, що дозволяє отримувати композитні покриття на основі гальванічної матриці. У зв'язку із цим, у роботі побудовано модель деформування двокомпонентного композитного матеріалу із пружно-пластичними включеннями і пружною матрицею. Згідно з [61] пластична течія в цьому випадку починається одночасно у всіх точках включень. Запропонована модель, що враховує виникнення зон пластичного плину в окремих областях включень, що відповідає технологічній схемі деформації покриття, і їх поширення на весь об'єм включень.

Нехай двокомпонентний композитний матеріал займає об'єм V , обмежений поверхнею S .

Перший компонент композита утворює ідеально пружну сполучну матрицю V_1 .

$$\sigma_{ij} = 2\mu_1 \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \lambda_1 \varepsilon_{qq} . \quad (2.1)$$

А другий компонент V_1 являє собою окремі пружно-пластичні включення сферичної форми

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

$$\sigma_{ij} = 2\mu_2 (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p)^2 + \delta_{ij} \lambda_2 \varepsilon_{qq}, \quad (2.2)$$

де σ_{ij} , ε_{ij} – компоненти тензорів локальних напружень і повних деформацій;

ε_{ij}^p – компоненти тензора пластичних деформацій;

δ_{ij} – коефіцієнт товщини елементарного шару;

μ_s , λ_s – параметри Ламе ізотропних компонентів, пластичні деформації яких відповідають умові нестискання ($\varepsilon_{qq} = 0$).

Пластичні властивості матеріалу включень задаються поверхнею текучості Мізеса із відповідним асоційованим законом течії:

$$s_{ij}s_{ij} = k_2^2; \quad (2.3)$$

$$s_{ij} = k_2 \frac{e_{ij}^p}{\sqrt{e_{kl}^p e_{kl}^p}}, \quad (2.4)$$

де $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{qq}$, $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_{qq}$;

k_2 – межа текучості включень (крапкою позначено швидкості пластичних деформацій).

Геометрична структура такого двокомпонентного композитного матеріалу описується випадковою ізотропною функцією координат $k_2(r)$, що дорівнює одиниці в об'ємі V_2 і нулю поза цим об'ємом. Окрім цього, геометричні особливості виникаючих і розвиваючихся в об'ємі включень зон пластичної течії V_p описує додаткова індикаторна функція $k_p(r)$, що дорівнює одиниці в об'ємі V_p ($0 \leq V_p \leq V_2$) і нулю поза цим об'ємом.

За допомогою цих функцій локальний закон Гука для середовища запишеться у виді:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}) = 2\mu_1 \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) + \delta_{ij} \lambda_1 \varepsilon_{qq}(\mathbf{r}) + (2[\mu] \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) + \delta_{ij} [\lambda] \varepsilon_{qq}(\mathbf{r})) k_2(\mathbf{r}) - 2\mu_2 e_{ij}^p(\mathbf{r}) k_p(\mathbf{r}). \quad (2.5)$$

Індикаторні функції, напруження, повні та пластичні деформації вважаються статично однорідними та ергодичними випадковими полями, тому їх математичні очікування замінюються середніми значеннями за повним об'ємом V , об'ємами компонентів V_s ($s=1, 2$) та об'ємом V_p [62]:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{V} \int_V f(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad \langle f \rangle_{s,p} = \frac{1}{V_{s,p}} \int_{V_{s,p}} f(\mathbf{r}) d\mathbf{r}, \quad (2.6)$$

де кутовими скобками позначено операції усереднення.

Для визначення макроскопічної поведінки розглядуваного композитного матеріалу та обчислення його ефективних характеристик локальні рівняння (2.4) та (2.5) необхідно усереднити за об'ємами V та V_p :

$$\langle s_{ij} s_{ij} \rangle_p = k_2^2, \quad 4\mu_2^3 \langle (e_{ij} - e_{ij}^p)(e_{ij} - e_{ij}^p) \rangle_p = k_2^2, \quad (2.7)$$

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = 2\mu_1 \langle \varepsilon_{ij} \rangle + \delta_{ij} \lambda \langle \varepsilon_{qq} \rangle + c^2 (2[\mu] \langle \varepsilon_{ij} \rangle_2 + \delta_{ij} [\lambda] \langle \varepsilon_{qq} \rangle_2) - 2\mu_2 c_p \langle e_{ij}^p \rangle_p. \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.7), (2.8) показують, що для встановлення ефективного закону Гука необхідно виразити величини $\langle \varepsilon_{ij} \rangle_2$, $\langle \varepsilon_{ij} \rangle_p$, $\langle \varepsilon_{ij}^p \rangle_p$ через макроскопічні деформації $\langle \varepsilon_{ij} \rangle$ і залишкові деформації $\langle \varepsilon_{ij}^* \rangle$, що вимірюються в композиційному

матеріалі після зняття зовнішніх навантажень. Це досягається статичним усередненням системи деформування середовища, що складається з рівнянь (2.5), рівнянь рівноваги:

$$\sigma_{iq,q}(\mathbf{r}) = 0, \quad (2.9)$$

а також співвідношень Коші

$$2\varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = u_{i,j}(\mathbf{r}) + u_{j,i}(\mathbf{r}), \quad (2.10)$$

що зв'язують компоненти тензора деформацій із компонентами вектору переміщень $u_i(\mathbf{r})$. Граничними умовами для замкненої системи є умови відсутності флуктуацій величин на поверхні S об'єму V :

$$f(\mathbf{r})_{r \in S} = \langle f \rangle. \quad (2.11)$$

Слідуючи за роботою [8], будемо нехтувати флуктуаціями повних та пластичних деформацій в об'ємах V_2 та V_p . Тоді рівняння (2.5) матиме вид

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(\mathbf{r}) = & 2\mu_1 \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) + \delta_{ij} \lambda_1 \varepsilon_{qq}(\mathbf{r}) + \left(2[\mu] \langle \varepsilon_{ij} \rangle_2 + \delta_{ij} [\lambda] \langle \varepsilon_{qq} \rangle_2 \right) k_2(\mathbf{r}) - \\ & - 2\mu_2 \langle e_{ij}^p \rangle_p k_p(\mathbf{r}). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Тут $[f] = f_2 - f_1$.

За допомогою тензору Гріна

$$G_{ik}(\mathbf{r}) = \frac{1}{8\pi\mu_1} \left(\delta_{ik} r_{qq} - \frac{\lambda_1 + \mu_1}{\lambda_1 + 8\mu_1} r_{ik} \right), \quad \mathbf{r} = |\mathbf{r}|. \quad (2.13)$$

Система рівнянь (2.9), (2.10) (2.13) із граничними умовами (2.11) може бути зведена до системи інтегральних рівнянь виду

$$\varepsilon'_{ik}(\mathbf{r}) = \int G_{ik,jl}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1) \tau'_{kl}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1. \quad (2.14)$$

Штрихами позначено флуктуації величин в об'ємі V .

Тут

$$\tau_{ij}(\mathbf{r}) = -\left(2[\mu]\langle\varepsilon_{ij}\rangle_2 + \delta_{ij}[\lambda]\langle\varepsilon_{qq}\rangle_2\right)k_2(\mathbf{r}) + 2\mu_2k_p(\mathbf{r})\langle e_{ij}^p\rangle_p. \quad (2.15)$$

Визначимо спочатку ефективний закон Гука композитного матеріалу, що розглядається, і його залишкові макроскопічні деформації. Підставляючи рівняння (2.14) із виразом (2.15) для τ_{ij} у відоме співвідношення [64]

$$\langle\varepsilon_{ij}\rangle_s = \langle\varepsilon_{ij}\rangle - \mathbf{c}_s^{-1}\langle\mathbf{k}'_s\varepsilon'_{ij}\rangle \quad (2.16)$$

і використовуючи властивість ізотропності функцій $k_2(\mathbf{r})$, $k_p(\mathbf{r})$ знаходимо рівняння відносно величин $\langle\varepsilon_{ij}\rangle_2$, $\langle\varepsilon_{ij}\rangle_p$, вирішуючи котрі отримуємо

$$\langle\varepsilon_{ij}\rangle_2 = \frac{1}{1 + \alpha_1 c_1 (m-1)} \left(\langle e_{ij} \rangle + \frac{m c_1 \alpha_1}{c_2} c_p \langle e_{ij}^p \rangle_p \right); \quad (2.17)$$

$$\langle\varepsilon_{qq}\rangle_2 = \frac{1}{1 + \gamma_1 c_1 (q-1)} \langle e_{qq} \rangle; \quad (2.18)$$

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle_P = \frac{1}{1 + \alpha_1 c_1 (m-1)} \left(\langle e_{ij} \rangle + m(1 - c_p) \alpha_1 \langle e_{ij}^p \rangle_P \right); \quad (2.19)$$

$$\text{де } \alpha_1 = \frac{14 - 5\nu_1}{151 - \nu_1}, \gamma_1 = \frac{11 + \nu_1}{31 - \nu_1}, \nu_1 = \frac{\lambda_1}{2(\lambda_1 + \mu_1)}, m = \frac{\mu_2}{\mu_1}, q = \frac{K_2}{K_1}, K_s = \lambda_s + \frac{2}{3}\mu_s.$$

Підставивши формули (2.17)-(2.19) у співвідношення (2.7), (2.8) і виділивши дивіаторну та об'ємну частини, знаходимо

$$\langle s_{ij} \rangle = 2\mu^* \left(\langle e_{ij} \rangle - e_{ij}^* \right); \quad (2.20)$$

$$\langle \sigma_{qq} \rangle = 3K^* \langle \varepsilon_{qq} \rangle. \quad (2.21)$$

Тут

$$\mu^* = \mu_1 \left(1 + \frac{c_2(m-1)}{1 + \alpha_1 c_1 (m-1)} \right); \quad (2.22)$$

$$K^* = K_1 \left(1 + \frac{c_2(q-1)}{1 + \gamma_1 c_1 (q-1)} \right). \quad (2.23)$$

Їх називають ефективними модулями зсуву та об'ємного розтягу (стиску). Залишкові деформації e_{ij}^* пов'язані із макроскопічними пластичними деформаціями співвідношенням

$$\langle e_{ij}^p \rangle = \frac{1}{m} \left(1 + (\alpha_1 c_1 + c_2)(m-1) \right) e_{ij}^*. \quad (2.24)$$

Для визначення макроскопічної поведінки композитного матеріалу за межею пружності необхідно усереднити співвідношення (2.3), (2.4) за об'ємом зони пластичної течії V_p . Застосування до першого співвідношення припущення щодо

відсутності флуктуацій величин в об'ємах V_2 і V_p і правила механічного змішування дасть

$$\left(\langle e_{ij} \rangle_p - \langle e_{ij}^p \rangle_p\right) \left(\langle e_{ij} \rangle_p - \langle e_{ij}^p \rangle_p\right) = \frac{k_2^2}{4\mu_{22}}. \quad (2.25)$$

Виключаючи з рівняння (2.25) за допомогою формул (2.17)-(2.24) деформації $\langle e_{ij} \rangle_p$, $\langle e_{ij} \rangle$, $\langle e_{ij}^p \rangle$ знаходимо закон навантаження середовища, що розглядається

$$\langle s_{ij} \rangle = k^* \frac{\langle e_{ij}^{*} \rangle \tau}{1} + 2n^* e_{ij}^*. \quad (2.26)$$

Ефективна межа текучості:

$$k^* = \frac{k_2}{m} \left(1 + (\alpha_1 c_1 + c_2)(m-1)\right). \quad (2.27)$$

Коефіцієнт зміцнення:

$$n^* = \mu^* \left(\frac{k^*}{k_2 c_p} \left(1 + \alpha_1 \left((m-1)c_1 - m(1-c_p) \right) - 1 \right) \right). \quad (2.28)$$

Рівняння (2.26) описує нелінійне деформування композитного матеріалу за межею пружності.

