

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАОЧНОЇ ТА  
ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Підвищення довговічності деталей зміцненням робочого шару  
оцінкою структурного стану методом комп’ютерного зору”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)

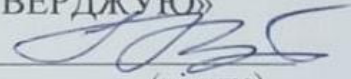
Володимир ГОРОШКО  
(Ім’я та прізвище)

Керівник: д.т.н. професор Віталій Власовець  
(Ім’я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАОЧНОЇ ТА  
ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

/Зав. кафедри   
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.  
“28” квітня 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту  
Горошко Володимирі Мироновичу

1. Тема роботи: «Підвищення довговічності деталей зміцненням робочого шару оцінкою структурного стану методом комп'ютерного зору»

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., професор

Затверджена наказом по університету від 17.02.2023 року № 331/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 15.01.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Огляд інформаційних джерел і завдання дослідження;

2. Методи досліджень;

3. Оцінка пошкодженості блок-картерів автотракторних двигунів, що надходять у капітальний ремонт. Аналіз можливості їх відновлення методом електродугової металізації. Визначення вимог, що передявляються до матеріалу покриття. Обґрунтування вибору покриття.

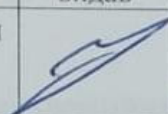

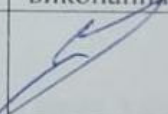
Висновки;

Список використаних джерел.

## 5. Перелік ілюстративного матеріалу:

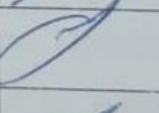
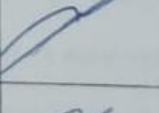
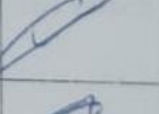



Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: пошкоджуваність блок-картерів при експлуатації; основні технологічні процеси відновлення навантажених деталей автотракторних двигунів; дефекти блок-картерів; переваги та недоліки основних методів газотермічного наплення; розробка вимог до матеріалу покриття; моделювання термічних напружень в матеріалі покриття; особливості формування шару, що наноситься; сегментація зображень.

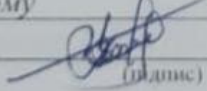

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3	Власовець В.М., д.т.н., проф. кафедри машинобудування			

7. Дата видачі завдання: 28.04.2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	Виконання розділу: «Огляд інформаційних джерел і завдання дослідження»	28.04.23- 15.06.23	
2.	Виконання другого розділу: «Методи досліджень»	16.06.23- 15.08.23	
3.	Виконання підрозділу: «Оцінка пошкодженості блок-картерів автотракторних двигунів, що надходять у капітальний ремонт»	16.08.23- 08.11.23	
4.	Виконання підрозділу: «Аналіз можливості їх відновлення методом електродугової металізації»	09.11.23- 11.12.23	
5.	Виконання підрозділу: «Визначення вимог, що передявляються до матеріалу покриття. Обґрунтування вибору покриття»	12.12.23- 3.01.24	
6.	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому	4.01.24- 15.01.24	

Студент  (підпис) Володимир ГОРОШКОКерівник роботи  (підпис) Віталій ВЛАСОВЕЦЬ

УДК 629.1 (004.8)

Підвищення довговічності деталей зміцненням робочого шару оцінкою структурного стану методом комп'ютерного зору.

Горошко В.М. Кваліфікаційна робота. – Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024р.

65 с. текст. част., 12 рис., 6 табл., 29 джерел інформації.

Робота складається зі вступу, огляду інформаційних джерел, а саме з аналізу конструкцій, призначення, умов експлуатації корпусних деталей автотракторних двигунів, матеріалів та технологій виготовлення складних корпусних деталей, проаналізовано технології ремонту та відновлення деталей, зокрема газотермічними методами. В роботі обґрунтовано використання матеріалів досліджень, обґрунтовано прийняті методи та типи зразків для оцінки та ідентифікації фазового складу покриття та перехідної зони, обґрунтовано методи оцінки зчеплення матеріалу покриття з основою. Визначено основні пошкодження корпусних деталей, обґрунтовано можливість їх відновлення. Проаналізовано особливості структуроутворення покриттів, обґрунтовано вибір матеріалу та досліджено його структуру за допомогою сегментації зображень з використанням нейронної мережі U-Net. Наведено висновки, список використаних джерел, апробація результатів та подано ілюстративний матеріал.

Кваліфікаційна робота спрямована на підвищення експлуатаційних властивостей відповідальних корпусних деталей сільськогосподарської техніки, витрати на виготовлення яких становлять до 40% вартості автотракторного двигуна, нанесення покриття газотермічним методом.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1. Аналіз конструкції, призначення, умови експлуатації блок-картерів автотракторних двигунів	9
1.2. Матеріали та технології виготовлення блок-картерів автотракторних двигунів	13
1.3. Аналіз технологій відновлення блок-картерів	22
1.4. Відновлення деталей методом електродугової металізації	33
Висновки, мета та завдання дослідження	40
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	42
2.1. Матеріал досліджень	42
2.2. Обґрунтування прийнятих методів та типів зразків для оцінки та ідентифікації фазового складу покриття та перехідної зони	43
2.3. Обґрунтування прийнятого методу для оцінки міцності зчеплення матеріалу покриття з основою	45
Висновки	47

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНОСТІ БЛОК-КАРТЕРІВ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ, ЩО НАДХОДЯТЬ У КАПІТАЛЬНИЙ РЕМОНТ. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ. ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ, ЩО ПЕРЕДЯВЛЯЮТЬСЯ ДО МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТЯ	48
3.1. Ушкодження чавунних блок-картерів. Аналіз можливості їх відновлення шляхом формування електрометалізаційного покриття	48
3.2. Вимоги до матеріалу покриття	49
3.3. Моделювання температурних напружень при використанні запропонованого покриття в середовищі SolidWorks Simulation	51
3.4. Оцінка рекомендованого покриття	55
Висновки	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61

## ВСТУП

Актуальність відновлення працездатності сільськогосподарської техніки в період збирання врожаю пшениці має кілька важливих аспектів. Збір врожаю пшениці є часочутливим процесом. Затримки в збиранні можуть призвести до втрати врожайності та якості пшениці. Швидке відновлення працездатності техніки забезпечує мінімізацію простоїв та дозволяє вчасно зібрати врожай. Ремонт та відновлення техніки зазвичай коштують менше, ніж придбання нової. Таким чином, підтримання існуючого обладнання в робочому стані дозволяє фермерам зекономити кошти. Поломка техніки під час збирання врожаю може призвести до значних фінансових збитків, оскільки кожен день затримки знижує потенційний урожай. Швидке відновлення працездатності знижує цей ризик. Пшениця, наприклад, що залишається на полі після оптимального періоду збору, може псуватися через погодні умови або шкідників. Ефективне та своєчасне відновлення техніки допомагає уникнути цих втрат. Сучасне сільськогосподарське обладнання має високу продуктивність, і його поломка може значно знизити загальну ефективність роботи. Відновлення працездатності дозволяє підтримувати високий рівень продуктивності. Ремонт існуючої техніки замість її заміни допомагає зменшити екологічний вплив, оскільки виробництво нових машин вимагає значних ресурсів і енергії. Часто сільськогосподарська техніка адаптована під конкретні регіональні умови та потреби місцевих фермерів. Відновлення та налаштування існуючого обладнання дозволяє зберегти цю спеціалізовану адаптацію.

Блок-картер можна використовувати для підвищення експлуатаційних характеристик найважливіших і цінних вузлів, що призводить до загального збільшення ресурсу агрегату.

Відновлення таких деталей традиційно передбачає високовартісне наплавлення та зварювання, а також нанесення гальванічних покриттів. Більшість із цих методів знижує довговічність компонентів, а інколи навіть не забезпечує необхідної якості та функціональності.

Газотермічні методи, такі як електродугове напилення, найбільш ефективні в застосуванні покриттів для підвищення ресурсу деталей і зниження

витрат на ремонт. Недоліком таких покриттів є низька міцність зчеплення з основою. Переваги включають легкий нагрів компонента, який не змінює структуру його основного матеріалу та не знижує його втомну міцність. Ефективність застосування визначається високою продуктивністю цього процесу, низькою вартістю обладнання та простотою налаштування параметрів технології напилення.



## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Аналіз конструкції, призначення, умови експлуатації блок-картерів автотракторних двигунів

Через передчасний вихід з ладу деталей двигунів тракторів, особливо під час сівби та збирання врожаю, сільське господарство щорічно втрачає сотні мільйонів гривень. При виробництві нової продукції витрати металу на запчастини таких машин еквівалентні їх витраті. Найбільш доцільним і економічно вигідним рішенням в цих умовах є відновлення найбільш навантажених, відповідальних і дорогих вузлів двигуна, які значно скорочують його ресурс. Блок-картер є найважливішим компонентом у цьому типі деталей [1-5].

Блок-картери сприймають навантаження від деталей, що обертаються і поступово рухаються. Вони є складними виливками коробчатого типу з ребрами для підвищення жорсткості. Складна конфігурація, наявність різних товщин, призводять до появи в них значних за величиною залишкових ливарних напружень, під дією яких вони зазнають значної деформації. В результаті через певний час, протягом якого відбувається природне старіння блоку, зростає можливість того, що початкові розміри його оброблених елементів можуть змінитися. Це перебуває у взаємозв'язку зі збільшенням зазорів у поєднаннях деталей та зі зміною показників роботи двигуна, що призводить до поступового зниження ефективності систем охолодження та мастила (з'являється накип у порожнинах охолодження та звужуються протоки [6]).

У процесі експлуатації до залишкових напружень, що виникли при литті блоку, додаються напруження від затягування гайок і сил тиску газів.

Блок-картери автотракторних двигунів виконують за різними силовими схемами [1-5], що наведені на рис. 1.1.

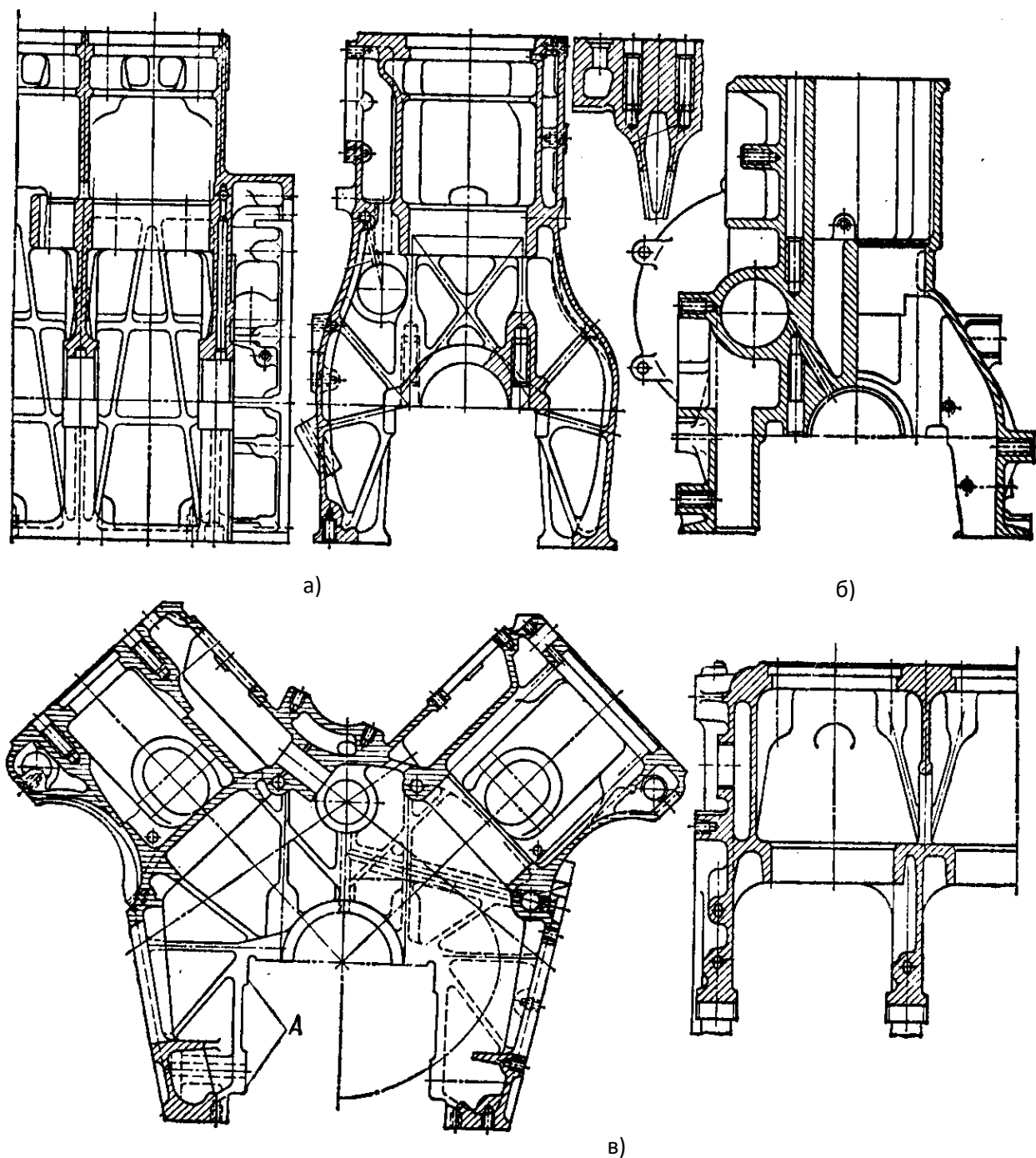


Рис. 1.1 Блок-картери двигунів з рідинним охолодженням: а - чавунний однорядного дизеля з несучими стінками сорочки та мокрими гільзами; б - алюмінієвий карбюраторний двигун з несучими шпильками, стиснутою сорочкою і мокрими гільзами; в - чавунний V-подібного дизеля з несучими стінками та мокрими гільзами

Сумарні монтажні та залишкові напруження в елементах блоку можуть досягати в розтягнутій та стислій зонах до 100 МПа [1]. До цього додаються стискаючі напруження в перемичці від тиску газів, які досягають 7 МПа. Така напруження здатна викликати руйнування блоку.

У сучасних дизельних двигунах передбачені конструктивні та технологічні заходи, що знижують таку напружену - штучне старіння матеріалу деталі, застосування системи ребер, що безпосередньо передають зусилля від шпильок кріплення головок до болтів кришок підшипників.

Найменші моменти затягування кришок підшипників у автомобільних двигунів [1,7]. Це меншими навантаженнями на поршень автомобільних двигунів і матеріалом блоку. Різьблення в алюмінієвому блоці не допускає великих зусиль затягування. Тому кріплення цього двигуна виробляють з особливою ретельністю і не допускають перевищення рекомендованих зусиль. Крім того, значне лінійне подовження при нагріванні, властиве алюмінію, може призвести до збільшення зусиль завдяки розширенню головки. При цьому особливої гостроти набуває проблема жорсткості блок-картера. Причому вимога жорсткості до блок-картерів висувається перше місце, оскільки саме її недолік лімітує часом довговічність базових деталей [8-10]. Підвищення жорсткості досягають різними конструкторськими прийомами [2-4].

Конструкції, у яких гільзи відлиті як одне ціле з блок-картером, мають підвищену жорсткість при меншій металоємності та більшу зносостійкість поверхонь стінок циліндрів. Подібні конструкції застосовують як для карбюраторних двигунів, так і для дизелів. Мінімальна товщина стін циліндра становить 6 мм; відстань між зовнішніми стінками сусідніх циліндрів для проходу води – не менше 4-5 мм

Надійність роботи підшипників ковзання багато в чому залежить від деформацій їх ліжок у блок-картері і кришках, що викликаються залишковими термічними напруженнями, що виникають при охолодженні виливків. Залишкові напруження при недостатньому штучному старінні призводять до неспіввісності корінних опор, спотворення геометричної форми постіль корінних підшипників,

прокручування вкладишів, відшаровування антифрикційного сплаву і надирів поверхонь шийок валу.

У процесі експлуатації та ремонту автомобільних двигунів відбувається зміна просторового положення елементів блок-картерів внаслідок недостатньої пружності матеріалу, жорсткості конструкції та залишкової напруженості. Просторові відхилення цих деталей ведуть, як правило, до підвищення інтенсивності процесу зношування деталей шатунно-поршневої групи та двигуна загалом. При цьому виникають дефекти, що знижують ресурс деталей:

- тріщини на зовнішній поверхні водяної сорочки в картерній частині, тріщини у перемичках між отворами під гільзи циліндрів;
- пробоїни на стінках водяної сорочки та картерної частини;
- злами гнізда під ущільнювальне гумове кільце гільзи;
- пошкодження та жолоблення верхньої площини;
- зношування або деформація посадочних місць під вкладиші корінних підшипників;
- знос отворів: під опорні шийки розподільного валу, палець проміжної шестірні, штовхачів, настановні штифти картера маховика, що направляють втулки картера шестерень та кришки;
- знос та пошкодження різьблення;
- корозія поверхонь, що труться;
- забивання масляних каналів продуктами зносу та забрудненнями олії.

Таким чином, складна конструкція блок-картерів автотракторних двигунів, наявність великої кількості концентраторів напружень, а також специфічні умови роботи, що відрізняються дією знакозмінних навантажень, зумовлюють високі вимоги до їх якості. У зв'язку з врахуванням їх високої вартості особливо важливим є питання використання ефективних методів їх ремонту та відновлення, які із забезпеченням високих якісних характеристик мали б і достатню технологічність.

1.2. Матеріали та технології виготовлення блок-картерів автотракторних двигунів

Для того, щоб забезпечити якісне нанесення покриття, необхідно ознайомитися з хімічним складом матеріалів, що застосовуються при виробництві деталей, способами виробництва та зміцнення поверхонь.

Вимоги, яким повинен задовольняти матеріал для виготовлення блок - картерів автотракторних двигунів, полягають у наступному:

- достатня міцність, здатна протистояти спільному впливу механічних, монтажних та термічних напружень;
- задовільна корозійна стійкість у воді та вологій атмосфері;
- хороша теплопровідність, що забезпечує швидке вирівнювання та відведення тепла із зон нагріву;
- добрі ливарні властивості, що дозволяють отримувати складні виливки з тонкими стінками;
- хороша оброблюваність різанням, що допускає механічну обробку на автоматичних лініях масовому виробництві;
- мала питома вага, що дозволяє знизити вагу машини;
- невисока вартість, що входять до складу матеріалу, вихідних компонентів.

Відповідно до них широке застосування для виробництва блок-картерів знайшли різні чавуни, легкі сплави на алюмінієвій основі.

Застосування сірого чавуну при виробництві блок-картерів автомобільних і тракторних двигунів обумовлено тим, що, маючи комплекс хороших міцнісних і технологічних властивостей, сірий чавун має низьку вартість, хороші ливарні властивості та оброблюваність різанням, він стійкий і до циклічних навантажень. Для виготовлення блок-картерів застосовують чавун із середньопластинчастим графітом та перлітною основою, легований невеликими добавками (табл. 1.1) хрому, нікелю, а також молібдену, міді та інших елементів [11, 12]. Вплив різних елементів на структуру та властивості сірого чавуну наведено у табл. 1.2. Основним недоліком сірого чавуну є його висока питома вага [11, 13].

Таблиця 1.1 - Хімічний склад та властивості сірого чавуну різних марок, що застосовується для лиття блок-картерів

Марка	Вміст елементів в %							$\sigma_B$	$\sigma_u$	НВ
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	МПа не менше		
Чавун, що застосовується в СНД										
СЧ18-36	3,2-3,4	2,3-2,6	0,5-0,8	0,15-0,20	0,15	0,1	0,1	180	360	170-229
СЧ21-40	3,2-3,4	2,0-2,3	0,5-0,8	0,15-0,20	0,15	0,25-0,40	0,1-0,25	210	400	170-241
СЧ24-44	3,15-3,45	2,0-2,6	0,6-0,85	0,15	0,12	0,30	-	240	440	170-241
Чавун, що застосовується за кордоном										
G3000	3,20-3,50	2,00-2,30	0,60-0,90	до 0,20	до 0,15	-	-	210	-	170-229
G3500	3,10-3,40	1,90-2,20	0,60-0,90	до 0,15	до 0,15	-	-	240	-	187-241
G4000	3,00-3,30	1,80-2,10	0,60-0,90	до 0,12	до 0,15	-	-	280	-	207-255

Останнім часом, у зв'язку з підвищенням вимог до якості, надійності та довговічності автотракторних двигунів при одночасному зниженні маси та собівартості, виникла потреба у застосуванні більш ефективних конструкційних матеріалів – високоміцних чавунів із включеннями графіту кулястої форми та легких сплавів на алюмінієвій основі.

Факторами, що забезпечують широке застосування виливків з міцного чавуну, є високе відношення межі плинності до тимчасового опору (0,8-0,85), підвищена циклічна в'язкість, зносостійкість у поєднанні з високою пластичністю, корозійною та теплостійкістю.

Таблиця 1.2 - Вплив основних легуючих елементів на структуру та властивості сірого чавуну, що застосовується при виробництві блок-картерів

Легуючий елемент	Властивості
Кремній	Сприяє графітизації чавуну, збільшує швидкість зростання зародків графіту, підвищує твердість, межу пружності, зменшує пластичність та ударну в'язкість, збільшує корозійну стійкість.
Хром	Сприяє збільшенню кількості пов'язаного вуглецю та утворенню перліту, подрібнює структуру чавуну, зменшує пористість, підвищує міцність та твердість чавунних виливків, покращує зносостійкість, підвищує корозійну стійкість.
Нікель	Ускладнює розпад аустеніту, є графітизуючим елементом, подрібнює перліт, забезпечує формування однорідної структури незалежно від відмінностей у товщині стінок виливка, збільшує дисперсність графітових включень, зменшує кількість карбідів, підвищує зносостійкість та опір корозії.
Молібден	Зменшує концентрацію вуглецю в перліті, знижує температуру перлітного перетворення, підвищує прожарювання, міцність, твердість, зносостійкість, ростостійкість, теплопровідність.
Мідь	Підвищує та вирівнює твердість, забезпечує отримання стійкої перлітної структури, підвищує зносостійкість та корозійну стійкість, покращує механічні властивості.

Хороше поєднання фізико-механічних та ливарних властивостей, що перевершує леговані та модифіковані сірі чавуни (табл. 1.3), призвело до широкого застосування високоміцного чавуну із включеннями графіту кулястої форми.

Таблиця 1.3 – Механічні властивості високоміцних, сірих, ковких чавунів

Матеріал	$\sigma_B$	$\sigma_{02}$	$E \times 10^4$	НВ	КСУ	$\sigma_{-1}$	$\tau_{-1}$	$\delta, \%$
	МПа				МДж/м <sup>2</sup>	МПа		
Чавун								
ВЧ70	700	420	18,5	2280-3020	0,2-0,4	250	230	2
ВЧ50	500	320	17,5	1530-2050	0,2-0,4	200	180	7
ВЧ45	450	310	17,5	1400-1900	0,4-1	170	160	10
ВЧ40	400	250	16,5	1400-1800	0,4-1	150	130	15
СЧ25	250	-	11,2	1800-2500	0,5	110	80	0,6
КЧ60-3	650	500	18,5	2000-2690	0,7-0,9	220	210	3
КЧ45-7	450	300	17,6	1500-2070	0,7-0,9	180	180	7
КЧ37-12	370	250	17,0	1100-1630	0,4-0,5	160	130	12
КЧ35-10	350	200	15,5	1000-1630	0,4-0,5	100	110	10

На ряді підприємств, що виробляють двигуни внутрішнього згорання, виливки блок-картера виготовляють із ЧШГ, наприклад, ВЧ45 (табл. 1.4), які надалі відпалюють на отримання феритної основи [14].

Для отримання такого чавуну модифікування проводять у ковші Fe – Si – Mg – лігатурою ЖКМ-1,2, кількість якої розраховується виходячи із введення 0,18-0,22% Mg у рідкий метал. Шматки лігатури діаметром 30-80 мм поміщають на дно розігрітого до 600°C ковша, зверху засипають шаром силікат-брили у кількості 0,5-0,8% та криолітом у кількості 0,10-0,15% від маси рідкого металу, потім завантажують сталеві відходи (15-20 кг). На момент випуску металу на жолоб печі подають феросиліцій ФС-75 у кількості 0,3-0,5% від маси рідкого металу. Температура металу під час заливки 1380-1420°C. Час заливки не перевищує 10 хв.



Таблиця 1.4 - Структура, фізико-механічні властивості та застосування високоміцного чавуну

Чавун (ГОСТ 7293–85)	Структура		Фізико-механічні властивості				Примітки
	Металева основа	Включення графіту	$\sigma_B$	$\sigma_{-1}$	НВ	$\delta, \%$	
			МПа				
ВЧ40	Феррит	ВГШФ <sup>1</sup> + $\leq 10\%$ ВГПФ <sup>2</sup>	400- 440	180- 220	140- 168	15-18	Корпусні деталі, вихлопні труби, маточини
ВЧ45	Ферит + $\leq 5\%$ перліта	ВГШФ + $\leq 10\%$ ВГПФ	450- 550	240- 260	140- 225	10-14	Те саме
ВЧ60	Пластинчастий перліт	ВГШФ + $\leq 5\%$ ВГПФ	600- 650	270	192- 250	2-3	Колінчасті вали, гальмівні барабани
ВЧ80	Зернистий перліт + $\leq 5\%$ фериту	ВГШФ + $\leq 5\%$ ВГПФ	800- 850	260- 290	270- 360	2-4	Високонавантажених колінчасті вали, шатуни

Примітка: 1 - ВГШФ - включення графіту кулястої форми;

2 - ВГПФ - включення графіту пластинчастої форми

Виливка блок-картера характерна тим, що має багато теплових вузлів з парою стінок з різними перерізами. У зв'язку з цим з'являється можливість утворення таких дефектів, як усадкові раковини у теплових вузлах, газові раковини на

внутрішніх стінках виливки, раковини довільного розташування, газові бульбашки або неспай у верхніх частинах виливків. Для усунення зазначених дефектів покращують вентиляцію стрижнів та форм; ретельно фарбують і зачищають рознімання та місця склейки стрижнів; вживають заходів щодо затримання шлаку шляхом використання спеціальних чаш та сіток, прибутків та зливних бобишок; застосовують холодильники у теплових вузлах.