Загальний вид рівняння навантаження покриття при його гальванічному нанесенні буде мати наступний вид:

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$\langle P_{\text{Ікр}} \rangle = \frac{k_2}{m} (1 + (\alpha_1 c_1 + c_2)(m-1)) \frac{\langle e_{ij}^{*} \rangle \tau}{l} + 2\mu^* \left(\frac{\frac{k_2}{m} (1 + (\alpha_1 c_1 + c_2)(m-1))}{k_2 c_p} (1 + \alpha_1 ((m-1)c_1 - m(1-c_p))) - 1 \right) \frac{\delta_{ij}^*}{l}; (2.29)$$

де $P_{\text{Ікр}}$ – максимальний тиск інструмента на покриття під час його осадження, МПа;

k_2 – межа текучості наповнювача, МПа;

α_1, m – коефіцієнти, що розраховуються за [63];

c_1 – постійна, що характеризує властивості матеріалу матриці;

c_2 – постійна, що характеризує властивості матеріалу наповнювача;

c_p – коефіцієнт, що враховує схему дії зовнішніх сил;

e_{ij}^{*} – задана швидкість деформації покриття, м/хв;

τ – період впливу на певну точку покриття, хв;

l – довжина інструмента, що використовується, м;

μ^* – ефективний модуль зсуву композита, що отримується, МПа;

δ_{ij}^* – товщина елементарного шару композиту в місці контакту з інструментом,

м.

Ефективна межа текучості k^* характеризує початкову поверхню текучості. Вона є лінійною функцією концентрації і при $c_2 = 1$ дорівнює межі текучості матеріалу включень k_2 . Коефіцієнт зміцнення n^* задає швидкість переміщення і деформування циліндра Мізеса у шестивимірному просторі напружень.

Отримавши значення критичної сили впливу на композитне покриття в процесі його осадження, необхідно створити модель, що дозволяє розраховувати зусилля для інструмента з метою отримання планованих залишкових напружень в

покритті. Це дозволить створювати гальванічні композитні покриття із наперед заданими фізико-механічними властивостями.

З теорії деформування відомо:

$$\sigma_z = -\frac{2\tau_k}{h}x + C; \quad (2.30)$$

де σ_z – осьові напруження, МПа;

τ_k – дотичні напруження на ділянці контакту з інструментом, МПа;

x – відстань до точки, що розглядається, напруженого стану, м;

h – розмір покриття, що осаджується на ділянці між двома послідовними проходами інструмента, м;

C – постійна, що визначає напруження, отримані на попередньому етапі формування поверхневого шару, МПа.

У нашому випадку величина C визначає напруження, отримані покриттям під час його взаємодії з інструментом на етапі, що передує розглядаемому інтервалу часу. Схема механічної дії інструмента на осаджуване покриття представлена на рисунку 2.1.

У [65] зазначається, що при відсутності тертя, напруження σ_z залишалось би постійним незалежно від геометрії інструмента і дорівнювало $-\sigma_s$. Логічно уявити, що у крайніх точках контактної поверхні, тобто при $x = \pm 0,5a$ та при наявності тертя початкове значення напруження σ_z для моменту часу початку механічної дії також дорівнює $-\sigma_s$. І з цього значення абсолютна величина його зростає при зменшенні координати x , що зумовлено механікою взаємодії інструмента із покриттям.

Рисунок 2.1 – Схема деформування покриття під час осаджування

Отже, вважаючи, що при $x = \pm 0,5a$ напруження $\sigma_z = -\sigma_s$ за рівнянням (2.30) отримаємо

$$C = -\sigma_s + \frac{\tau_k a}{h}, \quad (2.31)$$

де a – протяжність контактної поверхні інструмента, м;

σ_s – напруження в композиті, МПа.

Підставивши отримане значення постійної у рівняння (2.30), отримаємо

$$\sigma_z = -\sigma_s + \frac{\tau_k (a - 2x)}{h}. \quad (2.32)$$

Так як τ_k прийнято постійним, то його можливо виразити за рівнянням плоского деформованого стану [65], що має вид

$$\tau_k = -\mu_s \sigma_s, \quad (2.33)$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

де μ_s – коефіцієнт тертя композитного матеріалу.

Підставивши цей вираз τ_k в рівняння (2.30), отримаємо остаточне значення σ_z :

$$\sigma_z = -\sigma_s \left[1 + \frac{\mu_s (a - 2x)}{h} \right]. \quad (2.34)$$

Маючи вираз для розрахунку напруження, що формується в покритті в процесі його нанесення, приступимо до розрахунку зусилля, необхідного для створення цих напружень у процесі формування шару покриття.

Розглянемо схему деформування осаджуваного покриття, беручи до уваги, що течія деформованого матеріалу покриття відбувається за найкоротшими нормаллями до периметру перерізу. Дотичні напруження на контактній поверхні вважаємо постійними. Ділянками падіння дотичних напружень нехтуємо з огляду на їх малозначимість. На рисунку 2.2 представлена горизонтальна проекція рисунка 2.1. На цій схемі представлена контактна поверхня із зазначенням меж течії деформованого матеріалу у відповідності до принципу течії по найкоротшій нормалі. Вісь Z перпендикулярна площині креслення.

Враховуючи, що зміна нормальних напружень на контактній поверхні відповідно за координатою x (для трапецій *afed* та *bfec*) та за координатою y (для трикутників *abf* та *ced*) визначається раніше отриманим виразом (2.34).

Отримаємо для трапецій

$$|\sigma_z| = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu_s (a - 2x)}{h} \right). \quad (2.35)$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Рисунок 2.2 – Горизонтальна проекція контактної поверхні

Для трикутників

$$|\sigma_z| = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu_s (a - 2y)}{h} \right). \quad (2.36)$$

Вираз для тиску інструмента, що дозволяє створити в композитному гальванічному покритті задані напруження, може бути отримано, враховуючи, що площу контакту інструмента із деталлю узявши два рази по площі трапеції F_1 і два рази по площі трикутника F_2 відповідно до рисунку 2.2:

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

$$P = 2 \int_{F_1} \sigma_s \left(1 + \frac{\mu_s (a - 2x)}{h} \right) dF_1 + 2 \int_{F_2} \sigma_s \left(1 + \frac{\mu_s (a - 2y)}{h} \right) dF_2. \quad (2.37)$$

Враховуючи схему деформації, представлену на рисунку 2.1, видно:

$$dF_1 = [(1 - a) + 2x] dx. \quad (2.38)$$

$$dF_2 = [2y - (1 - a)] dy. \quad (2.39)$$

Отже, вираз (2.37) з урахуванням (2.38), (2.39) матиме вид:

$$P = 2\sigma_s \left\{ \int_0^{0,5a} \left(1 + \frac{\mu_s (a - 2x)}{h} \right) [(1 - a) + 2x] dx + \int_{0,5(1-a)}^{0,5l} \left(1 + \frac{\mu_s (1 - 2y)}{h} \right) [2y - (1 - a)] dy \right\}. \quad (2.40)$$

Проінтегрувавши вираз (2.40) і враховуючи площу контакту al , отримаємо вираз (2.41) для визначення тиску інструменту, при якому в покритті будуть формуватися задані напруження, що дозволить керувати фізико-механічними та експлуатаційними властивостями покриттів.

$$P = \sigma_s \left(1 + \frac{\left(1 - \frac{a}{3l} \right) \cdot \frac{a}{h}}{2} \right). \quad (2.41)$$

Отримана формула (2.41) може легко використовуватись для визначення необхідного тиску інструмента при технологічних розрахунках параметрів осадження покриттів із заданими властивостями.

2.2 Вплив кінематичних параметрів механічного впливу та геометрії інструмента на формування шару при гальваноконтактному осадженні

Особливість способу гальваноконтактного осадження (ГКО) полягає в періодичній пружно-пластичній деформації шарів зростаючих покриттів у процесі їх осадження за допомогою інструменту. Таким чином, періодичний механічний вплив на зростаючі кристали гальванічного заліза викликає тимчасову зупинку їх зростання в момент проходження зони механічної активації інструментом. Це формує шар композитного покриття. Після проходження інструменту зростання кристалів відновлюється до наступного їх контакту з інструментом, що формує наступний шар гальванічного композитного покриття. Даний процес повторюється періодично під час проведення процесу ГКО. Враховуючи цю особливість способу, зрозуміло, що на поверхні деталі виходить шаруватий композит.

Принцип способу ГКО при нанесенні гальванічного композиту на внутрішні циліндричні поверхні полягає в одночасному поєднанні обертального руху інструменту і його зворотно-поступального руху в процесі нанесення покриттів. Схема способу показана на рисунку 2.3, де під номером 1 показана деталь, а під номером 2 – інструмент. При товстошаровому відновленні внутрішніх циліндричних поверхонь деталей гальваноконтактним способом особливу роль відіграє траєкторія періодичних низькочастотних переміщень інструменту, що контактує з поверхнею оброблюваної деталі, як фактор формоутворення нарощуваних шарів композитного матеріалу.

Зворотно-поступальне переміщення може бути здійснене різними способами, самим легкодоступним з яких є рух за допомогою кривошипно-шатунного механізму. При цьому необхідно, щоб сумарне переміщення інструменту

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

забезпечувало повне перекриття відновлюваної поверхні слідами інструменту. Саме ця кінематика руху інструменту застосована в установках для гальваноконтального способу осадження композитних покриттів на основі заліза на внутрішні циліндричні поверхні.

Рисунок 2.3 – Схема способу гальваноконтального осадження (ГКО)

Кривошипно-шатунний механізм переміщує інструмент зворотно-поступально вздовж осі відновлюваної деталі. Це переміщення має синусоїдальний характер і описується найпростішим рівнянням гармонічних коливань:

$$y = A \cdot \cos(\omega x), \quad (2.42)$$

де y – величина поздовжнього переміщення інструмента вздовж осі циліндра;

x – величина зміщення інструмента відносно поверхні циліндра, що обертається;

A – амплітуда переміщень інструмента вздовж осі циліндра (у нашому випадку вона дорівнює радіусу кривошипа або половині висоти циліндра

$$A = R_{кр} = H_{ц} / 2);$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

m – коефіцієнт, що впливає на зміну величини переміщення інструмента відносно поверхні циліндра, що обертається [66]. У нашому випадку він буде дорівнювати відношенню частоти обертання кривошипа до частоти обертання циліндра):

$$m = \frac{n_{кр}}{n_{ц}}. \quad (2.43)$$

Для відображення слідів на оброблюваній поверхні уявімо поверхню циліндра у вигляді поверхні, що нескінченно розгортається, постійного діаметра (рисунок 2.4). Кожен оберт циліндра дасть плоску ділянку з довжиною $l = 2\pi R_{ц}$, що дорівнює довжині кола циліндра, і шириною, рівною висоті циліндра $H_{ц}$.