Для зниження залишкових напружень використовують наступне: змінюють конструкцію та податливість стрижнів, спосіб заливання та вибивання форм. Висока податливість стрижня і легке видалення його забезпечують вільне усадження виливки в процесі кристалізації і рівномірне охолодження виливки після вибивання. Деяке зниження внутрішньої напруження спостерігається при природному старінні виливків. При витримці протягом 6-12 місяців, напруження в блоці знижуються в середньому на 15-25% [11]. Найбільш ефективно зниження внутрішньої напруження забезпечують проведенням низькотемпературного відпалу. Термічну обробку (відпал) проводять у кесонах, використовуючи температуру виливків після їх вибивання з ливарних форм. Для запобігання утворенню в мікроструктурі металу блоків вільного фериту (для сірих чавунів) передбачають їх прискорене охолодження після вибивання до 600-630°C. Виливки з цією температурою надходять у теплоізолювану прохідну камеру, під час руху через яку температура виливки поступово знижується до 150-200°C зі швидкістю близько 50°C/год. Подальше охолодження виливків виробляють на повітрі. Деяке зменшення залишкової напруження в корпусі блок-картера отримують також за рахунок подовження часу охолодження виливків у формі до вибивання.

Мінімальна питома вага, висока теплопровідність і хороша оброблюваність привели до використання легких сплавів на алюмінієвій основі при виробництві мікролітражних та малолітражних двигунів, для яких зниження відношення ваги до потужності має особливо велике значення [15].

Порівняно низька температура плавлення і хороші ливарні властивості алюмінієвих сплавів дали можливість освоїти технологію виготовлення блоків циліндрів методами лиття під високим тиском, а в ряді зарубіжних фірм та під

низьким тиском у кокілі, що охолоджуються, з піщаними стрижнями на термореактивній смолі. Цими методами на автоматизованих машинах вдається отримати до 20-25 виливків на годину.

Блоки зі сплавів на алюмінієвій основі, з циліндрами з того ж сплаву, не мають необхідної надійності. Тому застосовують, в основному, або комбіновані блоки циліндрів, корпус яких відливається з доєвтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву, а гільзи - із сірого чавуну, або - біметалічні. В цьому випадку попередньо підготовлені та підігріті до 350-400°C чавунні гільзи заливають алюмінієвим сплавом безпосередньо в прессформі при лиття під тиском або кокіль.

За кордоном для лиття блоків циліндрів з чавунними гільзами зазвичай застосовують сплави на алюмінієвій основі, що містять до 11-13% Si, а іноді - до 5-6% Cu (табл. 1.5 та табл. 1.6). Сплави SAE 303 і 305 володіють досить хорошими властивостями міцності як при кімнатній, так і при підвищених температурах (особливо SAE 303)

Таблиця 1.5 - Склад алюмінієвих сплавів, що застосовуються за кордоном для лиття корпусів блоків циліндрів та блок-картерів

Марка металу		Вміст елементів в % (Al – інше)		Домішки в % (не більше)					
за SAE	за ASTM	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Ni</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>
303	114A	10,5-12,0	3,0-4,5	1,3	0,50	0,10	0,50	1,0	0,35
304	5C	4,5-6,0	до 0,6	2,0	0,35	0,10	0,50	0,5	0,15
305	12A	11,0-13,0	до 0,5	1,3	0,35	0,10	0,50	0,5	0,15

Таблиця 1.6 - Склад алюмінієвих сплавів, що застосовуються за кордоном для лиття корпусів блоків циліндрів та блок-картерів

Марка металу		$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta$ , %	$\tau_{ср}$ , МПа	$\gamma \times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	$\alpha \times 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>
за SAE	за ASTM	МПа					
303	114A	337	169	2,5	20,4	2,7	21,5
304	5C	232	98	9,0	13,3	2,69	23,5
305	12A	295	133	3,5	17,6	2,65	21,8

У вітчизняному автомобілебудуванні для лиття блоків циліндрів переважно застосовують сплави АЛ-4 та АЛ-9 (табл. 1.7 та табл. 1.8).

Таблиця 1.7 - Склад алюмінієвих сплавів, що застосовуються для лиття блок-картерів та блоків циліндрів у країнах СНД

Марка металу	Вміст елементів в % (Al – інше)			Домішки в % (не більше)							Сумма домішок
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>	<i>Ti</i>	<i>Be</i>	
АЛ4	0,17- 0,3	8,0- 10,5	0,2- 0,5	0,9	0,3	0,3	0,01	0,05	0,15	0,1	1,05
АЛ9	0,2- 0,4	6,0- 8,0	до 0,5	1,0	0,2	0,3	0,01	0,05	0,15	0,1	1,5

Виливки деталей із алюмінієвих сплавів часто мають підвищену пористість (особливо при литті під тиском), що порушує герметичність виробів. Такі дефекти виправляють шляхом просочення їх спеціальними смолами. Крім цього до недоліків цих матеріалів слід також віднести невисокі механічні властивості та

занадто великий коефіцієнт лінійного розширення. Незважаючи на малу питому вагу, високу теплопровідність, хороші ливарні властивості, область застосування легких сплавів на алюмінієвій основі обмежена і поширена, в основному, при виробництві легкових автомобілів, де загальний показник використання таких матеріалів досягає 39 кг [16].

Таблиця 1.8 - Властивості алюмінієвих сплавів, що застосовуються для лиття блок-картерів та блоків циліндрів у країнах СНД

Марка металу	Вид термообробки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
		не менше		
АЛ4	-	150	2	50
	T1	200	1,5	70
	T6	240	3	70
АЛ9	-	160	2	50
	T5	210	2	60
	T6	230	1	70

З алюмінієвими блок-картерами в даний час успішно конкурують описані вище легкі тонкостінні блоки з високоміцного чавуну з включеннями графіту кулястої форми.

В результаті проведеного аналізу матеріалів і технологій, що використовуються в даний час при виробництві найбільш навантажених та дорогих деталей автотракторних двигунів - блок-картерів встановлено, що серед найбільш поширених набули різні види чавунів. Найбільш ефективними завдяки гарному поєднанню фізико-механічних і ливарних властивостей є високоміцні чавуни з включеннями графіту кулястої форми. Однак високотемпературна термообробка таких матеріалів супроводжується виникненням високого рівня напруження, що пов'язано зі значною кількістю дефектів у виливках (раковини, бульбашки, пори), а також схильністю до формування твердих та крихких структурних складових –

мартенситу та ледебуриту, що викликають утворення тріщин. У разі традиційні методи відновлення, засновані на високотемпературних процесах наплавлення і зварювання, виявляються непридатними. Тому особливу гостроту нині набуває питання вибору ефективної технології відновлення навантажених і дорогих деталей, що забезпечує високий рівень якості без істотного прогріву поверхні, у якому має місце формування у перехідній зоні термічного впливу загартованих структур.

### 1.3. Аналіз технологій відновлення блок-картерів

Основним завданням ремонту блок-картеру є забезпечення максимальної точності розмірів і поверхонь, що досягається шляхом нанесення покриттів і зміцнення робочого шару при збереженні необхідної міцності. Існує багато несправностей в блок-картері, які виникають під час їх експлуатації, і деякі з них неможливо усунути звичайними засобами. (табл. 1.9) [17, 18].

Традиційно для відновлення більшості дефектів [19] блок-картерів (табл. 1.10) розробляють поопераційну послідовність технологічного процесу та маршрути відновлення.

Для відновлення таких деталей часто використовують різні види зварювання.

При холодному дуговому зварюванні зниження температурного на матеріал застосовують різні технологічні чи спеціальні зварювальні матеріали. Попередньо проводять обробку тріщин. Для холодного зварювання застосовують самозахисний дріт ПАНЧ-11, МНЖКТ-5-1-02-02 (для напівавтоматичного зварювання серед аргону “А”), що дозволяють ремонтувати тріщини, пробоїни, сколи та інші дефекти чавунних блок-картерів. Зварювання ведуть з охолодженням попередньої ділянки до 30-50°C. Знайшли застосування також спеціальні електроди: МНЧ-2, виготовлені з монель-металу (70% нікелю та 26% міді, решта - залізо та марганець) та мідно-залізні електроди ОЗЧ- 2. Їхнім основним недоліком є висока вартість. Використання даного методу не дозволяє повністю уникнути формування крихких структур та виникнення високого рівня залишкової напруженості.

Таблиця 1.9 - Дефекти блок-картера, що не підлягають відновленню традиційними методами

Дефекти блок-картера
<ul style="list-style-type: none"><li>- понад дві тріщини між отворами під гільзи;</li><li>- більше чотирьох тріщин у стінках водяної сорочки або менше чотирьох, але загальною довжиною понад один метр;</li><li>- понад дві тріщини, що виходять на оброблені поверхні блок-картера;</li><li>- злам більш ніж одного гнізда, або лише одного гнізда під ущільнювальне гумове кільце гільзи, але завбільшки більше <math>1/3</math> периметра;</li><li>- наявність більше двох пробоїн або 1-2 пробоїни загальною площею понад 300 мм<sup>2</sup> на зовнішній поверхні водяної сорочки та на поверхні картерної частини;</li><li>- наявність тріщин та обломів гнізд під вкладиші корінних підшипників, у гніздах (під шийки розподільного валу), що проходять через масляні канали, та у місцях, недоступних для проведення зварювальних та інших робіт.</li></ul>

Таблиця 1.10 - Основні дефекти блок-картеру та традиційні способи їх усунення

№ п/п дефекту	Найменування дефекту	Повторюваність дефекту	Способи усунення
1	2	3	4
1	Пошкодження гнізда корінного підшипника	0,03-0,05	Розточування дефектного гнізда, наплавлення та обробка до нормального розміру
2	Тріщини, пробоїни на стінках водяної сорочки	0,03-0,05	Заварювання тріщин та пробоїн з наступною герметизацією епоксидним складом
3	Тріщини на перемичці між посадковими місцями під гільзи циліндрів	0,6	Заварювання тріщин або закладення їх фігурними вставками
4	Знос, овальність та конусність поверхонь під вкладиш, корінних підшипників	0,1-0,2	Розточує отвори під вкладиші збільшеного розміру. Розточує отвори під вкладиші до нормального розміру з перекосом осі в глиб блоку. Приварює сталеву стрічку з наступним розточуванням до нормального розміру.



1	2	3	4
5	Неспіввісність опор під вкладиші корінних підшипників за відсутності інших дефектів	0,15-0,2	Розточування корінних вкладишів, що були у використанні або нових, в опорах блоку.
6	Корозія та зношування посадочних місць під нижній поясок гільзи циліндрів	0,25-0,3	Розточування посадкового місця з наступною установкою кільця на епоксидному компаунді.
7	Овальність на посадочних місцях під гільзи циліндрів	0,3	Розгортання одночасно обох посадкових місць під гільзи циліндрів
8	Зношування, вибоїни на торцевій поверхні гнізда блоку циліндрів під бурт гільзи	0,25-0,40	Механічна обробка опорної поверхні під бурт гільзи циліндрів
9	Знос внутрішньої поверхні втулки розподільного валу	0,05-0,10	Заміна втулки
10	Пошкодження різьблення шпильок та різьбових отворів, обрив шпильок	0,2-0,4	Заміна шпильок. Встановлення різьбових спіральних вставок

Застосування гарячого зварювання чавуну, у ряді випадків позбавлене зазначених недоліків і дозволяє отримувати високоякісні зварні шви, що особливо важливо при ремонті тонкостінних блок-картерів. У процесі ремонту деталі нагрівають до 600-700°C у муфельних печах і усувають дефекти дуговим або газовим зварюванням, застосовуючи як присадний матеріал чавунні прутки марки А. При зварюванні застосовують спеціальний флюс ФСЧ-1. Однак цей технологічний процес вимагає спеціального термічного обладнання, що тягне за собою підвищення собівартості ремонту. Найменше поширення при ремонті блок-картерів, внаслідок невисоких якісних характеристик відновлених поверхонь, набули методи пайко-зварювання латунними припоями ЛОК59-1-03 та ЛОМНА49-1-10-02, а також накладання латок та використання епоксидних композицій.

Застосування традиційних технологій зварювання при усуненні ряду дефектів блок-картера, у ряді випадків, дозволяє домогтися отримання необхідних властивостей деталі, що відновлюється. Однак прагнення знизити шкідливий вплив високих температур у зоні зварювання на метал шва і деталі, що призводять до появи твердих і тендітних складових – мартенситу та ледебуриту, а також внаслідок великої величини усадки чавуну при кристалізації та охолодженні формують високий рівень напруження. або вимагає спеціального термічного обладнання [19]. В результаті усунення таких дефектів як пошкодження привалочних площин, посадкових отворів під підшипник, тріщин і пробоїн на стінках водяної сорочки, де необхідне нанесення значної кількості матеріалу на поверхню деталі, через високу собівартість ремонту виявляється малоефективним. Тому доцільним є пошук нових технологій відновлення зазначених дефектів блок-картерів, вкладених у зниження термічного на матеріал деталі.

Мінімальний температурний вплив на матеріал блок-картерів є важливим аспектом використання реставраційних технологій у цій сфері. Вони в першу чергу пов'язані з газотермічними методами, які передбачають створення потоку інертного газу через дисперговані краплі матеріалу, який розпилюється на деталь. На відміну від традиційних методів наплавлення, ці технології не вимагають

спеціальної зони термічного впливу, дозволяють створювати покриття з різноманітними властивостями та можуть бути відносно нескладними в певних ситуаціях. Суттєвим недоліком є недостатня здатність зчеплення покриттів з основою. Єдиного методу газотермічного напилення на даний час не існує. Е. Кречмар пропонує комплексну класифікацію [18]. Використання енергетичних класифікацій спрямоване на створення більш досконалих систем класифікації, оскільки фундаментальна сутність газових термічних покриттів змінюється залежно від типу використовуваного газу. Газове полум'я, детонаційний газ і електрична дуга (висока частота) є трьома типами методів газового термічного покриття. Ця система класифікації поділяє ці технології нанесення покриттів на категорії. При відновленні автотракторного двигуна навантажених і дорогих деталей традиційно не використовується метод високочастотного напилення [23] через його складність і високу вартість обладнання. Газотермічні методи та їх технологічні ознаки порівняні в таблиці 1.11 та 12. Невеликий коефіцієнт використання енергії газового струменя (до 12%) пов'язаний з низькою продуктивністю, властивою всім газовим методам. Через малу товщину покриття, яка становить лише 0,1-0,5 мм [23, 31], детонаційне напилення має обмежені переваги перед іншими методами щодо зносостійкості [24,32] та міцності зчеплення. Газополум'яні покриття можна зробити більш стійкими шляхом переплавлення біметалів і самофлюсувальних порошків [25-27, 31], щоб підвищити їх адгезійну міцність і покращити зносостійкість.

Таблиця 1.11 – Особливості основних видів газотермічного нанесення покриттів

Переваги	Недоліки
<b>Плазмово-дугова металізація</b>	
<p>Широкий спектр матеріалів може бути покритий без будь-яких обмежень щодо їх температури плавлення.</p> <p>Використовуючи різні гази, такі як інертний, відновний (аргон і водень) і окислювальний (повітря та азот), характеристики дугового плазмового струменя можна змінити відповідно до середовища, де краплі нагріваються та рухаються.</p> <p>Для плазмотрона можливі гнучкі зміни електричного та газового режимів роботи навіть під час процесів нанесення покриттів.</p>	<p>За певних умов експлуатації, таких як випробування на відрив, коли покриття досягає 50 МПа в деяких застосуваннях, його міцність зчеплення з основою є низькою.</p> <p>Енергія плазмового струменя має низький ефективний коефіцієнт використання нагріву порошку, коефіцієнт становить 8%.</p> <p>Високий рівень шуму.</p> <p>Випромінювання (110, 130 дБ) і пов'язані з ним частоти.</p> <p>Високі витрати на обладнання та його оснастку.</p>
<b>Газополум'яна металізація</b>	
<p>З матеріалів, що плавляться до 3000 °С, можна отримати покриття без розкладання.</p> <p>Низький рівень шуму і світловипромінювання.</p> <p>Простота обслуговування, низька вартість і мобільність обладнання дозволяють проводити розпилення без розбирання виробів.</p>	<p>Напилювані матеріали необхідно зберігати при температурі не вище 3000 °С.</p> <p>При нанесенні на основу адгезія до поверхні низька.</p> <p>Відзначається низька енерговитрата газополуменевого струменя на нагрівання порошкового матеріалу (2-12%).</p>

Детонаційне напилення	
<p>Можливість отримання покриття з більшою міцністю.</p> <p>Краплі нанесеного матеріалу мають високу кінетичну енергію, що призводить до утворення частинок із загальною щільністю 160 МПа та пористістю 0,5 1%).</p> <p>Без струминної абразивної підготовки поверхні можливо наносити покриття з високою адгезійною міцністю на певні основи, такі як сталь і нікелеві сплави.</p> <p>Конструкція установки відносно проста.</p>	<p>Щоб запобігти шкідливому впливу, необхідно ізолювати зону обробки від гучних звуків (125-140 дБ).</p> <p>Технологічні бар'єри, що виникають внаслідок високих імпульсних тисків і впливу продуктів детонації на підкладку, ускладнюють обробку нежорстких компонентів.</p>
Електродугова металізація	
<p>Продуктивність процесу доведена до 50 кг/год.</p> <p>Високий коефіцієнт енергії електричної дуги використовується для нагрівання дроту з корисним коефіцієнтом 70%.</p> <p>Може легко змінювати ентальпію частинок спрею в широкому діапазоні.</p> <p>Доступний вихідний рівень 2000 10000 кДж/кг.</p> <p>Висока адгезійна міцність (до 60 80 МПа) може бути досягнута за допомогою використання дроту з порошковим покриттям і проміжних шарів з чудовими властивостями адгезії [40,53].</p>	<p>Активна газова фаза зазнає інтенсивної взаємодії з частинками.</p> <p>Тільки розпилювальний дріт.</p> <p>Високий рівень шуму.</p> <p>110 з посиленням 130 дБ.</p>

Таблиця 1.12 - Технологічні особливості основних видів газотермічного напилення

Плазмено-дугова металізація
<p>Сутність полягає у формуванні на поверхні деталі шару з крапель, що володіють певним запасом теплової та кінетичної енергії, отриманої в результаті взаємодії зі струменем дугової плазми [23,33] Температура плазмового струменя досягає 5000-55000°С, а швидкість закінчення 1000-1 с. У плазмовому струмені краплі розплавляються і набувають швидкості 50-200 м/с. Швидкість польоту залежить від їх розміру, щільності матеріалу, сили струму дуги природи та витрати плазмоутворюючого газу. Теплова дія на деталь становить 100-200 ° С [25].</p> <p>Як плазмоутворюючі гази можуть бути використані: аргон, азот високої чистоти, водень з і гелій за ТУ51-689. Вибір газу залежить від технічної характеристики плазмової установки, яка використовується для нанесення покриття, складу та дисперсності порошку, вимог до якості покриття.</p> <p>Для запобігання перегріву виробів невеликих розмірів, їх жолоблення, а також окислення покриттів (при напиленні шару товщиною понад 0,5-1 мм) застосовують струменеве охолодження. Як охолодний агент використовують стиснене повітря, аргон, азот, вуглекислий газ. Вибір охолоджуючого агента залежить від конструктивних особливостей виробу, складу порошку або дроту та режимів нанесення покриттів. При охолодженні стисненим повітрям клас забруднення має бути не вище 3, тиск у мережі 0,49 МПа при витраті газу 0,5-2,5 м<sup>3</sup> /хв. Витрата охолоджувача залежить від розмірів та властивостей матеріалу виробу.</p>
Газопламена металізація
<p>Необхідний запас теплової та кінетичної енергій повідомляється краплям у процесі взаємодії їх із полум'ям суміші горючий газ – кисень. Полум'я утворюється в результаті згоряння на зрізі сопла горючої суміші, що витікає</p>

з великою швидкістю із соплових отворів пальника [44,54]. Порошок або дріт подають, як правило, вздовж осі смолоскипа полум'я, всередину його. Температура при використанні пального газу ацетилену досягає 3200°C, а швидкість закінчення 150-160 м/с. Потрапляючи в струмінь, частинки порошку або матеріал дроту розплавляються або стають високопластичними і набувають швидкості 20-80 м/с. Швидкість польоту крапель залежить від співвідношення кисню та пального газу в суміші, витрати обдувного газу, відстані від зрізу сопла, витрати матеріалу, що вводить в полум'я, його щільності та інших факторів.

Як робочі гази використовують ацетилен, кисень, пропан-бутан, азот або стиснене повітря, очищене від олії та вологи. Повітря, азот або інший стислий газ застосовують для охолодження соплової частини пальника та обдування факела полум'я. Обдування факела полум'я призводить до його "обтиску" і підвищує швидкість польоту крапель.

#### Детонаційне напилення

Нагрів та розгін крапель напилюваного матеріалу здійснюється за рахунок енергії продуктів детонації газової суміші [32,43]. Швидкість поширення детонаційної хвилі становить 2000-4000 м/с, а температура сягає 2200-5500 ° С (залежно від складу суміші). Це забезпечує досягнення краплями швидкостей 600-1000 м/с. Процес повторюється 3-4 рази у секунду. Структура покриття формується внаслідок серії вибухів. При ударі об поверхню кінетична енергія повністю перетворюється на теплову, що є додатковою перевагою цього способу. Завдяки високим швидкостям краплі повністю деформуються і змочуючи поверхню підкладки, тісно стикаються з усіма її нерівностями, забезпечуючи високу щільність (до 1%) детонаційних покриттів та міцність зчеплення (до 240 МПа) з основним металом. Як робочі гази використовують азот, кисень за ГОСТ6331, ацетилен п, пропанбутан.

## Електродугова металізація

Утворення потоку крапель, що напилюються, відбувається за рахунок плавлення розпилюваного матеріалу високоамперною дугою і його диспергування швидкісним потоком газу [43,44,45]. Дуга, перебуваючи під впливом електродинамічних та газодинамічних сил, рухається у міжелектродному просторі [23]. Простежуються два етапи у циклі горіння. На першому, тривалістю 10<sup>-5</sup> - 10<sup>-6</sup> с, відбувається збудження та розвиток початкової стадії горіння дуги. Теплота, що виділяється в активних плямах, практично повністю витрачається на плавлення електродного дроту. На другому етапі, тривалістю 10<sup>-2</sup> - 10<sup>-3</sup> з відбувається винос дуги за межі оплавлених торців електродів. Максимальна температура дуги становить близько 4000-6000 С [21,35]. Саме тоді відбувається інтенсивне плавлення металу. Частина теплоти стовпа дуги витрачається на нагрівання газу, що розпилює. Розділовим моментом між двома етапами в циклі є скидання розплавленого металу з торців електродів. Смуга частот цих процесів перебуває у межах 250-2500 Гц. Розплавлені краплі підхоплюються із зони дуги потоком розпилювального газу, що рухається з надзвуковою, або близькою до неї, швидкістю і переносяться до поверхні формування, де їх швидкість і - газової дуги вирівнюються і складають 50-150 м/с.

Однак це може призвести до перегріву основного металу, і, як наслідок, відбувається зниження компонентів втомної міцності [28,29]. Застосування методики плазмового напилення у багатьох випадках дозволяє досягти високої міцності відновлених покриттів [29,30], але низька ефективність використання енергії струменя для нагрівання наповнювача (8,2%) значно знижує його ефективність. Ці особливості суттєво обмежують область застосування цих методів при навантаженому та дорогому ремонті автомобільних деталей.

Найкращими характеристиками з погляду продуктивності (в 2-3 рази вищими, ніж при плазмовому методі), економічними показниками, зумовленими найбільшим коефіцієнтом корисного використання енергії (до



90%), має метод електродугової металізації. Нині недостатньо розглянуто питання використання цього методу відновлення найбільш навантажених деталей автотракторних двигунів. Найчастіше розглядається технологія формування покриттів на деталі карбюраторних двигунів автомобілів, які працюють у менш важких умовах проти тракторними - дизельними.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що застосування традиційних методів наплавлення та зварювання пов'язане зі значним збільшенням собівартості ремонту та найчастіше, внаслідок змін властивостей матеріалу під впливом високотемпературних процесів, не забезпечує отримання необхідних якісних характеристик відремонтованої деталі. Серед газотермічних методів, що дозволяють звести до мінімуму температурну дію на основу, найбільш прийнятною з точки зору технологічності та економічної ефективності процесів є електродугова металізація.

#### 1.4. Відновлення деталей методом електродугової металізації

Встановлено класифікацію та позначення найбільш логічних технологічних методів і прийомів контролю властивостей електрометалізаційних покриттів шляхом вивчення взаємодії матеріалів при напиленні. Аналіз [34 36] показує, що поверхня повинна бути підготовлена винятковими способами для розпилення. Вимоги до реставрації – це не єдиний фактор, оскільки поверхня також відіграє вирішальну роль. Хімічна активація, адсорбція газів з навколишнього середовища і подальші окисні процеси викликають підвищення активності поверхні. Препарат також усуває міжатомні зв'язки між атомами, що призводить до того, що підкладка стає грубішою та створює більший контакт під нанесеними краплями, що в кінцевому підсумку призводить до збільшення площі графіка та збільшення площі графіка. В результаті інтервал між підготовкою поверхні та нанесенням покриття скорочується до 1-3 годин.

Таблиця 1.13 - Вимоги до деталей перед напиленням

Вимоги до деталей	Вимоги до поверхні
<p>На поверхні виробу не повинно бути жодних слідів задирок, зварювальних бризок від попередніх ремонтів, перегріву, раковин або тріщин. Чистота важлива, щоб уникнути накипу, іржі, оксидів і різних забруднень на поверхні. Для обробки внутрішніх поверхонь необхідно відповідні технічні характеристики цієї установки за розмірами (діаметр, довжина). Якщо відношення довжини до діаметра менше 1,8, покриття наноситься на внутрішні поверхні, відкриті з обох сторін у стандартному обладнанні.</p> <p>Ширина або діаметр отвору на виїмках і глухих отворах повинні бути пропорційні його глибині при нанесенні покриття.</p>	<p>Міцність зчеплення покриття з основним матеріалом значно знижується конденсаційним шаром вологи, а це означає, що якщо температура продукту нижче 0°C, підготовлена поверхня повинна мати кімнатну температуру перед підготовкою.</p> <p>Рекомендується, щоб зона спеціальної обробки була на 5 20 мм більша за зону розпилення (для блоків картерів).</p> <p>Підготовлену поверхню слід захистити від олії та води, не можна використовувати руки. Під час обробки та нанесення покриття рекомендується використовувати чисті, знежирені рукавички або інструменти.</p> <p>Готовий продукт повинен бути упакований в папір або спеціальну тару, якщо вона транспортабельна.</p>

При відновленні найбільш навантажених і дорогих деталей картерів двигунів вибір способу підготовки поверхні в першу чергу визначається максимальною міцністю зчеплення покриття з основним матеріалом.

Методи поверхневої деформації, такі як накатка та дробеструменева обробка, як показано в таблиці 1.14, підвищують втомну міцність на 20-30%, у той час як методи концентраторів напружень, які спричиняють нерівномірні зміни структури основного металу (наприклад, через різання та канавки), електрична іскрова та електрична дугова обробка, а також надрізання різцем, серед іншого, знижують втомну потужність (до 60%) порівняно з оригінальним методом.