Рисунок 2.4 – Схема розгортання циліндричної поверхні, що оброблюється

Найпростішим варіантом траєкторії середньої точки плями контакту інструмента буде випадок, коли частота обертання кривошипа і частота обертання циліндра збігаються, тобто $m = 1$, рівняння (2.42) прийме вигляд

$$y = R_{кр} \cos(x), \quad (2.44)$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

а за один повний оберт циліндра ($x = 2\pi R_{\text{ц}}$) середня точка здійснить один повний подвійний хід уздовж осі циліндра. Картину такого переміщення можна представити і описати графіком траєкторії середньої точки (рисунок 2.5) плями контакту інструменту, що ковзає по відновлюваній циліндричній поверхні.

Рисунок 2.5 – Графік траєкторії переміщення точки плями контакту інструмента по циліндричній поверхні

Графік на рисунку 2.5 показує, що середня точка плями контакту інструменту з поверхнею після одного, двох і так далі обертів повертається у вихідне положення. Це неминуче призводить до того, що сліди вигладжувачого елемента не повністю охоплюють відновлювану поверхню, тобто мають місце «пробіли» – ділянки, на які інструмент не заходить.

При розбіжності частоти обертання кривошипа із частотою обертання циліндра інструменту за кожний повний оберт циліндра повідомляється додаткове

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

сумарне переміщення Δy уздовж осі циліндра. Якщо $m > 1$, то $\Delta y > 0$; якщо ж $m < 1$, то $\Delta y < 0$.

Розглянемо окремий випадок, коли $m = 1,2$ (рисунок 2.6). Як видно з графіка, середня точка плями контакту інструменту після 1-го обороту циліндра (рисунок 2.6, крива $f_1(x)$) не потрапляє в початкову точку свого руху. Те ж саме відбудеться і з іншими кривими при наступних обертах (рисунок 2.6, криві $f_2(x)$, ... , $f_4(x)$). І лише кінцева точка траєкторії 5-го обороту (рисунок 2.6, крива $f_5(x)$) співпаде з початковою точкою першого оберту. Тобто починаючи з шостого оберту шпинделя відносно циліндричної твірної відновлюваної деталі, всі п'ять первинних траєкторій будуть повторюватися.

Рисунок 2.6 – Сліди траєкторії переміщення середньої точки плями контакту інструмента із оброблюваною поверхнею при русі інструмента за законом $y = R_{кр} \cos(1,2x)$

З графіка (рисунок 2.6) видно, що відстань між слідами середніх точок по висоті циліндра в однойменних положеннях неоднакова. Біля торців циліндра ця відстань мінімальна. При наближенні до центру відстань між сусідніми слідами збільшується і посередині досягає свого максимуму. Зміна відстані між слідами також має синусоїдальний характер. Тому для повного перекриття відновлюваної

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

поверхні максимальна відстань між сусідніми слідами повинна бути менше або дорівнювати довжині лінії контакту інструменту, що досягається регулюванням частот обертання кривошипа і шпинделя установки, що теоретично рівнозначно зміни коефіцієнта m [63].

Очевидно, що інструмент при зворотно-поступальному русі не може мати на всьому протязі деталі однакову лінійну швидкість переміщення. Вона максимальна в середній частині шляху переміщення, мінімальна на початку і кінці та дорівнює нулю в точці зміни напрямку руху. А це, виходячи з відомостей наведених в [67], призводить до того, що в тих областях, де швидкість інструменту мінімальна, між механічними впливами інструменту осідає шар покриття більшої товщини, ніж на ділянці деталі з максимальною швидкістю його проходження.

Однак, відстань між слідами середньої точки плями контакту не постійна, тому, у торців циліндра буде більш щільне нашарування слідів лінії контакту, а, отже, це частково або повністю компенсує різницю у товщині осаджуваного шару металу по довжині вздовж осі відновлюваної циліндричної поверхні.

У підсумку, при гальваноконтактному відновленні траєкторія середньої точки плями контакту одного інструментального бруска з відновлюваною поверхнею, подібна представлений на рисунку 2.7, дозволяє більш повно охопити відновлювану поверхню слідами інструменту, а за умови, що максимальна відстань між сусідніми слідами менше або дорівнює довжині лінії контакту інструмента це забезпечить більш рівномірне осаджування, ніж при інших способах гальванічного осадження.

Переважає більшість гільз циліндрів двигунів має довжину робочої поверхні, що підлягає відновленню, більшу, ніж довжина одного контактуючого елемента. Тому для повного охоплення відновлюваної поверхні слідами інструменту необхідно використовувати відразу кілька інструментальних пластин, які контактують із деталлю, об'єднаних в один інструментальний блок (рисунок 2.8).

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Рисунок 2.7 – Траєкторія контакту із відновлюваною циліндричною поверхнею
одного інструментального бруска

При цьому повинна виконуватися наступна умова:

$$l_{\text{вп}} \leq h_{\text{рг}} + 2A, \quad (2.45)$$

де $l_{\text{вп}}$ – довжина відновлюваної циліндричної поверхні деталі, м;

$h_{\text{рг}}$ – висота робочої частини інструментальної головки, м;

A – амплітуда поздовжніх зворотно-поступальних переміщень
інструментальної головки, м.

$$h_{\text{рг}} = h_{\text{б}}x_{\text{б}} + a(x_{\text{б}} - 1), \quad (2.46)$$

де $h_{\text{б}}$ – висота інструментального бруска в головці ГКО, м;

$x_{\text{б}}$ – число інструментальних брусків в головці ГКО, шт;

a – осьова відстань між сусідніми інструментальними брусками в головці ГКО,
м.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Рисунок 2.8 – Схема кінематичного контакту інструментальних блоків в головці ГКО для відновлення внутрішньої циліндричної поверхні

Для повної обробки відновлюваної поверхні інструментальною головкою сліди сусідніх інструментальних пластин повинні перекривати один одного на яку-небудь певну величину. Амплітуда подовжніх зворотно-поступальних переміщень інструменту при цьому розраховується за формулою:

$$A = \frac{a + b}{2}, \quad (2.47)$$

де b – величина перекриття слідів інструменту, м (раціональна величина становить близько $(3...7) \cdot 10^{-3}$ м).

Після перетворень отримаємо умову для повного охоплення відновлюваної поверхні слідами інструменту:

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

$$l_{\text{вп}} \leq x_6 (h_6 + a) + b. \quad (2.48)$$

Висновки до розділу 2

1 Запропоновано модель формоутворення композитних покриттів на основі заліза, що дозволяє визначати ефективні механічні модулі реального композиту, одержуваного при гальванічному осадженні залізних покриттів.

2 Запропоновано залежність для визначення тиску інструмента на відновлювану поверхню із метою прогнозування напружень, отриманих у композитному покритті при певних умовах осадження. Результати прогнозування показують, що можливо отримання композитних покриттів на основі заліза товщиною до 0,7 мм зі стискаючими залишковими напруженнями.

3 Отримано аналітичні залежності, що зв'язують геометричні параметри інструменту із кінематикою його руху, що дозволяє уникнути ефекту «залисин» при осадженні покриття.

4 Встановлено, що варіюванням подачі, зусилля притискання інструменту до деталі, кратності частоти коливань інструменту і обертів деталі, геометрії вигладжувачого інструмента можна досягти необхідної щільності слідів вигладжування, що виключає небезпеку надлишкового зміцнення покриття і, як наслідок, його відшаровування.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вибір матеріалів та робочих середовищ для досліджень

Для визначення режимних параметрів обробки способом ГКО дослідження проводилися на зразках, виготовлених із спеціального чавуну ДСТУ 8851:2019, діаметром 40 мм і довжиною 65 мм загартованих СВЧ на глибину не менше 1,5 мм. Зразок представлений на рисунку 3.1.

Рисунок 3.1 – Зразок для досліджень

Досліджувався технологічний процес відновлення внутрішньої зношеної поверхні гільз циліндрів способом гальваноконтактного осадження із отриманням на ній зносостійких пористих композитних покриттів на основі залізної матриці, із стискаючими залишковими напруженнями і підвищеною адгезією до основи.

Для проведення експериментів було розроблено та апробовано новий технологічний процес, що найбільш повно задовольняє способу ГКО композитних покриттів на основі заліза.

Покриття осаджувались в стандартному електроліті залізнення. Що містить 300...350 г/л $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ТУ 6-02-609-85 (рН=1). Він знайшов широке застосування на відновлювальних підприємствах. Для проведення

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

експериментальних досліджень електроліт готували з реактивів «ХЧ» та «ЧДА» на дистильованій воді за методикою [3].

В якості анодів використовувалися пластини нарізані зі смуг стали марки 10 ДСТУ 7809:2015. Аноди завішували у ванні в чохлах, виготовлених з фільтрувальної тканини зі скляного волокна ГОСТ 8481-75.

Температура електроліту підтримувалася з точністю 1К за допомогою термометра ТПП-11 ГОСТ 13717–74 і контролювалася термометром ТН 5 з ціною поділки шкали 0,2 К. Щільність електроліту вимірювалася ареометром АЕ-1, кислотність рН – метромілівольтметром моделі рН-121. Коригування електроліту, його аналіз проводилися за методикою, викладеною у [3]. Фільтрація електроліту була постійною.

Анодне травлення і нейтралізацію проводили в лужному електроліті, що містить 200-250 г/л каустичної соди, 100 г/л кальцинованої соди, 5-10 г/л рідкого скла, решта – вода.

3.2 Загальні положення технології нанесення композитних гальванічних покриттів на основі заліза

Технологія нанесення композитних гальванічних покриттів на основі заліза змінюється залежно від матеріалу деталі, від способу ізоляції поверхонь, що не підлягають відновленню, і від типу застосовуваних електролітів. При цьому будь-яку технологічну схему можна розбити на три частини: підготовку поверхні до відновлення, нанесення покриття і промивання від електроліту.

Перша частина технологічного циклу – підготовка до нанесення покриття є самою трудомісткою і найменш автоматизованою: саме підготовка поверхні є вирішальною для отримання якісного зчеплення.

Сам електроліз композитних покриттів вимагає від робочого персоналу тільки уважності до процесу.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Від завершальних операцій по промивці від залишків електроліту залежить працездатність відновленої деталі, довговічність вузла, в якому вона буде працювати, довговічність обладнання, так як погано нейтралізована деталь, що зберегла сліди соляної кислоти, іржавіє сама і викликає іржу у металу з якими вона стикається.