За допомогою методів струминного стирання відновлення зазначених компонентів дає найбільш сприятливий результат завдяки оптимальному поєднанню міцності адгезії та витривалості. Під час роботи в картері накопичуються паливно-мастильні матеріали, смолисті відкладення асфальту (наприклад, безводне покриття), накип, наприклад сажа, або інші хімічні речовини, які знижують міцність зчеплення. Поверхня деталей очищається різними техніками перед струминним очищенням під час підготовки до нанесення покриття. Щоб запобігти потраплянню крапель, використовуються термостійкі гумові пробки, які закривають отвори та запобігають пошкодженню.

Параметри технологічного процесу очищення поверхні металевим дробом визначаються її пошкодженими ділянками, у тому числі такими фізико-механічними властивостями, як тиск, швидкість, діаметр. Абразивні зерна утворюють зміцнюючу плівку товщиною 0,2-0,4 мм, яка підвищує рівень енергії та дифузійну проникність металу. Через нездатність зміцнення кристалічної решітки до зміцнення можуть утворюватися тріщини і ослаблення в результаті подальшого мікроударного впливу на метал що оброблюється.

Таблиця 1.14 - Вплив способу підготовки поверхні на міцність покриття

Спосіб підготовки поверхні	Межа витривалості		Міцність зчеплення (деформація зсуву), МПа
	$\sigma_{-1}$ МПа	% к шлифованно й деталі	
Обробка дробом	324	128,5	104
Накатка (пряма, коса, перехресна)	306	121,0	100
Піскоструйна обробка	278	110,5	34,5
Шліфування	252	100,0	-
Нарізка трикутна з подальшим обробленням дробом	245	98,0	190
Насічка зубилом	206	82,0	82,0
Електроіскрова обробка	194-212	77,0-84,0	91,5-110
Нарізка кругла	194	77,0	167
Нарізка кругла з прикочуванням вершин	188	74,5	144
Нарізка трикутна	188	74,5	180
Нарізка трикутна з прикочуванням вершин	170	67,5	156
Електродугове оброблення	170	67,5	25
Нарізка кільцевих канавок	165	65,5	140
Нарізка кільцевих канавок з прикочуванням вершин	153	61,0	113

Для попередньої обробки поверхні перед напиленням блочних картерів використовують цирконій або білий електрокорунд з зернистістю 80 125, а також для сталевих або чавунних колочих дротів ДСК і ДЦК №08К і №15К.

Рекомендується використовувати металевий дріб при роботі з матеріалами, які мають твердість HRC 50 або вище, переважно HRC 40. Можливим способом підвищення циклічної стійкості сталевого дробу є зміна його структури з грубодисперсного мартенситу на троостит і дрібнодисперсний мартенсит, як рекомендовано [42]. Для досягнення бажаного результату дроб піддають нагріванню до  $(780-830)\pm 10^{\circ}\text{C}$  у захисному середовищі з наступним охолодженням у воді та релаксацією при середніх температурах  $360\pm 20^{\circ}\text{C}$ .

Абразив видаляється за допомогою струменя, а потім продування деталі стисненим повітрям. Поверхні, які можна запобігти, герметизуються [37].

Після первинної підготовки наносять покриття.

Потужний високошвидкісний газовий потік викликає розплавлення шарів, що чергуються. Через малий діаметр активні плями електродів не такі великі, як на інших поверхнях електродів. Це призводить до стиснення колони арки. Зміна довжини є ще однією відмінною рисою горіння дуги. В принципі доступні два можливі способи спалювання: періодичне замикання та відсутність короткого замикання. По-перше, їх характер визначається родом струму і режимом процесу. Використання змінного струму для живлення дуги унеможлиблює запобігання короткого замикання. Процес може здійснюватися з коротким замиканням або без нього за допомогою джерел постійного струму. У горінні дуги є елементи циклічності. Застосування електродугового напилення на покриття у виробництві показало, що їх механічна обробка повинна проводитися в наступних режимах. Для токарної обробки потрібна швидкість різання 15-16 м/хв, глибина 0,1-5 см і швидкість подачі 0,15 мм/об. Пластини з твердого сплаву, виготовлені з групи вольфраму або титану, слід використовувати з спеціальними різцями.

Грубе шліфування забезпечує швидкість обертання круга 20-25 м/с, деталь обертається зі швидкістю 10-12 мм/хв, з різною глибиною різання і швидкістю подачі до 0,7 мм/хв. Процес фрезерування плавний і точний. Тонке шліфування забезпечує швидкість обертання круга 25-30 м/с, округлену до 12-15 обертів/год, з глибиною різання 0,005 мм і подачею 0,4 м/3 м.

Найефективніший спосіб шліфування дроту з високою вміст вуглецю визначається за допомогою корундових дисків М7 або М8, а покриття наносяться напиленням. Рекомендований розмір електрокорундових кругів на з'єднанні М1, М2 40 60. При нанесенні електродуговим напиленням пропонується використовувати диски з абразивного матеріалу зернистістю 30-44 на керамічній зв'язці, твердістю - 2 і структурою 9. Електродугове напилення типу КДМ 2 і стаціонарні установки металізації, такі як ЕМ 12М і СМ 15, зазвичай застосовуються для реставрації, як показано в таблиці 1.15.

Таблиця 1.15 - Технічна характеристика обладнання

Показник	КДМ-2	ЕМ-12М	ЕМ-13
Продуктивність при розпиленні, кг/год:			
цинку	до 32,0	до 14	до 25
алюмінію	до 12,5	до 45	до 65
сталі	до 10,0	до 45	-
Діаметр дроту, що розпилюється, мм	1,5-2	1,5-2,5	2-3
Швидкість подачі дроту, м/хв.	2-12	3,8-14,2	1-14
Найбільша витрата стисненого повітря, м <sup>3</sup> /год	90	150	160
Робочий тиск стисненого повітря, МПа	0,5-0,6	0,5-0,6	0,5-0,6
Робочий струм, А	400	до 500	до 800
Напруження, В:			
дуги (робоче)	17-44	17-35	17-35
мережі живлення	380	380	380
Потужність, кВт	до 25	до 16	до 25
Габаритні розміри, мм	1330×710×1390	525×295×200	520×175×225

Підшар із сталевого дроту 45C4Si34 (Dur 300) діаметром 1,5 дюйма використовується в Німеччині для відновлення зношених деталей

автомобільних двигунів. Основний шар напилюється дротом такого ж діаметру марки Dur 600. Електродугове напилення з порошковим дротом (з молібденом як підшаром, дротом рульового типу і тиском повітря в металізаторі) в Румунії відновлює тріщини в блоках циліндрів і посадочних місцях підшипників ковзання. Міцність зчеплення при цьому становить 80 МПа. Відновлення зношених деталей в Британії та Німеччині передбачає використання хромонікелевого дроту, як показано [25]. У США для відновлення зношеної шийки вала використовується той самий матеріал підшару, що й основне покриття з мартенситної сталі, яка відома своєю чудовою зносостійкістю та низькою усадкою. При температурі дуги 3800-4000° основний шар піддається напиленню струмом 300 А і 13,6 кг/год, а підшари піддаються впливу більш низького тиску повітря. Вивчаючи технології, доступні для відновлення деталей, стає очевидним, що основним засобом покращення адгезії покриттів до основи є введення більшої кількості проміжних шарів з кращими властивостями адгезії. Найбільш ефективним показником є застосування молібдену [35,36]. ]. Незважаючи на це, його використання може погіршити певні робочі характеристики компонентів. [43] Необхідні додаткові дослідження для встановлення доцільності використання проміжного молібденового шару для відновлення компонентів, які працюють з підвищеними навантаженнями. Незважаючи на те, що метод електродугової металізації широко використовується для відновлення різних вузлів машин, залишається складним завданням отримання високоякісних покриттів для навантажень двигунів [17,20]. Цей вид нанесення покриття вимагає особливої уваги. Дослідники проаналізували дані про міцність зчеплення різних покриттів з основою, яка коливається між 14-18 і 60-80 МПа [21]. Немає узгодженості щодо того, чи напилені матеріали відповідають чи не відповідають зносостійкості. Тому необхідно досліджувати механізми формування структур під час електродугової металізації покриттів, які виявляють високу адгезійну міцність.

## Висновки, мета та завдання дослідження

Висновки можна зробити на підставі вивчення працездатності найбільш навантажених, відповідальних і дорогих вузлів автотракторних двигунів, зміни їх якісних показників у процесі експлуатації та після відновлення та аналізу літературних джерел.

1. Через складну конструкцію, наявність численних концентраторів напружень та специфічних умов експлуатації, що є результатом змінних навантажень, блок-картери двигунів є особливо складними для роботи через високі вимоги до якості. При таких високих цінах вкрай важливо використовувати ефективні методи їх ремонту та відновлення.

2. Високоміцний чавун зі сферичним графітом є найбільш часто використовуваним типом чавуну для виготовлення таких деталей. Утворення мартенситу та ледебуриту, які є твердими та крихкими структурними компонентами, є звичайним результатом високотемпературної термічної обробки таких матеріалів. Це призводить до утворення тріщин. Процеси високотемпературного наплавлення та зварювання не підходять для традиційних методів відновлення в цій ситуації. Проблема вибору технології відновлення, яка зберігає високу якість без надмірного нагрівання, коли загартовані структури утворюються в зоні термічного впливу та зменшують ефективний поперечний переріз і міцність на втому, стає все більш актуальною.

3. Найбільш придатним методом для досягнення цієї мети є електродугова металізація, яка має низьку зону теплового впливу і не впливає на структуру відновлених деталей. Використання електродугової металізації як методу нанесення покриттів створило значний теоретичний і експериментальний матеріал, але їх застосування для відновлення деталей обмежене недостатньою міцністю з'єднання.

4. Метою роботи є удосконалення блок-картерів двигунів тракторів електрометалізаційним покриттям для підвищення їх довговічності та



експлуатаційної стійкості.

Робота вимагає виконання завдань, які відповідають поставленій меті, а саме:

- встановити рівень адгезійної міцності зчеплення покриття;
- рекомендувати склад покриття;
- визначити технологічні параметри його нанесення.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Критерії оцінки, які дозволили визначити основні експлуатаційні властивості покриття, базувалися на таких факторах, як міцність зчеплення, твердість і коефіцієнти лінійного розширення.

В основу свого рішення поклали апріорні дані та власні експериментальні дослідження, які виявили можливість використання цього покриття для відновлення блок-картерів. Змодельовані експерименти враховують мінімальну різницю в тестуванні між лабораторними та робочими умовами, що визначає, наскільки міцним має бути матеріал покриття щодо основи.

З метою визначення найбільш надійних і відповідних критеріїв оцінки цих властивостей, які відповідають за забезпечення необхідних характеристик блок-картера та управління їх якістю було вирішено врахувати як існуючі, так і потенційні залежності. Вивчення умов роботи та вимог до компонентів призводить до рекомендацій щодо спеціальних методів випробувань для відновлювальних покриттів.

#### 2.1. Матеріал досліджень

Дослідження електродугової металізації проводили на рекомендованому матеріалі для відновлення важконавантажених деталей двигуна – блок-картерів. Ці дизелі були обрані тому, що вони працюють в більш жорстких умовах, ніж бензинові.

Хімічний склад високоміцного чавуну блок-картерів: 3,4-3,6 C, 4,8-5,3 Si, до 0,7 Mn, до 0,06 P, до 0,01 S, 0,05 Mg. Додатково містить 0,3-0,4% Al, 0,08-0,15% Ti.

Хімічний склад рекомендованого покриття: 0,08-0,15 C; до 0,5Si; до 0,8 Mn; до 0,04 P; До 0,02 S. Містить додатково 18-20% Cr ; 2,8-3,7% Al ; 0,8-1,3% Mo ; 0,2-0,4% V ; 0,1-0,3% Ti.

Як матеріал покриття використовувався порошковий дріт на основі феррохромалюмінію, який містив легуючі компоненти Mo, Ti та V. Такий склад дозволяє забезпечити надлишок фаз зміцнення в чавуні, щоб забезпечити необхідну зносостійкість нових деталей під час високого тертя.

Останнім часом для оцінки напружено деформованого стану стало популярним використання магнітних методів та інших неруйнівних методів. У цьому методі вимірюється коерцитивна сила, оскільки вона стійка до пружних навантажень і дуже чутлива до необоротних пластичних деформацій, викликаних механічними навантаженнями.

Цей показник вимірювали методом коерциметрії приладом неруйнівного магнітного контролю КРМ С. Проведено сортування еталонних зразків. За допомогою подвійного намагнічування лабораторна точність вимірювань була збільшена до 0,1 А/см в діапазоні вимірювань 1-20 А%. Для оцінки коерцитивної сили використовувалися два типи зондів: 1 – звичайні у формі прямокутника, 2 – у формі призми. Вимога використання різноманітних зондів була результатом того, що вимірювання виявилися складними в певних ситуаціях, оскільки конструктивні особливості блок-картерів в деяких випадках мають обмежену зону контролю.

Аналогічний метод використовувався для дослідження ефективності додавання молібденового підшару для більш товстих покриттів.

Під час експлуатаційних випробувань оцінювали зміну структури, мікротвердість, інтенсивність зношування, міцність зчеплення.

2.2. Обґрунтування прийнятих методів та типів зразків для оцінки та ідентифікації фазового складу покриття та перехідної зони

Відповідно до поставлених завдань та прийнятих методів дослідження готували зразки, що характеризують властивості основного матеріалу та покриття на різних ділянках блок-картеру виготовлених з високоміцного чавуну дизельних двигунів. Вирізку зразків робили механічним способом тонкими абразивними відрізними колами при рясному охолодженні.

Для оцінки мікроструктури і кінетики формування шару при проведенні досліджень відбір проб здійснювали з ділянок з площею поверхні 3-6 см<sup>2</sup>, висотою 2 см, що включають області з нанесеним покриттям, перехідною зоною і основним матеріалом. Загальна кількість зразків, що відбираються, визначали з розрахунку 3 проби на кожне поєднання покриття - підкладка (покриття - високоміцний чавун). Приготування шліфів здійснювали за методиками, широко освітленими у літературі [56,57,58]. Як реактив для травлення використовували 4%-ний розчин пікринової кислоти в етиловому спирті.

Спеціально розроблені покриття наносили на зразки невеликої товщини, щоб компенсувати 0,5 міліметра (мінімальний знос). Шар очищали та відпалювали при температурі 200-250°C протягом 1 години 15 хвилин, відповідно, для стабілізації його структури та зниження робочих напружень перед розпиленням. При тиску близько 0,5 - 0,05 МПа і швидкості повітряного потоку 2,5 міліметрів на хвилину картер піддавали дробоструменевій обробці 0,2-10,0 мікрон розплавленого чавуну та кварцового піску. Діапазон 130-150 мм розглядався як відстань обробки. Діапазон робочих температур був встановлений між 55 і 70°C для використовуваної суміші. Різниця в часі перед напиленням або після струминної обробки була визначена для досягнення бажаного результату з точки зору рекристалізації на деформованій поверхні та уникнення будь-якої шкідливої оксидної плівки, яка могла б не прилипнути до неї ще раз, зберігаючи оригінальну поверхню. Найбільш підходящий термін - 1,5-2 год. В якості основи для шару використовувався стаціонарний пристрій EM 17 (див. рис. 1 і 2). Напруга дуги 30 В, тиск повітря 0,6 і 0,7 МПа, швидкість подачі дроту 2,0 і 2,5 м/хв, і відстань напилення (170-190 мм), використовували

для зміни технологічних режимів, при цьому не піддавалися високим температурам, покриття на зразку формувалося за 6 проходів з часовими інтервалами, що знижували температуру субстрат до 30°C.

Враховуючи, що структура і фази, що утворюються в покритті, значною мірою визначають робочі характеристики матеріалу, важливо було знати, наскільки надійним є їх склад. Для визначення інтегральності фізико-механічних властивостей покриття виміряли його макротвердість.

Ідентифікація структурних компонентів була досягнута за допомогою оптичної мікроскопії з використанням мікроскопа МІМ 7.

Твердість вимірювалася за принципом механічної подібності, який вимагає, щоб усі відбитки на будь-якій глибині вдавнення були отримані з геометричним подібності. Цій умові в основному задовольняють конічні або пірамідальні наконечники.

Внаслідок пластичної деформації, що виникає в покриттях за рахунок різного об'єму фази та структурних компонентів, макротвердість є не адитивною властивістю, тому для підтвердження висновків необхідно провести додатковий експеримент.

Одночасно вимірювання мікротвердості монокристалічних структурних компонентів нанесеного покриття дозволило диференціювати ці компоненти та оцінити їх внесок у сукупність отриманих властивостей.

Для вимірювання мікротвердості використовували метод відновлювального відбитка.

### 2.3. Обґрунтування прийнятого методу для оцінки міцності зчеплення матеріалу покриття з основою

Якість відновлення при електродуговій металізації зношених деталей в першу чергу визначається міцністю зчеплення покриття з основним металом.

Дослідження існуючих методів оцінки зв'язку між покриттям і основним металом дозволяє розділити їх на випробування на відрив, зсув, механічні та інші випробування.

Відсутність стандартної методології та різноманітні та взаємозалежні фактори, які впливають на зв'язок між покриттям і основою, ускладнюють і іноді непрактично порівнюють дані різних дослідників щодо різних зразків, покриттів, розмірів і форм. Крім того, використання штифтових методів при електродуговій металізації зі значними порами характеризується заниженням результатів. Вибір клейової композиції та глибини її просочення є методом проб і помилок, що впливає на визначений параметр міцності адгезії [48]. Розмір зразка є істотним обмеженням більшості цих методів вимірювання міцності його покриття з основою [25]. Масштабний коефіцієнт може знизити руйнівні напруження в окремих методах майже в 2 рази [36], що є неприпустимим при оцінці доцільності нанесення покриттів на екологічно чисті деталі. Це спостерігалось за деякими винятками.

Для визначення міцності адгезії покриття використовували випробування на зсув як методику. Незважаючи на можливість невизначеності результатів випробувань, цей метод набув широкого поширення через нерівномірність розподілу по нерегульованих довжинах циліндричної частини зразка та простоту виготовлення та випробувань. Крім того, це дозволило порівняти з висновками інших дослідників [36,48].

Матриця була виготовлена з твердістю до 60 HRC. Був присутній шар товщиною 2-2,5 мм. Зразки мали кінці, орієнтовані горизонтально». У матриці проточували канавку діаметром 1 мм і розташовували під кутом  $0,5^\circ$ , щоб запобігти переміщенню зразка в горизонтальній площині під час випробувань. Водночас зразок h7 мав допуск на діаметр H7. Розрахувавши кількість тестів, необхідних для комбінації покриття та чавуну, вони визначили відповідну кількість. Випробування проводили на гідравлічному пресі. Щоб визначити похибку дослідів, потрібно було обчислити середню квадратичну похибку. Де ми знайшли середнє значення, де кількість вимірювань і відповідне їм

значення. Для обчислення середньої квадратичної похибки результату була використана формула  $\Delta S = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (\bar{a} - a)^2\right) / (n(n-1))}$ . Коефіцієнт достовірності становив 0,95, а межі довірчого інтервалу визначали за допомогою коефіцієнта Стьюдента. Похибка відносного вимірювання становила не більше 5%.

## Висновки

1. Метод дослідження включав аналіз структури та властивостей покриттів, а також врахування як матеріалу, так і параметрів, які використовуються в процесі електрометалізації.

2. Запропоновано методи оцінки адгезійної міцності покриття шляхом вивчення умов роботи, вимог, зразків і випробувань. На спеціальних зразках вимірювали міцність на зсув, щоб визначити, чи зчепилося покриття з основою. Випробування проводили на пресі з використанням спеціально розроблених матриць.

3. Структуру і властивості покриття досліджували безпосередньо на високоміцних чавунних блок-картерах. Для отримання покриття використовували електродугову металізацію порошкового дроту з використанням ферохромалюмінію та додаткових контрольних компонентів Mo, Ti, V. Проведено порівняння якості покриттів із застосуванням сучасних методів дослідження, включаючи оцінку мікротвердості та металографічний аналіз.

## РОЗДІЛ 3

### ОЦІНКА УШКОДЖЕНОСТІ БЛОК-КАРТЕРІВ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ, ЩО НАДХОДЖУЄТЬСЯ В КАПІТАЛЬНИЙ РЕМОНТ. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ. ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ, ЩО ПЕРЕД'ЯВЛЯЄТЬСЯ ДО МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТЯ

3.1. Ушкодження чавунних блок-картерів. Аналіз можливості їх відновлення шляхом формування електрометалізаційного покриття

Серед корпусних деталей доводиться 50-70% всієї маси двигуна, у своїй зниженні їх надійності під час експлуатації призводить до істотного скорочення ресурсу двигуна загалом.

Як було показано в огляді інформаційних матеріалів (див. розділ 1), умови роботи найдорожчої з корпусних деталей – блок-картера [1-5], відрізняються дією високих навантажень від сил інерції та тиску газів у циліндрах, підвищених температур та значних термічних напружень. Тому в період експлуатації виникає та розвивається ряд дефектів, усунення яких можливе лише при проведенні капітального ремонту (рис. 3.1).

Для оцінки можливості відновлення дефектів блок-картерів, що надходять після експлуатації методом електродугової металізації, була проаналізована вибірка, що складається з 30 деталей.

Встановлено, що найбільший вплив на зниження ресурсу блок-картеру надають такі дефекти, як знос, неспіввісність, пошкодження постіль корінних підшипників; тріщини, пробоїни в блоці, а також пошкодження різьблення шпильок та різьбових отворів, обрив шпильок. Загальний обсяг зазначених дефектів для дослідженої вибірки становить 95%. Усунення несправностей, що увійшли до перших трьох груп дефектів (рис. 3.2) традиційно виробляють методами механічної обробки з постановкою ущільнювального кільця у разі усунення корозії та зносу посадкових місць під нижній пояс гільзи циліндрів



та заміною шпильок, встановленням різьбових спіральних вставок різьбових отворів [19].

Тріщини на перемичках між посадковими місцями під гільзи циліндрів становлять 52% від обсягу четвертої групи дефектів, що усуваються методом зварювання. Виявлено пробоїни та тріщини на стінках водяної сорочки та нижньої частини блок-картеру (див. рис. 3.1). Повторюваність такого дефекту в загальному обсязі вибірки склала 7,7%, усуваються у більшості випадків за допомогою епоксидних композицій та накладання латок (рис. 3.3), що не завжди забезпечує достатній рівень якості відремонтованої деталі. Ремонт дефектів, що виходять на робочі поверхні, не проводиться [20].

Серед дефектів, що входять до останньої групи та мають найбільший вплив на зниження ресурсу деталі можна виділити такі (рис. 3.4): неспіввісність опор під вкладиші корінних підшипників (19%), усувається розточуванням; пошкодження гнізда корінного підшипника, відновлення якого можливе нанесенням електromеталізаційного покриття (27%); знос, овальність і конусність поверхонь під вкладиші корінних підшипників (54%), що частково також усуваються методом електродугової металізації (до 15%).

Загальна кількість дефектів блок-картерів, усунення яких можливе методом електродугової металізації, обсягом досліджуваної вибірки становило 35,75%. Однак розробка технології відновлення зазначених дефектів вимагає визначення матеріалу покриття, що найбільш повно відповідає вимогам експлуатації.

### 3.2. Вимоги до матеріалу покриття.

Складна робота більшості блок-картерів, спричинена змінними навантаженнями від згинання та крутних моментів, які чергуються між ними, і значними змінами робочих температур під час експлуатації, викликала необхідність визначення та оцінки основних вимог до матеріалу покриття, необхідного для усунення дефектів у цих частинах.

В процесі експлуатації матеріал блок-картеру має значні температурні навантаження. Перевірка величини напружень, створених зміною когезії лінійного розширення між основою та покриттям, особливо актуальна при певних робочих температурах.

Оскільки методи, які використовуються для розрахунку температури та напружено-деформованого стану картера, є складними та вимагають складних розрахунків, у першому наближенні оцінено, що це викликано різними коефіцієнтами лінійного розширення для пластини що складається з покриття та серцевини. Для аналітичної оцінки використовували теорію термопружності. Припускаючи відсутність температурного градієнта, також припустили, що на коефіцієнт Пуассона, модуль пружності та коефіцієнт теплового розширення є константами для температурного інтервалу до 400°C. Це узгоджується з максимальною температурою для більшості термічно навантажених частин двигуна. Як правило, навантажені частини в досліджуваних випадках мають діапазон робочих температур 220-240°C або менше. Контакт між моторним маслом і робочими поверхнями призводить до розвитку утворення окисних плівок або навіть сажі при перевищенні цих температур.

Оцінку напружень у покритті проводили за формулою [62]:

$$\sigma_1 = \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{\frac{h_1}{h_2} E_1 (1 - \mu_2) + E_2 (1 - \mu_1)}, \quad (3.1)$$

де  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коефіцієнти термічного розширення покриття та основи, 1/°K;  $E_1$  и  $E_2$  - модулі пружності покриття та основи, Па;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - коефіцієнти Пуассона покриття та основи;  $T$  - температура, °K;  $h_1$  и  $h_2$  - товщина покриття та основи, м.

З урахуванням прийнятих обмежень ця формула дає похибку не більше 10%. На основі аналізу було визначено, що зміна коефіцієнтів лінійного розширення між матеріалом покриття та основою в  $1 \times 10^{-6}$  1/° K є результатом

збільшення, яке спостерігається лише при вищих температурах понад 18 МПа. Щоб вибрати ідеальний матеріал, необхідно прагнути досягти найбільш тісного зв'язку між цією характеристикою та коефіцієнтом лінійного розширення основного матеріалу, не дозволяючи напругам, які виникають у його робочому матеріалі, перевищувати його адгезійну та когезійну міцність.

Щоб забезпечити безперебійну роботу важливих компонентів двигуна при змінних навантаженнях, необхідно підтримувати п'ятикратний запас міцності від максимального навантаження 16 МПа, про що свідчить аналіз багатьох робіт. Отже, міцність зчеплення на зсув з основою повинна бути принаймні 80 МПа.

### 3.3 Моделювання температурних напружень при використанні запропонованого покриття в середовищі SolidWorks Simulation

Виконали розрахунок температурних напружень модельного зразка з запропонованим покриттям (циліндра з нанесеним покриттям) в SolidWorks.

Для розрахунку пройшли декілька етапів створення, підготовки та тестування моделі.

1. Створили 3D-модель зразка. Використовували інструменти для створення геометричних об'єктів, додали матеріал і фізичні властивості до моделі.

2. Встановили граничні умови для зразка. Вони включали фіксацію областей стрижня та покриття, які залишаються незмінними і визначили теплове навантаження - температурне поле на інших частинах зразка.