Із сказаного видно, що всі операції технологічного процесу ГКО композитних гальванічних покриттів на основі заліза важливі і недотримання одного з пунктів технології, який може здатися несуттєвим, рано чи пізно виявиться катастрофічним. Загальна технологічна схема відновлення гільз двигунів має наступу послідовність: 1) промивка деталей від бруду й мастил. Включає обробку поверхонь під покриття шкіркою (у разі необхідності); 2) вторинна промивка; 3) забарвлення захисними фарбами або лаками (при їх вживанні); 4) травлення в хлористому електроліті; 5) промивка; 6) анодна обробка в лужній ванні; 7) промивка; 8) монтаж деталей і захисних футлярів на підвіску установки ГКО; 9) витримка без струму; 10) осадження композитних гальванічних покриттів на основі заліза; 11) демонтаж деталі з установки ГКО; 12) промивка; 13) видалення лаків; 14) нейтралізація; 15) промивка; 16) контроль якості осаду; 17) консервація.

Деякі з перерахованих операцій іноді опускаються, наприклад, обробка шкіркою не застосовується, якщо деталі травлять в хлористому електроліті.

3.3 Експериментальна установка для реалізації способу ГКО

Дослідження проводилися на спеціальній експериментальній установці для відновлення внутрішніх циліндричних поверхонь. На установці можлива широка зміна параметрів ГКО: тиску інструменту, міжелектродної відстані, температури електроліту, щільності струму, швидкості головного і допоміжного рухів. Загальний вигляд установки подано на рисунку 3.2.

Технічні дані експериментальної установки наступні:

- максимальний діаметр оброблюваних зразків, мм 250;

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

- максимальна довжина зразків, мм	450;
- частота обертання шпинделя, $V_{\text{ш}}$, об/хв.	0...100;
- число подвійних ходів інструменту, $V_{\text{доп}}$, пдв.х./хв.	0...200;
- регулювання температури, К	300...363;
- регулювання напруги, В	0...24;
- регулювання сили струму, А	0...630;
- регулювання міжелектродного зазору, мм	40...100;
- регулювання тиску інструменту, МПа	0...5;
- притискання інструменту до зразка (за допомогою пружин тарованих)	ручне.

Рисунок 3.2 – Експериментальна
установка

Рисунок 3.3 – Головка для ГКО

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Установка складається з наступних частин: головки 1, закріпленої на рамі 2; бака для електроліту 3; фільтра очищення повітря від парів електроліту 4, що з'єднаний з витяжною вентиляцією; електрообладнання, встановленого у шафі 5; джерела струму 6 типу ВАКР-630-24У4.

Головка ГКО зображена на рисунку 3.3. Вона являє собою раму 1 з встановленим на ній струмопідводом, забезпеченим водяним охолодженням 2, і важелями 3, на яких шарнірно закріплені інструментальні гребінки 4 з можливістю зворотно-поступального руху притискних пластин 5 і обертового руху зразка шляхом електродвигунів 6 постійного струму ДВ-200 з планетарними редукторами 7.

Регулювання обертів двигунів здійснюється за допомогою автотрансформаторів ЛАТР 1М. Струмопідведення на зразок здійснюється мідно-графітовими щітками через колектор, закріплений на шпинделі. Анодами служать пластини, нарізані з смуг сталі марки Ст10. Аноди за допомогою штанг закріплені на рамі з можливістю регулювання межелектродного зазору. У зв'язку з тим, що в процесі відновлення відбувається зменшення діаметра відновлюваної деталі, можливе неконтрольоване зростання тиску інструменту на покриття, що може викликати руйнування інструмента або надлишкове зміцнення самого покриття, тому робочий інструмент був спроектований таким чином, щоб мати можливість радіального переміщення.

Бак для електроліту складається із внутрішнього бака, виготовленого з титанового сплаву ОТ-4 і зовнішнього бака, виготовленого із сталі 12Х18Н10Т. Підігрів електроліту, що знаходиться у внутрішньому бакові, здійснюється трубчастими нагрівальними елементами ТЕН-100А 13/4 Р220, розміщеними у просторі між баками, що заповнений водою.

У зв'язку з тим, що хлористі електроліти залізнення є дуже агресивними, всі деталі і вузли експериментальної установки, що лежать нижче дзеркала електроліту, виконані з титанового сплаву або фторопласту.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

На рисунку 3.4 показана гільза СМД-60 циліндра дизельного двигуна, відновлена за технологією гальваноконтального осадження, а на рисунку 3.5, а збільшене зображення внутрішньої робочої поверхні гільзи до відновлення і після нього (рисунок 3.5, б).

Рисунок 3.4 – Зовнішній вид відновленої гільзи СМД-60

Рисунок 3.5 – Поверхня гільзи:
а – до відновлення; б – після відновлення

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

3.4 Методика проведення експериментальних досліджень

Шорсткість поверхні R_a і R_z , мкм, одержуваних покриттів визначалась на профілографі-профілометрі Mitutoyo SJ-201P.

Мікротвердість осаджених покриттів вимірювалася на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на піраміду 0,49 Н за методом відновленого відбитка, із застосуванням в якості наконечника алмазної чотиригранної піраміди з квадратною основою. Вимірювання проводили в 10 точках. Мікротвердість обчислювали як середньоарифметичне результатів окремих вимірювань. Виходячи з умов роботи гільз циліндрів і властивостей покриттів, проводилися дослідження впливу температури нагрівання на зміну мікротвердості покриття, що утворюється.

Зносостійкість покриттів визначалася на машині тертя МІ за схемою «ролик-колодка» в умовах сухого тертя ваговим методом у відповідності до ГОСТ 23.224 – 86.

Товщина покриття визначалася за допомогою кулонометричного товщиноміра Лімеда – ДЕМ за ГОСТ 9.302-88.

Визначення залишкових напружень в осадженому покритті визначалось методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-3,0 за методикою [63].

3.5 Математична обробка експериментальних даних

Похибка результатів експериментів оцінювалася методом визначення середньої квадратичної похибки [64].

Середня арифметична величина вимірювань \bar{y} визначалась за формулою:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (3.1)$$

де y_i – значення окремого результату вимірювань;

n – число вимірювань.

Відхилення результатів любого експерименту від середнього арифметичного (його похибка):

$$\Delta y_i = |y_i - \bar{y}|, \quad (3.2)$$

де y_i – результат окремого експерименту.

Квадратична похибка окремого експерименту

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n-1}}. \quad (3.3)$$

Грубі помилки при повторних експериментах визначались із використанням критерію Стьюдента

$$\frac{y_{i+1} - \bar{y}}{S} \geq t_T, \quad (3.4)$$

де y_{i+1} – значення сумнівного результату вимірювань;

\bar{y} – середнє арифметичне значення вимірювання, обчислене без урахування сумнівного результату;

S – середня квадратична помилка, обчислена без урахування сумнівного результату;

t_T – табличне значення критерію Стьюдента, що взяте при певній кількості експериментів та заданій імовірності.

Якщо обчислене значення критерію Стюдента виявлялося більше табличного, сумнівний результат не брався до уваги. Помилка середнього арифметичного розраховувалася за формулою:

$$\Delta S_{\bar{y}} = \frac{S}{n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (3.5)$$

Межі довірчих інтервалів при заданій імовірності і визначеній кількості експериментів «n» визначалися за формулою:

$$\Delta y = t_p \cdot \Delta S_{\bar{y}}. \quad (3.6)$$

Відносна помилка результатів експерименту визначалася із виразу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{\bar{y}} \cdot 100\%. \quad (3.7)$$

Кількість експериментів у кожній точці 3-5.

При проведенні досліджень застосовувалося математичне планування експерименту [64]. Статистичні обчислення проводилися з використанням регресійного аналізу. Для обрахунку результатів експериментів на ПЕОМ застосовувалася програма покрокової множинної регресії з пакету наукових підпрограм «Statistica» [64].

Рівномірність дисперсій перевірялась за критерієм Кохрена [64]. При цьому значущість коефіцієнтів регресії визначалася за критерієм Стюдента (t - критерій). Коефіцієнт вважався значущим, якщо виконувалась умова:

$$t_p > t_T, \quad (3.8)$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

де t_p – розрахункове значення t-критерію;

t_T – табличне значення t-критерію.

Табличне значення t-критерію перебувало з таблиці 14 [64] при рівні значущості $\alpha=0,05$ і числі ступенів вільності

$$f = (n - 1)N \quad (3.9)$$

де N – число точок плану в матриці планування;

n – число паралельних експериментів.

Однорідність дисперсій перевірялась за критерієм Кохрена [64].

Адекватність отриманої моделі перевірялася за критерієм Фішера (F- критерій) [64]. Модель вважалася адекватною, якщо виконувалася умова

$$F_p < F_T, \quad (3.10)$$

де F_T – табличне значення F - критерію.

Розрахункове значення F - критерію:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}. \quad (3.11)$$

Дисперсія адекватності

$$S_{ад} = \frac{n}{N - m} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2, \quad (3.12)$$

де N – число точок плану в матриці планування;

n – число паралельних експериментів;

m – число членів апроксимуючого поліному;

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

\bar{y}_j – середнє значення параметра оптимізації у точці плану;

\hat{y}_j – значення параметра оптимізації, розраховане за апроксимуючим поліномом.

Дисперсія відтворюваності:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (3.13)$$

де y_{ji} – значення і-го параметра оптимізації в j-ій точці плану;

N – число точок плану в матриці планування;

n – число паралельних експериментів.

Висновки до розділу 3

Таким чином, у даному розділі нами зроблено наступне.

1 Підібрано матеріали та робочі середовища для досліджень.

2 Запропоновано спосіб розмірного відновлення зношеної поверхні внутрішніх гільз циліндрів, що дозволяє усунути з циклу технологічного процесу попередню і фінішну механічну обробку, на технологічному оснащенні для методу ГКО. Воно дозволяє регулювати розподіл наповнювача в гальванічній матриці з метою отримання композитних покриттів на основі заліза із високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями.

3 Описано методику проведення експериментальних досліджень, зокрема, вимірювання шорсткості, мікротвердості, зносостійкості, товщини покриття, залишкових напружень.

4 Наведено методику математичної обробки експериментальних даних.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Продуктивність процесу гальваноконтактного осадження

З численних дослідних даних [56, 65, 66] відомо, що хлористі електроліти значно перевершують сірчаноокислі щодо продуктивності і стійкості процесу, товщини і гладкості одержуваних покриттів. Тому у ремонтних заводах і в цехах даний час застосовуються в основному хлористі електроліти.

По концентрації солі заліза в електроліті розрізняють 3 типи електролітів:

I тип – високо концентровані (600-680 г/л хлористого заліза);

II тип – середньо концентровані (400-450 г/л хлористого заліза);

III тип – мало концентровані (300-350 г/л хлористого заліза);

IV тип – дуже мало концентровані (200-250 г/л хлористого заліза).