3. Створили задачу термічного аналізу в SolidWorks Simulation - визначили тип аналізу (статичний аналіз термічного поля) та встановили властивості симуляції, такі як розміри сітки, параметри розрахунку.

4. Виконали розбиття 3D-модель на скінчені елементи для проведення теплового аналізу.

Model name: Collared Shaft Assembly  
Study name: Thermal Stress(-Default-)  
Plot type: Mesh Quality1

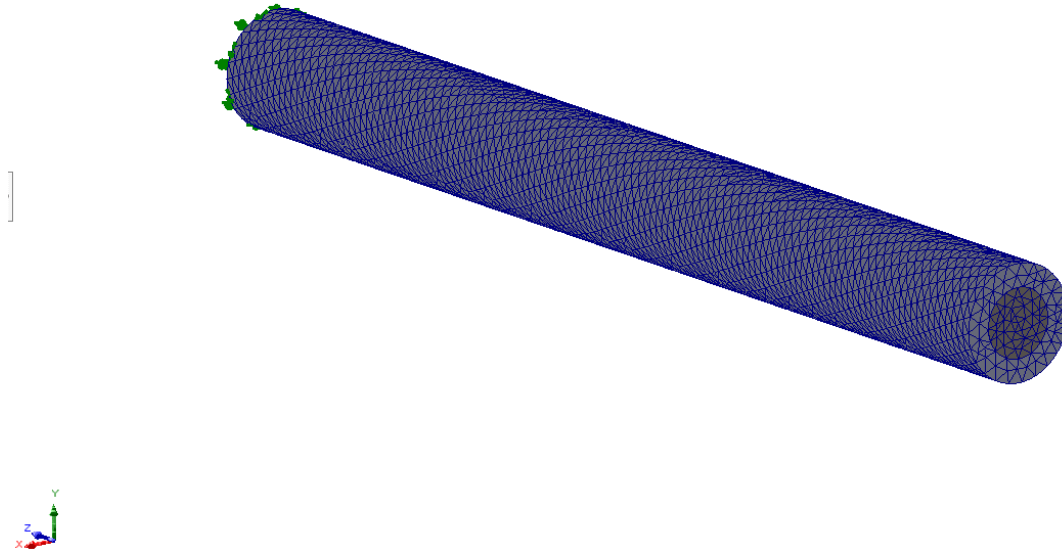
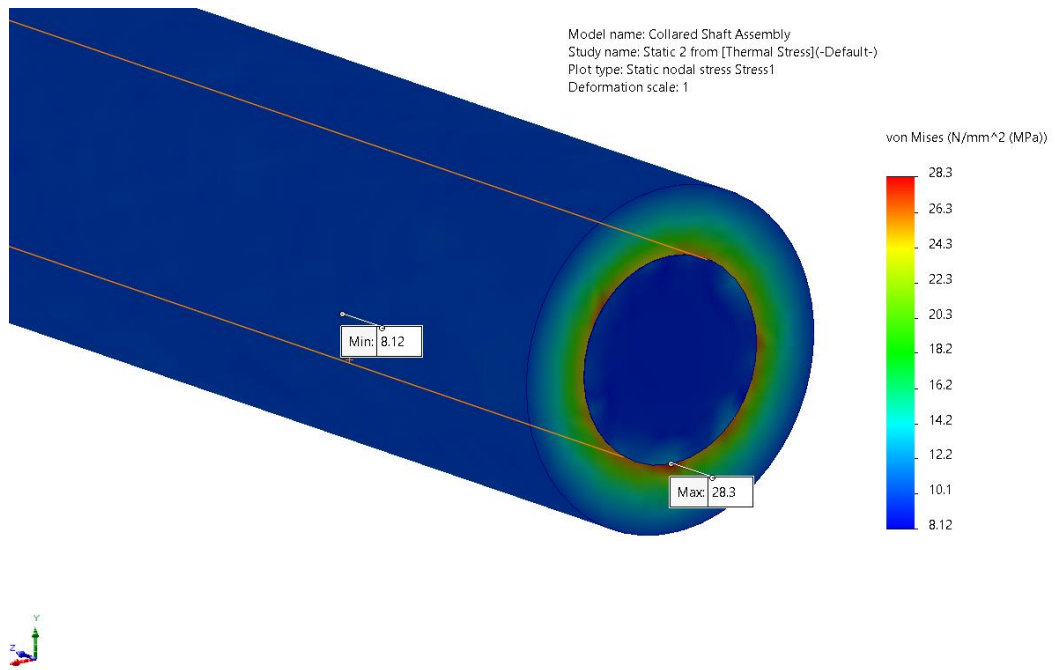


Рис.3.1. Модельний зразок з сіткою кінцевих елементів

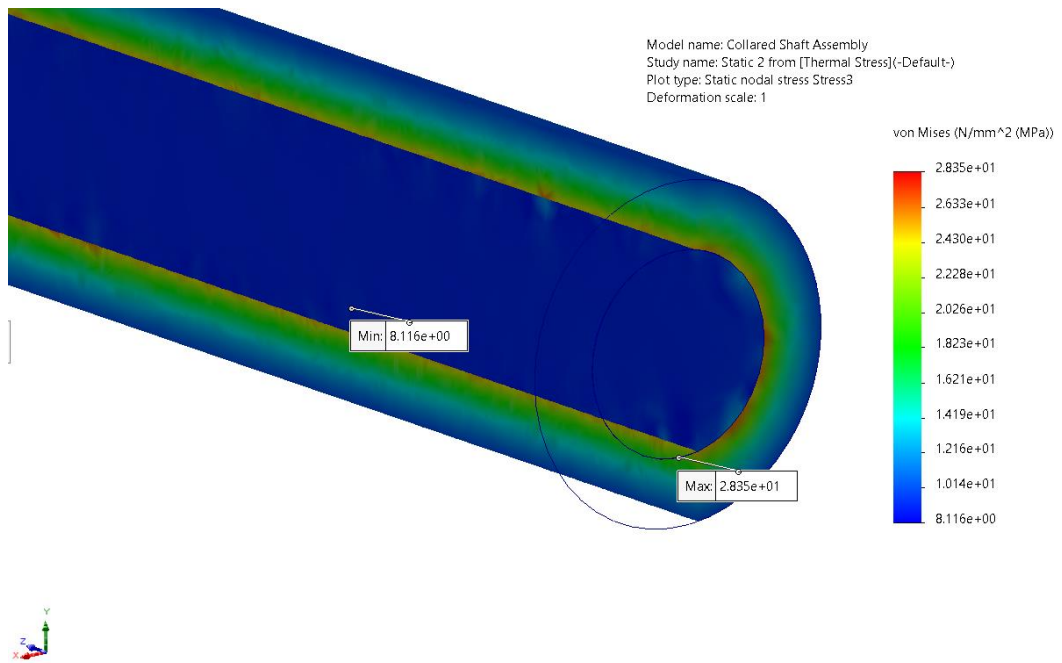
5. Уточнили температурні умови для теплового навантаження, які можуть включати додавання температури.

6. Запустили тепловий аналіз в SolidWorks Simulation. Програма розрахувала температурний розподіл та визначила термічні напруження та деформації в зразку.

7. Після завершення аналізу оцінили результати, включаючи термічні напруження та деформації. Переконалися, що рівень напружень є близьким до аналітичного розв'язку.

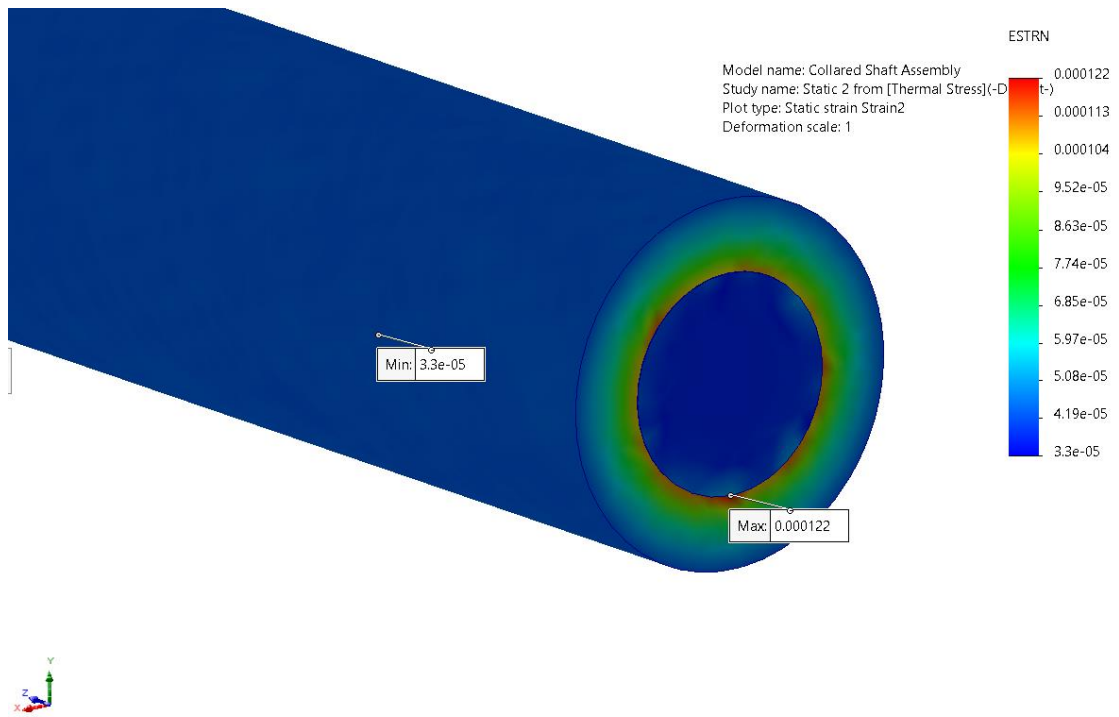


a)

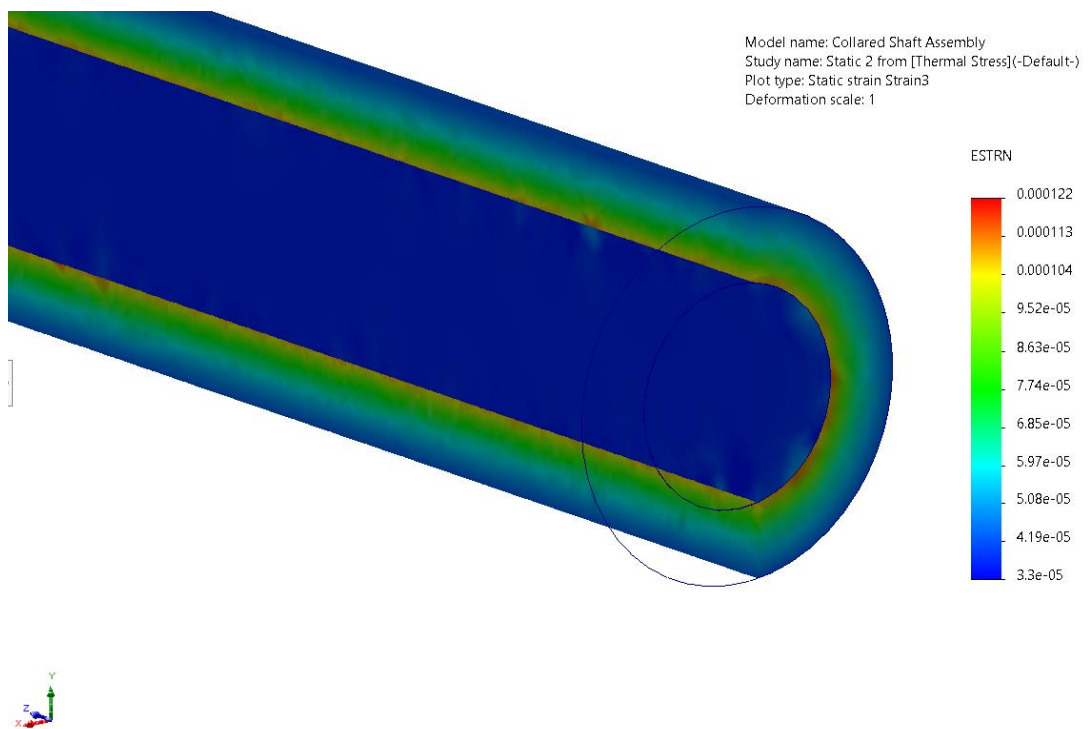


б)

Рис.3.2. Розподіл напружень, оцінених за критерієм Мізеса модельного зразка: а – загальний вигляд; б – переріз зразка



a)



б)

Рис.3.3. Відносне подовження модельного зразка: а – загальний вигляд;  
 б – переріз зразка

### Розділ 3.4 Оцінка рекомендованого покриття

На склад і структурний стан електрометалізаційних покриттів впливає не тільки хімічний склад матеріалу, що наноситься, але і особливості технології його формування. Особливо важливою задля досягнення найкращих експлуатаційних властивостей є обрана система легування.

В даний час найбільш поширеними є сплави на основі заліза і хрому, що мають оптимальне поєднання вартість-якість. Такі компоненти, як V, W, Ti, Mo, Al застосовують у значно менших концентраціях, ніж Fe, Cr. Разом з тим їхня присутність дозволяє істотно впливати на властивості матеріалу покриття.