Найбільш придатним для одержання твердих покриттів і в той же час простим за складом і надійним у роботі є мало концентрований електроліт (III тип), що витримав тривалу перевірку на ряді заводів. У зв'язку з цим, експерименти проводилися саме на цьому типі електроліту. Для вивчення впливу електролізу на продуктивність процесу застосовувалося математичне планування експерименту [64]. Характеристики плану експерименту вибиралися з умов отримання залізних покриттів зі стискаючими залишковими напруженнями. В якості незалежних змінних були обрані наступні параметри: щільність струму, i (А/дм²); температура електроліту, t (°С); тиск інструменту, p (МПа); швидкість головного руху, $V_{гл}$ (м/хв); швидкість допоміжного руху, $V_{дп}$ (хв⁻¹).

Інші фактори підтримувалися на постійному рівні. Основні характеристики плану експерименту представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики експерименту

Рівні факторів	i , А/дм ²	t , °С	p , МПа	$V_{гл}$, м/хв	$V_{дп}$, хв ⁻¹
Основний рівень	27	82	1,5	3	120

Інтервал варіювання	3	12	0,5	2,5	40
Верхній рівень	30	94	2,0	5,5	160
Нижній рівень	24	70	1,0	0,5	80

Кореляційний аналіз, проведений для визначення набору факторів, що входять у модель, представлений на рисунку 4.1.

На основі проведеного кореляційного аналізу можна стверджувати, що мультиколінеарність між вибраними предикторами процесу відсутня, а в модель, повинні бути включені щільність струму, тиск інструменту і швидкість допоміжного руху, реалізованого установкою. Тому було реалізовано повний факторний експеримент 2^3 .

В ході аналізу встановлено, що найкращим чином описує досліджуваний процес поліном першого ступеня з вільним членом, оскільки для нього коефіцієнт детермінованості має найбільше значення.

На основі проведеного дисперсійного аналізу, зроблено висновок, що модель досліджуваного процесу повинна містити вільний член, члени i та p .

Результати аналізу наведені нижче (рисунок 4.1).

В результаті покрокової множинної регресії із застосуванням пакету «Statistica» отримано рівняння, що описує залежність продуктивності процесу відносно досліджуваних факторів:

$$\mu = 1,05 + 0,196i - 0,01p. \quad (4.1)$$

У математичні статистиці [67] доводиться, що гіпотеза про незначущість коефіцієнта детермінації відхиляється, якщо між розрахунковим критерієм Фішера (F_p) і його табличним значенням (F_T) виконується умова:

Рисунок 4.1 – Результати аналізу продуктивності

$$F_p < F_T, \quad (4.2)$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

де $F_p = \frac{S_{ал}^2}{S^2\{y\}}$ – розрахункове значення F-критерію.

Перевірка адекватності обраної моделі проводилася за критерієм Фішера [64]. Встановлено, що рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів процесу за методом залізнення ГКО на продуктивність процесу.

Кореляційний аналіз дозволив виявити, що залежність продуктивності від досліджуваних факторів лінійна, а зв'язок між ними досить сильний – множинний коефіцієнт кореляції досягає значення 0,988.

Аналізуючи кореляційну матрицю, бачимо, що найбільше значення на продуктивність процесу має щільність струму (коефіцієнт кореляції 0,973). Менш значно впливає тиск інструменту (коефіцієнти кореляції -0,167).

Після перевірки значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента [64], з'ясувалося, що всі коефіцієнти регресії виявились значущими, т. я. обчислені значення критерію Стюдента виявились більше критичного $t_{кр}=2,57$ [64], а їх абсолютні значення виявились більше відповідних стандартних помилок.

Таким чином, рівняння, що описує залежність продуктивності процесу нанесення композитного покриття на основі залізної матриці, має вид, представлений формулою (4.1).

Аналіз впливу досліджуваних факторів на продуктивність процесу ГКО, показує, що зі збільшенням щільності струму відбувається зростання продуктивності і пояснюється це явище, мабуть, прискоренням росту кристалів покриття. Збільшення тиску інструменту призводить до зменшення продуктивності процесу і пояснюється, мабуть, впровадженням дрібнодисперсних частинок інструменту покриття, які перешкоджають зародженню кристалів осаду, а також збільшенням пластичної деформації покриття, що в кінцевому підсумку впливає на його товщину.

Вихід за струмом заліза знижується зі збільшенням тиску інструменту на відновлювану поверхню. Це свідчить про те, що при підвищенні тиску інструмент, крім переривання росту кристалів, сильніше деформує відновлюваний шар

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

електролітичного заліза, ущільнюючи його, і частково видаляє з поверхні осадження знов утворені центри кристалізації («зародки») і нещільно зчеплені дефектні кристалічні утворення. Зниження швидкості осадження залізних покриттів сповільнюється з підвищенням тиску інструменту на відновлювану поверхню, що вказує на деяку межу ущільнення відновленого шару заліза.

Найбільша продуктивність, що дорівнює 6,7 мкм/хв при нанесенні покриттів на чавун досягається при раціональних режимах (катодна щільність струму $i_K - 28$ А/дм², тиск інструмента на відновлювану поверхню 1,6 МПа, температура електроліту $t - 87^\circ\text{C}$, $V_{\text{гл}} - 4$ м/хв, $V_{\text{дп}} - 146$ хв⁻¹).

Експериментальні дані, отримані в ході практичної апробації технології, показують, що продуктивність процесу при відновленні деталей ГКО композитних покриттів на основі заліза не поступається швидкості осадження покриттів при стандартному процесі гальванічного залізнення.

4.2 Мікротвердість покриття

Мікротвердість покриттів має важливе значення, оскільки функціонально визначає їх зносостійкість. З літературних джерел [68] відомо, що вкорінення чужорідних включень у гальванічну матрицю дозволяє підвищити мікротвердість одержуваних композитних покриттів. Для оцінки спотворень кристалічної решітки покриття, одержуваної при впровадженні дисперсних частинок наповнювача, застосовувалася методика, описана в ряді робіт [69, 70, 71].

Як показала практика, введення в хлористий електроліт дрібнодисперсних частинок наповнювача має великий вплив на процес електрокристалізації і, відповідно, на спотворення кристалічної решітки. Із збільшенням їх концентрації спотворення решітки поступово ростуть, проходять через максимум при концентрації наповнювача 100 мг/см³, а потім падають, як показано на рисунку 4.2.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

Рисунок 4.2 – Вплив концентрації наповнювача у гальванічній матриці на спотворення кристалічної ґратки

Наявність максимумів спотворень решітки осаджуваного покриття при однаковій концентрації складових електроліту дає підставу вважати, що ці спотворення виникають у процесі електрокристалізації, а на характер їх зміни впливає концентрація дисперсного наповнювача композитного покриття. Іншими словами, спотворення кристалічної решітки знаходяться в прямій залежності від концентрації дисперсного наповнювача. Отримані результати добре узгоджуються і з загальноприйнятою теорією електрокристалізації [72]. Розряд іонів, як відомо, відбувається на невеликих активних ділянках кристалів. При цьому двовимірні зародки, які є основою майбутніх граней, можуть утворюватися лише при певному перенапруженні, в іншому разі, вони є нестійкими і розпадаються. Для утворення зародків потрібна деяка енергія активації.

Чим більше катодна поляризація, що й має місце в процесі гальваноконтактного осадження (ГКО) заліза завдяки наявності механічної активації поверхні катода інструментом, тим більше в одиницю часу утворюється центрів кристалізації, тим більш дисперсним виходить електролітичний осад і з великими спотвореннями кристалічної решітки.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Для вивчення впливу електролізу на мікротвердість одержуваних покриттів застосовувалося математичне планування експерименту [64]. Був реалізований повний факторний експеримент 2^3 . Характеристики плану експерименту вибиралися з умов одержання композитних залізних покриттів з максимальною твердістю (концентрація дисперсного наповнювача в покритті склала 100 мг/см^3) і раціональною продуктивністю. В результаті межі варіювання незалежних змінних були обрані наступні:

- щільність струму i , А/дм^2 , 24...30;
- температура електроліту, t , $^\circ\text{C}$, 70...90;
- тиск інструменту, p , МПа , 1...2;
- швидкість головного руху, $V_{\text{гл}}$, м/хв , 0,5...5,5;
- швидкість допоміжного руху $V_{\text{дп}}$, хв^{-1} , 80...160.

У якості залежної змінної було взято мікротвердість покриттів (H_μ , МПа).

Результати аналізу наведені на рисунку 4.3. Дослідження проводилися методом регресійного аналізу, для чого на підставі експериментальних даних була побудована матриця планування, що містить залежну і незалежні змінні. Однією з умов цього методу є припущення про функціональну незалежність варійованих змінних. Для оцінки цього положення проводився кореляційний аналіз, результати якого представлені на рисунку 4.3. На підставі аналізу матриці коефіцієнтів парної кореляції, можна зробити висновок про необхідність включення в модель таких факторів досліджуваного процесу, як щільність струму, температура робочого середовища, тиск інструмента на поверхню. Інші фактори процесу виявилися незначущі.

Наступним етапом роботи є підбір математичної моделі, що найбільш точно описує досліджуваний процес.

Аналізуючи обчислення, встановлено, що найкращим чином описує досліджуваний процес поліном першого ступеня з вільним членом, т. я. для нього коефіцієнт детермінованості має найбільше значення.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

Рисунок 4.3 – Результати аналізу мікротвердості

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

На підставі проведеного дисперсійного аналізу зроблено висновок, що модель досліджуваного процесу повинна містити вільний член, члени i , t , p .

Перевірка адекватності обраної моделі за критерієм Фішера показала, що рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів процесу ГКО на мікротвердість отриманих покриттів.

В результаті покрокової множинної регресії із застосуванням пакету «Statistica» отримано рівняння, що описує залежність мікротвердості відносно досліджуваних факторів:

$$H_{\mu} = 6709,83 + 100i - 15,983t + 155,16p. \quad (4.3)$$

Аналіз дозволив виявити, що залежність мікротвердості від досліджуваних факторів суттєва – множинний коефіцієнт кореляції досягає значення 0,999.

Аналізуючи кореляційну матрицю бачимо, що найбільше значення на мікротвердість має щільність струму (коефіцієнт кореляції 0,863). Менш значно впливають на мікротвердість температура електроліту (коефіцієнт кореляції - 0,459) і тиск інструменту (коефіцієнт кореляції 0,223).

Після перевірки значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента [64], з'ясувалося, що всі коефіцієнти регресії виявились значущими, т. к. обчислені значення критерію Стюдента виявились більше критичного $t_{кр}=2,776$ [64], а їх абсолютні значення виявились більше відповідних стандартних помилок.

Таким чином, рівняння, що описує залежність мікротвердості композитного покриття на основі заліза, має вигляд представлений формулою (4.3).

З аналізу впливу досліджуваних факторів на мікротвердість покриттів слідує, що зі збільшенням температури електроліту мікротвердість покриттів зменшується, що добре узгоджується з характером впливу температури електроліту на мікротвердість, як при звичайному залізненні, так і при гальваноконтактному методі осадження композитних залізних покриттів і пояснюється, мабуть, збільшенням пластичності заліза із підвищенням

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

температури електроліту. Як показала практика, найбільш раціональною щільністю струму для отримання якісних композитів на основі залізної матриці, є значення 28 А/дм², так як дозволяє осаджувати покриття з найкращою якістю. Подальше збільшення щільності струму, трохи збільшує швидкість осадження покриттів, дає значне погіршення їх якості. У зв'язку з цим, просторовий відгук регресійної моделі представлений на рисунку 4.4 побудований для щільності струму 28 А/дм².

Рисунок 4.4 – Відгук регресійної моделі при $i=28$ А/дм²

На рисунку 4.5 показана номограма для визначення режимних параметрів обробки з метою одержання композитних покриттів на основі заліза заданої мікротвердості.

Збільшення щільності струму призводить до збільшення мікротвердості отримуваних композитних покриттів на основі заліза і пояснюється, мабуть, екстремальним характером залежності мікротвердості від щільності струму, коли максимальна мікротвердість спостерігається при певній щільності струму.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

Рисунок 4.5 – Мікротвердість, МПа, композитних залізних покриттів при $i=28 \text{ А/дм}^2$

Величина тиску інструменту в досліджуваному діапазоні впливає на величину мікротвердості одержуваних покриттів прямо пропорційно.

Мікротвердість композитних покриттів ГКО, відповідає значенням 8300-8700 МПа, а мікротвердість покриттів, отриманих традиційним залізненням 6500-6700 МПа. Таким чином, експериментально доведено, що технологія ГКО дозволяє перевершити мікротвердість залізних покриттів, отриманих за стандартною технологією без погіршення їх інших фізико-механічних властивостей, що дозволяє прогнозувати досить високу їх зносостійкість.

З аналізу літературних джерел [73] відомо, що подальше нагрівання покриттів електролітичного заліза чинить великий вплив на фізико-механічні властивості покриттів, зокрема, зниження їх мікротвердості, що для покриття гільз двигунів

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

внутрішнього згорання має важливе значення. Враховуючи цей фактор, а також умови роботи гільз, було проведено дослідження залежності мікротвердості покриттів від температурних умов експлуатації. Порівнювалися три процесу: стандартного залізнення, гальваномеханічного осадження заліза (ГМО) та ГКО композитних покриттів на основі заліза. Дані проведеного дослідження представлені на рисунку 4.6.

Рисунок 4.6 – Вплив температури на мікротвердість залізних покриттів

Аналізуючи графік, видно, що покриття, обложені за стандартною технологією і технологією ГМО, у початковий період підвищення температури збільшують мікротвердість на 4%, яка досягає максимуму при температурі 300°C.

Багато авторів [73] пояснюють цей факт наявністю спотворення кристалічної решітки матеріалу, викликаного температурним нагріванням. Спосіб ГКО в силу своєї сутності, заснований на спотворенні кристалічної решітки матеріалу покриття в процесі його осадження, тому покриття, обложені цим методом не схильні до ефекту зміни мікротвердості в температурному режимі до 300°C, яка

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

при нагріванні нижче цієї температури залишається постійною. Подальше підвищення температури знижує мікротвердість у всіх видів покриттів, однак, осадки, отримані методом гальваноконтактного осадження, залишаються весь час за період випробувань на рівні більш високої мікротвердості і мають більш низьку швидкість її зниження. Така тенденція залежності мікротвердості від температури спостерігається до 600°C у стандартних покриттів і покриттів, отриманих способом ГМО і до 700°C для покриттів отриманих ГКО. При перевищенні цієї температури відбувається різке зниження мікротвердості покриттів всіх типів, і вже при температурі 900°C мікротвердість стандартного покриття та покриття, отриманого способом ГМО становить 1100-1200 МПа, тоді як покриття, отримані ГКО зберігають мікротвердість на рівні 4000 МПа.

4.3 Залишкові напруження у покритті

Електролітичні покриття, завдяки наявності в них значних залишкових внутрішніх напружень, володіють підвищеною твердістю. При цьому рядом авторів [74] встановлено, що внутрішні напруження можуть значно змінюватися в залежності від режиму електролізу. Якщо внутрішні напруження досягають досить значної величини, то це негативно позначається на якості електролітичного покриття: осад може розтріскуватися, спучуватися і навіть відшаровуватися. Тому для ремонтних цілей особливий інтерес представляє вивчення змін залишкових внутрішніх напружень залізних покриттів залежно від умов електролізу. Це питання цікаве головним чином ще й тому, що від знаку і величини цих напружень багато в чому залежать механічні властивості покриттів (твердість, втомна міцність, зносостійкість тощо). Дослідним шляхом встановлено, що найкращими фізико-механічними і, як наслідок, експлуатаційними властивостями, володіють залізні покриття зі стискаючими залишковими напруженнями від 30 до 150 МПа [75].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

Для вивчення впливу електролізу на залишкові напруження одержуваних покриттів застосовувалося математичне планування експерименту [64]. В нашому разі досліджувалися зразки, що пройшли відновлення залізненням методом ГКО з товщиною покриття 100...700 мкм. Був реалізований повний факторний експеримент 2^3 . Характеристики плану експерименту вибиралися з умов одержання залізних композитних покриттів зі стискаючими залишковими напруженнями, мінімальною мікротвердістю, здатною забезпечити їх нормальну експлуатацію. В результаті межі варіювання незалежних змінних були обрані наступні:

- щільність струму i , А/дм², 24...30;
- температура електроліту, t , °С, 70...90;
- тиск інструменту, p , МПа, 1...2;
- швидкість головного руху, $V_{\text{гл}}$, м/хв, 0,5...5,5;
- швидкість допоміжного руху $V_{\text{дп}}$, хв⁻¹, 80...160;
- товщина покриття, δ , мкм 100...700.

У якості залежної змінної прийняті залишкові напруження в покритті (σ , МПа). Результати аналізу наведено на рисунку 4.7.

Дослідження проводилися методом регресійного аналізу, для чого на підставі експериментальних даних була побудована матриця планування, що містить залежну і незалежні змінні. Однією з умов цього методу є припущення про функціональну незалежність варійованих змінних. Для оцінки цього положення проводився кореляційний аналіз.

Однією з умов регресійної моделі є припущення про функціональну незалежність пояснюючих змінних. Зв'язок між чинниками, мультиколінеарність, робить обчислення параметрів моделі або неможливим, або утруднює змістовну інтерпретацію параметрів моделі. Враховуючи вищевикладене, на підставі аналізу матриці коефіцієнтів парної кореляції, можна зробити висновок про необхідність включення в модель таких факторів досліджуваного процесу, як щільність струму,

температура робочого середовища, тиск інструмента на поверхню. Інші фактори процесу виявились незначущими або мультиколінеарними.

Рисунок 4.7 – Результати аналізу залишкових напружень

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

Наступним етапом роботи є підбір математичної моделі, що найбільш точно описує досліджуваний процес.

Перевіряється кілька типів моделі. Аналізуючи проведені обчислення видно, що найкращим чином описує досліджуваний процес лінійна модель з вільним членом, оскільки для неї коефіцієнт детермінованості має найбільше значення.

Перевірка адекватності обраної моделі проводилася за критерієм Фішера [64]. Модель вважалася адекватною, якщо $F_p > F_T$. Це умова виконується, отже, рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів процесу ГКО на залишкові напруження в одержуваних покриттях.

Подальшим етапом стало проведення регресійного аналізу. В результаті розрахунку покрокової множинної регресії із застосуванням пакету наукових підпрограм «Statistica» отримано рівняння, що описує залежність залишкових напружень в покритті від досліджуваних факторів:

$$\sigma = -159,321 + 2,33i - 0,555t - 9,042p. \quad (4.4)$$

Аналіз дозволив виявити, що залежність залишкових напружень у покритті від досліджуваних факторів лінійна, а зв'язок між ними суттєвий – множинний коефіцієнт кореляції досягає значення 0,999.

Перевірка адекватності обраної моделі за критерієм Фішера показала, що рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів процесу залізнення способом ГКО на залишкові напруження в одержуваних покриттях.

Аналізуючи кореляційну матрицю, бачимо, що найбільше значення на залишкові напруження в покритті надає щільність струму (коефіцієнт кореляції 0,697). Менш значно впливають температура електроліту і тиск інструменту (коефіцієнти кореляції відповідно -0,555 і -0,451).

Після перевірки значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента [64], з'ясувалося, що всі коефіцієнти регресії виявились значущими, т. я. обчислені значення критерію Стюдента виявились більше критичного $t_{кр} = 2,776$ [64].

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

При аналізі впливу досліджуваних факторів на залишкові напруження в композитних покриттях на основі заліза з повного рівняння регресії виходить, що збільшення щільності струму веде до зменшення залишкових стискаючих напружень за абсолютною величиною, що узгоджується з теоретичними та експериментальними дослідженнями, викладеними в [75]. Графічна інтерпретація залежності залишкових напружень від температури і щільності електроліту струму показана на рисунку 4.8, а в залежності від температури електроліту і тиску інструменту на рисунку 4.9.

Зростання тиску інструмента на оброблювану поверхню веде до збільшення стискаючих залишкових напружень у покритті. Це, мабуть, пояснюється тим, що при збільшенні тиску глибина деформації елементарного шару збільшується, а, отже, збільшується загальна ступінь деформації осаду, що росте. Крім цього необхідно врахувати вкорінення чужорідних включень при створенні композиту. При збільшенні тиску концентрація наповнювача в матриці зростає, отже, зростає кількість додаткових центрів створення наклепу осаджуваного матеріалу, який підсумовуючись, збільшує стискаючі залишкові напруження.

Рисунок 4.8 – Залишкові напруження у відновленому шарі композитного покриття на основі заліза залежно від температури електроліту та щільності струму

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

Рисунок 4.9 – Залишкові напруження у відновленому шарі композитного покриття на основі заліза залежно від температури електроліту та тиску інструменту

З ростом температури електроліту спостерігається наступна залежність: зі збільшенням температури швидкість осадження зменшується, отже, зменшується товщина елементарного шару, що при незмінному зусиллі деформування призведе до більшого пластичного деформування кожного елементарного шару, що і викликає виникнення великих результуючих залишкових напружень стиску у покритті. Крім того, цей процес може посилюватися за рахунок того, що із збільшенням температури зростає пластичність осаджуваних покриттів. Як показала практика, нескінченно збільшувати тиск інструменту для отримання стискаючих залишкових напружень не можна: це призводить до надлишкового зміцнення покриття і його відшарування. Максимальним тиском слід визнати 1,8...2,0 МПа.

Дослідження розподілу залишкових напружень у покритті залежно від його товщини проводили на дифрактометрі «Дрон-3» методом рентгеноструктурного аналізу. Результат представлений на рисунку 4.10.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

Рисунок 4.10 – Графічне зображення рентгенограми залишкових напружень

Як видно із рисунка 4.10, на усій товщині покриття спосіб ГКО дозволяє отримувати композитні покриття зі стискаючими залишковими напруженнями.

4.4 Шорсткість поверхні відновленого шару

Нанесення залізного покриття на чавунні деталі за традиційною технологією дає дуже нерівне покриття через те, що на поверхні осадження починають рости дендрити, а також накопичується газоподібний водень, пухирці якого екранують катод від іонів металу (рисунок 4.11).

Механічна дія інструментом, що вигладжує, на зростаючі шари покриття, характерна для способу ГКО, дозволяє зчищати дендрити та пухирці водню із поверхні, забезпечуючи рівномірність осадження та зменшуючи шорсткість відновленого шару (рисунок 4.12).

Для вивчення впливу електролізу на шорсткість відновленої поверхні застосовувалося математичне планування експерименту [64]. Був реалізований повний факторний експеримент. Характеристики плану експерименту вибиралися

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

із умови одержання композитних залізних покриттів з максимальною твердістю і раціональною продуктивністю.

Рисунок 4.11 – Загальний вид експериментального зразка $\varnothing 40$ мм, що відновлений залізненням без механічної дії ($R_z > 800$ мкм)

Рисунок 4.12 – Загальний вид експериментального зразка $\varnothing 40$ мм, що відновлений залізненням із механічною дією ($R_z = 0,6 \dots 0,8$ мкм)

В результаті області варіювання незалежних змінних були обрані наступні:

- щільність струму i , А/дм², 24...30;
- температура електроліту, t , °С, 70...90;

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		100

- тиск інструменту, Р, МПа, 1...2;
- швидкість головного руху, $V_{гл}$, м/хв, 0,5...5,5;
- швидкість допоміжного руху $V_{дп}$, $хв^{-1}$, 80...160.

У якості залежної змінної була взята шорсткість відновленого шару (R_a , мкм).

Результати аналізу наведено на рисунку 4.13.

Рисунок 4.13 – Результати аналізу шорсткості

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

Дослідження проводилися методом регресійного аналізу, для чого на підставі експериментальних даних була побудована матриця планування, що містить залежну і незалежні змінні. Однією з умов цього методу є припущення про функціональну незалежність варійованих змінних. Для оцінки цього положення проводився кореляційний аналіз.

На підставі аналізу матриці коефіцієнтів парної кореляції, можна зробити висновок про необхідність включення в модель таких факторів досліджуваного процесу, як щільність струму, швидкість головного і допоміжного руху, що реалізуються при процесі нанесення композитних покриттів. Інші чинники процесу виявилися не значущі.

Наступним етапом роботи є підбір математичної моделі, що найбільш точно описує досліджуваний процес.

Аналізуючи обчислення, встановлено, що найкращим чином описує досліджуваний процес поліном першого ступеня з вільним членом, оскільки для нього коефіцієнт детермінованості має найбільше значення.

На основі проведеного дисперсійного аналізу, зроблено висновок, що модель досліджуваного процесу повинна містити вільний член, члени щільності струму, швидкості головного і допоміжного руху.

Перевірка адекватності обраної моделі проводилася за критерієм Фішера [64]. Виявлено, що рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів процесу ГКО на шорсткість поверхні отримуваних покриттів.

Подальшим етапом стало проведення регресійного аналізу. В результаті розрахунку покрокової множинної регресії з застосуванням пакету наукових підпрограм «Statistica» отримано рівняння, що описує залежність шорсткості від досліджуваних факторів

$$R_a = 0,108 + 0,002i - 0,004V_{\text{гол}} - 0,0001V_{\text{доп}} \quad (4.5)$$

Аналіз дозволив виявити, що залежність шорсткості від досліджуваних факторів суттєва – множинний коефіцієнт кореляції досягає значення 0,918.

Перевірка адекватності обраної моделі за критерієм Фішера показала, що рівняння регресії адекватно описує вплив основних факторів процесу ГКО на шорсткість одержуваних покриттів.

Аналізуючи кореляційну матрицю, бачимо, що найбільше значення на досліджуваній параметр має швидкість головного руху на установці (коефіцієнт кореляції -0,724). Менш значно впливають на шорсткість поверхні щільність струму і швидкість допоміжного руху, реалізованого установкою (коефіцієнти кореляції відповідно 0,460 і -0,329).

Після перевірки значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента [64], з'ясувалося, що всі коефіцієнти регресії виявились значущими, т. к. обчислені значення критерію Стюдента виявились більше критичного $t_{кр}=2,776$ [64], а їх абсолютні значення виявились більше відповідних стандартних помилок.

Таким чином, рівняння, що описує залежність досліджуваного параметра композитного покриття на основі заліза від обраних предикторів, має вигляд, представлений виразом (4.5).

Аналіз отриманого регресійного рівняння дозволяє говорити, що збільшення щільності струму веде до збільшення шорсткості відновленої поверхні. Це пов'язано з тим, що при високій щільності струму в покритті починає переважати ниткоподібний або голчастий тип кристалів, а на відновлюваній поверхні починають активно утворюватися дендрити, і шорсткість її зростає, незважаючи на механічний вплив інструменту. На рисунку 4.14 представлена візуалізація регресійного відгуку моделі.

На рисунку 4.15 показана номограма для визначення шорсткості покриття в залежно від режимних параметрів осадження.

Підвищення швидкостей головного і допоміжного руху, реалізованих установкою ГКО веде до зниження шорсткості композитних покриттів. Це пояснюється тим, що інструмент при більш високих значеннях цих параметрів за

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

однаковий проміжок часу обробляє більшу площу відновлюваної поверхні, більш активно впливаючи на зростаючий шар покриття, що веде до більш інтенсивного видалення дендритів.

Рисунок 4.14 – Візуалізація відгуку регресійної моделі при $i = 28 \text{ А / дм}^2$

Рисунок 4.15 – Шорсткість (мкм) поверхні відновленого шару
при $i = 28 \text{ А / дм}^2$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

Збільшення тиску інструменту також знижує наводнення покриття, однак його не можна збільшувати до нескінченності, оскільки, як показала практика, при перевищенні значення 2 МПа відбувається надлишкове зміцнення композитного покриття, що викликає його розтріскування і відшарування від основи.

4.5 Дослідження зносостійкості

Основним показником, що характеризує доцільність застосування тих чи інших способів ремонту, є зносостійкість відновлених ними деталей машин. Тому зрозумілий великий інтерес до вивчення зносостійкості покриттів, що застосовуються в ремонтному виробництві. Абразивне зношування є одним з найбільш поширених видів зношування деталей машин, при якому поступова зміна розмірів деталі від тертя відбувається в результаті ріжучого або дряпаючої дії твердих часток, що стикаються з поверхнею тертя.

Для дослідження характеристики зносостійкості композитних гальванічних покриттів на основі заліза в умовах сухого тертя, близьких до схоплення, були проведені спеціальні дослідження по зношуванню зразків із сталі 45 ТВЧ діаметром 46 мм на машині МІ при 440 об/хв, покритих композитним електролітичним залізом та такими, що пройшли стандартне залізнення. Тертя здійснювалося по чавуну при навантаженні 0,7 МПа і швидкості ковзання 1,06 м/сек. Знос визначався по втраті ваги зразків (з точністю до 0,0002 г) через кожні 500 м шляху тертя. При випробуванні зразків, покритих стандартним електролітичним залізом, вже через 60-120 м шляху тертя відбувалося задирання тертьових поверхонь і починався катастрофічний знос, як ролика, так і букси. На поверхні композитних гальванічних покриттів, на основі заліза при терті утворювався (в більшості випадків) або бурий чорний наліт у вигляді плівки продуктів зносу композитних включень в покриття. Плівка окислів, будучи своєрідною мастилом, захищала поверхню тертя від задирання.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

При роботі зразків, виготовлених зі сталі 20, цементованих і загартованих, і зразків, покритих композитним покриттям на основі заліза, знос букс в парі з цементованими зразками був інтенсивніше, ніж в парі зі зразками, покритими композитним покриттям.

З цементованих зразків до кінця випробування працювала лише половина. Випробування другої половини зразків припинялося через виникнення задирання. При цьому на роликах спостерігалось налипання металу, про що можна було судити по збільшенню ваги роликів і за плямами налиплого металу, видимих під мікроскопом. Чавунні букси в парі з цими роликами катастрофічно зношувались. При випробуванні зразків з композитним покриттям на основі заліза такого ефекту не спостерігалось.

Порівняльні випробування на зношування чавунних гільз і гільз з композитним гальванічним покриттям на основі заліза, виконані на одноциліндровому чотиритактному двигуні, показали високу зносостійкість гільз, відновлених композитним залізом. Для нормальних режимів двигуна (температура охолоджуючої рідини 70-80°C, дизельне паливо з вмістом сірки до 1%) швидкість зношування відновленої гільзи була в 2-4 рази менше, ніж чавунної. Ці результати встановлюють доцільність і ефективність застосування композитних гальванічних покриттів на основі заліза для відновлення робочих поверхонь гільз циліндрів двигунів.

Сприятливими факторами, які зумовлюють високу зносостійкість композитних гальванічних покриттів на основі заліза, є висока твердість заліза, волокниста структура з внутрішніми напруженнями стиску, властива композитним гальванічним покриттям на основі заліза, підвищена схильність залізних покриттів до утворення на їх поверхні окисних плівок, грають роль мастила. Однак, слід зауважити, що зносостійкість не знаходиться в прямій залежності від твердості осаду, так як із збільшенням останньої покриття набувають підвищену крихкість, яка сприяє більш легкому диспергуванню дрібних частинок з поверхні тертя, у зв'язку з чим знос може збільшуватися.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		106

У ході досліджень була проведена робота з оцінки зносостійкості різних зразків. Дослідження проводилися при тиску 2,5 МПа за час при якому відбувалося 2000 оборотів валу машини. Результати представлені на рисунку 4.16.

Рисунок 4.16 – Порівняльна зносостійкість різних матеріалів

Видно, що гальванічні композитні покриття по зносостійкості перевершують матеріали, застосовувані для відновлення гільз циліндрів дизельних двигунів, зокрема на 25% стандартне електролітичне залізо і на 30% серійні гільзи.

Порівняльні випробування на зносостійкість гільз з різною висотою шорсткості, відновлених композитним покриттям, дозволив виявити залежність зносу від R_z (рисунок 4.17), яка має оптимум при 0,5... 0,7 мкм.

Лабораторні випробування на зносостійкість показали, що зразки після ГКО на початковому етапі експлуатації мають більший знос припрацьовування (рисунок 4.18). У той же час кут нахилу δ прямолінійного ділянки кривої зносу у них менше, ніж після абразивного хонінгування. Якщо прийняти час роботи двигуна до ремонту 4000 год., то знос дзеркала гільзи відновленої ГКО вийде менше на 24...26% зносу дзеркала після абразивного хонінгування $A_2 < A_1$ (рисунок 4.19).

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		107

Рисунок 4.17 – Залежність зносу зразків від початкової шорсткості

Рисунок 4.18 – Залежність зносу зразків від способу обробки поверхні після 25 годин випробувань: 1 – абразивне хонінгування; 2 – ГКО

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

Рисунок 4.19 – Залежність зносу зразків від способу обробки поверхні після 4000 годин випробувань: 1 – абразивне хонінгування; 2 – ГКО

4.6 Вибір раціональних режимів осадження покриття

При виборі раціональних режимів гальваноконтального нанесення композитних залізних покриттів були поставлені наступні граничні умови:

- для швидкості осадження композитних покриттів $5 < \mu < 7$;
- для мікротвердості $8400 < H_{\mu} < 8700$;
- для залишкових напружень $-150 < \sigma < -50$.

За вищенаведеними рівняннями були розраховані значення всіх перерахованих параметрів.

Швидкість нанесення композитних покриттів може досягати 6,7 мкм/хв при режимах: катодна щільність струму 28 А/дм², тиск інструмента на відновлювану поверхню $P = 1,6$ МПа. Однак значення інших контрольованих параметрів при цьому не будуть задовольняти заданим граничним умовам.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		109

Мікротвердість відновленого шару 8700 МПа може бути досягнута при режимах: катодна щільність струму 30 А/дм², температурі електроліту 70°С, тиск інструмента на відновлювану поверхню 2 МПа. Однак значення інших контрольованих параметрів при цьому не будуть задовольняти заданим граничним умовам.

Залишкові напруження у відновленому шарі -137 МПа можуть бути досягнуті при режимах: катодна щільність струму 30 А/дм², тиск інструменту на відновлювану поверхню 1 МПа, температура електроліту 70°С. Однак значення інших контрольованих параметрів при цьому не будуть задовольняти заданим граничним умовам.

Для пошуку раціональних режимів обробки, що задовольняють заданим граничним умовам у програмному комплексі MathCAD була вирішена задача оптимізації, результати якої представлені на рисунку 4.20.

Рисунок 4.20 – Пошук раціональних режимів

В цілому, в якості раціональних, можна виділити наступний інтервал режимів осадження композитних залізних покриттів: катодна щільність струму 26...28 А/дм², тиск інструмента на відновлювану поверхню

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

$p = 1,0-1,5$ МПа, температура електроліту $65-70^{\circ}\text{C}$, швидкість головного руху $3,5-4,5$ м/хв, швидкість допоміжного руху $100-120$ хв⁻¹. Ці режимні параметри обробки відповідають заданим граничним умовам.

Висновки до розділу 4

1 На продуктивність процесу ГКО композитних покриттів на основі заліза в досліджуваному діапазоні режимних параметрів впливають щільність струму і тиск інструменту і практично не впливає температура електроліту. Швидкість осадження покриттів при методі ГКО склала $6,7$ мкм/хв., що не поступається швидкості осадження залізних покриттів стандартними гальванічними методами.

2 Виявлено, що на мікротвердість композитних покриттів в порядку зменшення впливають щільність струму, температура електроліту і тиск інструменту. Експериментально отримано та підтверджено виробничою практикою отримання композитних покриттів на основі заліза з мікротвердістю $8300-8700$ МПа проти $6500-6700$ МПа у покриттів, отриманих за стандартною технологією. Доведено, що нагрів деталей понад 300°C веде до зниження мікротвердості залізних покриттів, однак для покриттів, отриманих методом ГКО цей ефект менш виражений.

3 На залишкові напруження крім щільності струму, температури електроліту і тиску інструменту впливає і товщина покриття. Метод ГКО дозволяє отримувати в покриттях товщиною від 100 до 700 мкм стискаючі залишкові напруження величиною до 137 МПа, що недосяжно іншими відомими технологічними прийомами. Стандартна технологія передбачає отримання в залізних покриттях товщиною до 700 мкм, стискаючих залишкових напружень тільки методом подальшого поверхнево-пластичного деформування покриття, але при цьому собівартість деталі зростає на $23-30\%$ [8].

4 На шорсткість композитних покриттів на основі залізної матриці в порядку зменшення впливають щільність струму, обертання і зворотно-поступальний рух

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		111

інструмента в процесі осадження покриття. Значення шорсткості покриттів, отриманих методом ГКО відповідають $R_a = 0,12 - 0,16$ мкм без механічної обробки покриття.

5 Гальванічні композитні покриття по зносостійкості перевершують матеріали, застосовувані для відновлення гільз циліндрів дизельних двигунів, зокрема на 25% стандартне електролітичне залізо і на 30% серійні гільзи.

6 На основі отриманих регресійних моделей, що дозволяють прогнозувати отримання в покриттях заданих фізико-механічних і, як наслідок, експлуатаційних характеристик, розраховано раціональні режими осадження гальванічних композитних покриттів на основі заліза.

7 Побудовано тривимірні моделі, що дозволяють якісно оцінити вплив режимних параметрів на властивості покриттів, на основі яких розраховані і представлені в графічному вигляді зручному для технологічних розрахунків номограми, що дозволяють у виробничих умовах, не вдаючись до складних математичних обчислень призначити режими осадження покриттів для отримання їх заданої якості.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		112

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект, зумовлений зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

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

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

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

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

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 20$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 150000$ грн. (за даними підприємства).

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості та витрат на виготовлення вузлів кріплення:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 60000 = 6000 \text{ грн. / т,}$$

де 60000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час осадження:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (5.2)$$

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		113

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,
 $\Delta Ц' = 60$ грн./т;

$$\Delta Ц = 60 \text{ (грн./т)}.$$

Відповідно до формули (5.1) маємо наступне:

$$E = (6000 + 60) \cdot 20 - (0,15 + 0,1) \cdot 150000 = 83700 \text{ (грн.)}.$$

Отже, економічний ефект від впровадження гальваноконтатного осадження склав 83700 грн. на рік.

5.2 Техніка безпеки під час виконання гальванічних робіт

Під час обслуговування джерел постійного струму і струмонесучих елементів установки слід керуватися правилами техніки безпеки, встановленими для гальванічних цехів. Заборонено палити та приймати їжу в приміщенні, де знаходиться установка. Під час роботи двері установки повинні бути зачинені. Категорично заборонено знаходитись всередині працюючої установки, так як робоча зона знаходиться під напругою.

Хімічну обробку деталей необхідно проводити у гальванічному цеху або у спеціальній майстерні при суворому дотриманні правил техніки безпеки, маючи на увазі, що цей процес є шкідливий.

В гальванічному відділенні у робочих за тривалої роботи, недотриманні техніки безпеки та нехтуванні особистим захистом можуть виникнути шкіряні захворювання, важко виліковні екземи, дерматити від потрапляння пилу при знежиренні, хромуванні, нікелюванні, оксидуванні та залізненні.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		114

Однією з основних умов під час проектування будівель цехів є виконання вимог техніки безпеки та охорони праці, а також пожежної безпеки. Шкідливі для здоров'я відділення повинні бути розташовані ізольовано.

Катодний захист за допомогою протектору забезпечується при вірному виконанні зазвичай без суттєвих технічних витрат. Одного разу змонтована система захисту працює без обслуговування. Вона потребує лише епізодичного контролю потенціалу. Системи захисту з протекторами (гальванічними анодами) незалежні від мережі енергоспоживання та внаслідок низької напруги не створюють перешкод для об'єктів, що знаходяться поруч. Внаслідок малого значення напруг зазвичай не виникає проблем і з технікою безпеки електрообладнання. Системи з протекторами тому можливо розташовувати на вибухонебезпечних ділянках. Для захисту від ґрунтової корозії протектори можуть бути розміщені впритул до об'єкту захисту. Отже, не потрібно ніяких додаткових земляних робіт.

5.3 Зберігання та захоронення екологічно небезпечних речовин

Зберігання екологічно небезпечних речовин та відходів полягає у їх утриманні в об'єктах різних відходів з метою подальшого захоронення, знезараження чи використання. Порушення правил зберігання радіоактивних, бактеріологічних та хімічних речовин та відходів може виражатися, наприклад, в утриманні відходів поза об'єктами їх розміщення.

Захоронення екологічно небезпечних речовин та відходів являє собою ізоляцію відходів, які не підлягають подальшому використанню, у спеціальних сховищах із метою запобігання потрапляння шкідливих речовин до навколишнього середовища.

Місце і спосіб зберігання токсичних відходів повинні гарантувати:

- відсутність впливу відходу, що розташовується, на довкілля;
- виключення ризику виникнення небезпеки для здоров'я людей;

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		115

- недоступність для сторонніх осіб високотоксичних відходів, що зберігаються;
- запобігання втрати відходом властивостей вторинної сировини внаслідок невірного збирання або зберігання;
- мінімізація ризику спалахування відходу;
- недопущення засмічення території;
- забезпечення зручності проведення інвентаризації відходів та контролю за поведженням із відходами;
- забезпечення зручності вивезення відходів з місць їх зберігання.

Висновки до розділу 5

Розглянуто економічну ефективність від упровадження результатів досліджень. Визначено особливості безпечного виконання гальванічних робіт. Приділено увагу питанням захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		116

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1 Комбінований спосіб відновлення деталей, що полягає у спільному гальванічному осадженні заліза на зношену поверхню і пружно-пластичного деформування кожного шару покриття, що наноситься з одночасним введенням в нього дрібнодисперсного карбїду титану становить науковий і практичний інтерес. Запропоновані установка та інструмент для отримання якісних гальванічних композитних покриттів на внутрішніх циліндричних поверхнях, особливістю яких є те, що притискна поверхня виконана у вигляді сегментів, що мають можливість вільного переміщення відносно базової осі.

2 Запропоновано спосіб і пристрій для відновлення гільз двигуна внутрішнього згоряння нанесенням гальванічного композитного покриття на основі заліза, що виключають операції попередньої і остаточної обробки, забезпечують необхідну зносостійкість поверхневого шару, адгезію до основи, стійкість покриття до зносу при підвищенні робочої температури поверхневого шару. Отримані: математична модель формування композитних покриттів на основі заліза зі стискаючими залишковими напруженнями, що досягаються контрольованим впровадженням дисперсного наповнювача в гальванічну матрицю; закономірності осадження композитного покриття, що дозволяють одержувати покриття з наперед заданими фізико-механічними властивостями.

3 Експериментальні дослідження підтвердили коректність теоретичних положень. Отримані регресійні моделі залежності продуктивності, мікротвердості, залишкових напружень, шорсткості покриття від режимних параметрів його нанесення. Композитні покриття, отримані методом ГКО, в залежності від варіювання режимних параметрів, мають шорсткість $R_a = 0,12 \dots 0,16$ при товщині шару до 700 мкм, що дозволяє виключити операції попередньої і остаточної обробки, їх мікротвердість на 28% вище, а швидкість

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Арку ш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		117

зношування до 1,5 разів нижче ніж в покриттів, отриманих традиційним залізненням.

4 Визначено раціональний режим обробки: щільність струму 26...28 А/дм, температура робочого середовища 65...70°C, тиск інструменту 1...1,5МПа. Швидкість осадження покриття становить 6,7 мкм/хв., що в 1,4...1,8 разу перевищує стандартну швидкість осадження зносостійких стандартних залізних покриттів в хлористих ваннах залізнення.

5 Надані інженерні рішення та пропозиції стосовно забезпечення безпеки при роботі на технологічному обладнанні, приділено увагу питанням економічної ефективності та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_24.02.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		118