Аналіз хімічного складу різних наплавочних зносостійких сплавів показав, що практично всі вони мають закритичну ступінь легування карбідоутворюючою компонентами. Це означає, що в них практично весь вуглець пов'язаний з карбідами з легуючими елементами. Зі збільшенням ступеня легування відбувається виділення тих самих типів карбідів, але з більшою концентрацією в них карбідоутворювального компонента. Встановлено, що хромисті покриття з кубічним карбідом типу мають високий ступінь зносостійкості, а також, що за наявності од-ного і того ж типу карбіду властивості покриттів дещо різняться залежно від ступеня його легування. Так, збільшення вмісту хрому в карбіді на 4% при практично однаковій концентрації вуглецю, і вмісту карбідів в обсязі нанесеного покриття призводить до збільшення коефіцієнта зносостійкості на 2%. Істотне підвищення вмісту хрому у покритті сприяє також легування матриці.

Аналіз хімічного складу матеріалів, що застосовуються при відновленні деталей та вузлів тертя ковзання з мастилом методом наплавлення відкритою дугою із застосуванням різних порошкових дротів показав, що вміст вуглецю для таких матеріалів обмежують 0,15-0,30% за масою. При цьому матеріали, що мають вміст вуглецю в зазначених межах, відрізняються високою зносостійкістю і хорошим опором удару. У сукупності це визначає ефективність використання матеріалів умовах складного навантаження.

Підвищення вмісту вуглецю сприяє значному зниженню стійкості матеріалу до знакозмінних навантажень, що призводить до фарбування покриття при експлуатації [63]. Тому доцільним є обмежити вміст вуглецю у складі матеріалу покриття на рівні 0,15%, а підвищення зносостійкості досягти за рахунок додаткового легування фериту і формування твердих дисперсних виділень зміцнювальних фаз.

Для моделювання умов лабораторного експерименту нанесення покриття, що максимально наближається до промислової обробки, використовували зразки зі сталі 40X.

Перед металізацією зразки очищали та відпалювали при 200-250°C протягом 1-1,5 год. для стабілізації структури робочого шару та зняття напруги. Відпалені зразки були піддані дробеструйній обробці при тиску 0,5×0,05 МПа і швидкості потоку повітря 2,5 м<sup>3</sup> / хв. Обробку проводили за режимами.

Внаслідок проведених досліджень встановлено, що середній хімічний склад покриття відповідає 0,08-0,15% С; 18-20% Cr; 2,8-3,7% Al; 0,8-1,3% Мо; 0,2-0,4% V; 0,1-0,3% Ті. Вміст кремнію та марганцю не перевищував 0,5% та 0,8% відповідно.

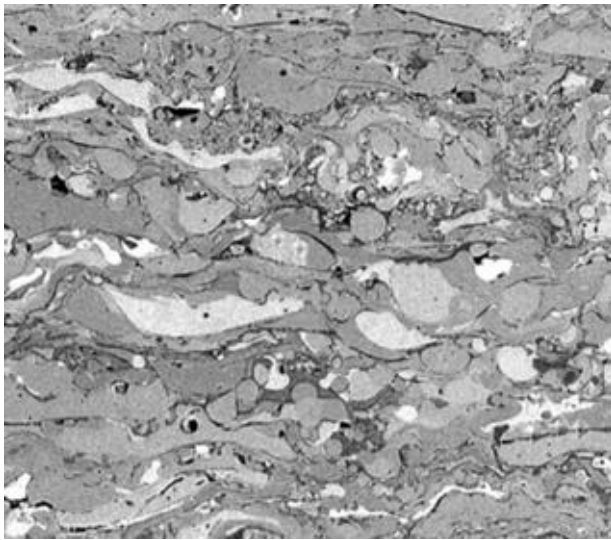
Мікроскопічні дослідження виконали на травлених та нетравлених шліфах. Аналіз нетравлених шліфів, вирізаних з колінчастого валу після нанесення покриття проводили за перерізом шару (рис. 4.1). У мікроструктурі покриття виявили шарувату його будову, наявність пір і оксидів. Взаємодія розпилюваного матеріалу з киснем, що міститься у повітрі, призвело до істотного збільшення вмісту оксидів у покритті. Виявлено, що кисень і продукти взаємодії матеріалу, що розпилюється, з навколишнім середовищем знаходяться переважно в шарах покриття у вигляді тонких плівок, розподілених як по межах крапель, так і всередині їх у вигляді округлих, добре полірованих включень.

Для оцінки пористості та несплошності покриття вихідне зображення мікروشліфа аналізованого зразка (збільшення ×100) було переведено в

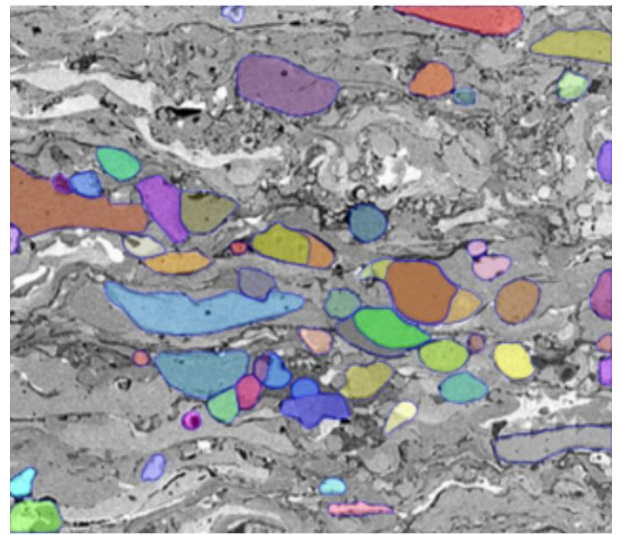


масштабі 1:1 в електронний вигляд та оброблено за допомогою універсальних програмних засобів. Візуалізовану поверхню покриття умовно розділили на ряд секторів розміром  $10 \text{ мкм}^2$ . Для досліджень виконали вибірку, що складається із 10 елементів. Як оцінний критерій був прийнятий певний візуально градієнт чорного кольору неpolірованих чорних зон. Для кожного сектора визначили відсоток їхньої заповненості таким чорним кольором. Результат дослідження було визначено як арифметичну суму. Оцінене значення пористості та несплошності для цього покриття склало 12%.

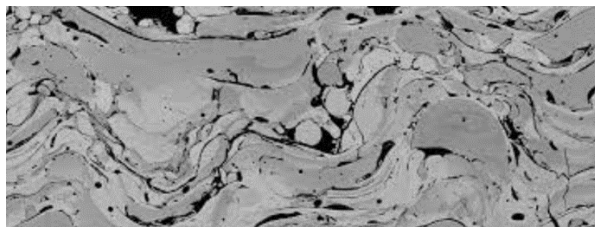
Для сегментації зображень мікроструктур матеріалів використовували нейронну мережу, що базується на Deep Learning. Спочатку виконали підготовку даних - завантажили зображення мікроструктур, як попередньо обробили - нормалізували, підвищили контраст. Виконали ручну анотація зображень для створення навчального набору даних, виконали маркування різних структур у мікроструктурах матеріалів (виділили найбільш зміцнені фази). Вибрали найбільш поширену для сегментації зображень U-Net нейронну мережу. Налаштували її гіперпараметри та виконали тренування моделі. Виконали розбиття даних на навчальний та тестовий набори. Після тренування та апробації на тестовому наборі даних - виконали валідацію моделі. Результати сегментації зображень представлено внизу.



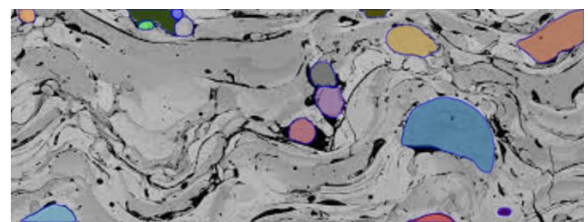
а)



б)



в)



д)

Рисунок 3.4 - Мікроструктура покриття, що рекомендується: а, б – нанесений шар, режими: напруга дуги 25-30 В, тиск повітря - 0,6-0,7 МПа, швидкість подачі дроту 2-2,5 м/хв, відстань від зрізу сопла металізатора до поверхні деталі, що відновлюються 100-120 мм,  $\times 100$ ; в, д – покриття нанесене традиційним зварювальним дротом; а, в – похідна мікроструктура; б, д – ,  $\times 400$

### Висновки

1. В результаті проведеної оцінки причин виходу з експлуатації, що надходять у капітальний ремонт блок-картерів автотракторних двигунів встановлено, що основними групами дефектів, що становлять до 95% від загальної кількості деталей, є: раковини кавітаційного впливу на нижньому посадковому пояску під гільзу циліндра, змінання, деформація паска - 2%; знос, вибоїни на торцевій поверхні гнізда блок-картер під бурт гільзи - 3%; пошкодження різблення шпильок та різбових отворів, обрив шпильок – 12%; тріщини, пробоїни у блоці – 16%; знос, неспіввісність, пошкодження постіль

корінних підшипників – 67%. При цьому загальний рівень дефектів, усунення яких можливе шляхом нанесення покриття методом електродугової металізації, становить - 36%.

2. На підставі аналізу умов роботи та пошкодження блок-картера сформульовані основні вимоги, що пред'являються до якості покриття.

Мінімальні відмінності коефіцієнтів лінійного розширення між матеріалом покриття та основою необхідні для запобігання утворенню значних напружень при експлуатації деталей, що перевищують межі адгезійної та когезійної міцності. Використовуючи результати теоретичної оцінки, які підтверджені даними моделювання, можна оцінити ефективність покриття, використовуючи зміну коефіцієнтів лінійного розширення  $1 \times 10^{-6} 1/^\circ \text{K}$  в межах робочих температур навантажених частин, що може призвести до збільшення до 18 МПа.

3. Міцність з'єднання становить мінімум 80 МПа, щоб задовольнити другу умову. Цей показник визначається з урахуванням 5-кратного запасу міцності, який реалізується для більшості критичних деталей.

## ВИСНОВКИ:

1. Складна конструкція блок-картерів автотракторних двигунів, наявність великої кількості концентраторів напружень, а також специфічні умови роботи, що відрізняються знакозмінними навантаженнями, зумовлюють значні вимоги до їх якості. Тому, враховуючи значну вартість цих деталей, важливим є використання ефективних матеріалів для їх відновлення.

2. На підставі аналізу умов експлуатації, вимог до них, а також дослідження використовуваних типів зразків та видів випробувань, запропоновано методи оцінки покриття на міцність зчеплення.

3. Розроблено основні вимоги до матеріалу покриття та технології його нанесення: різниця в коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу покриття та основи не повинна бути більшою за  $1 \cdot 10^{-6} 1/K$  в межах температур експлуатації, тобто напруження не повинні перевищувати 18 МПа; міцність зчеплення на зсув повинна не бути меншою за 80 МПа.

Запропоновано склад покриття, що задовольняє такі умови, містить такі компоненти: 0,08-0,15% С; 18-20% Cr; 2,8-3,7% Al; 0,8-1,3% Мо; 0,2-0,4% V; 0,1-0,3% Ti; до 0,5% Si; до 0,8% Mn. Таке покриття повністю задовольнило вимогам з врахуванням 5-кратного запасу міцності.

## СПИСОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія машинобудування. Основи отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : підручник / А. О. Андрєєв, В. М. Павленко, Ю. О. Сисоєв ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т". - Харків : ХАІ, 2018. - 287 с.
2. Коливання механічних систем в автомобіле- та тракторобудуванні [Текст] : навч. посіб. для студентів спец. "Галузеве машинобудування" / Кожушко Андрій Павлович ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". - Харків : Панов А. М. [вид.], 2018. - 315 с.
3. Розвиток процесів забезпечення інвестування підприємств сільськогосподарського машинобудування [Текст] : монографія / О. В. Мороз, Н. П. Карачина, А. В. Вітюк ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2018. - 183 с.
4. Теорія двигунів [Текст] : навч. посіб. для студентів та викладачів фах. передвищ. та проф. освіти спец. 133 "Галузеве машинобудування" спеціалізації "Виробництво, сервісне обслуговування, експлуатація двигунів внутрішнього згоряння" / С. О. Якушенко, О. М. Сорокін, А. М. Будяцький ; Одес. нац. політехн. ун-т, Херсон. політехн. коледж (базовий ВНЗ I-II р. а. Херсон. обл.). - Одеса : Бахва, 2017. - 211 с.
5. Інформаційно-діагностична система імпульсного вихрострумовео неруйнівноо контролю виробів машинобудування [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Лисенко Юлія Юрїївна ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ, 2017. - 28 с.
6. Оцінювання ефективності проектних рішень [Текст] : навч. посіб. для студентів спец.: 122 "Комп'ютерні науки та інформаційні технології", 131 Прикладна механіка", 133 "Галузеве машинобудування", 136 "Металургія", 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / І. Ю. Єрфорт, Ю. В. Дегтярьова, О. Ю. Єрфорт ; Донбас. держ. машинобуд. акад. (ДДМА). - Краматорськ : ДДМА, 2017. - 211 с.

7. Теорія технічних систем [Текст] : навч. посіб. для студентів спец. 133 - "Галузеве машинобудування" / Нац. ун-т. біоресурсів і природокористування України, Каф. конструювання машин і обладнання ; [уклад.: В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич]. - Київ : Компринт, 2017. - 291 с.

8. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни "Оптимізація режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння" для студентів спеціальності 142 "Енергетичне машинобудування" (спеціалізація "Двигуни внутрішнього згоряння") денної та заочної форм навчання [Текст] / Наливайко В. С., Авдюнін Р. Ю., Мисько В. О. ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. - Миколаїв : Торубара В. В. [вид.], 2017. – 27

9. Основи комп'ютерного проектування ДВЗ [Текст] : навч. посіб. для поглибл. вивч. курсу та отримання практ. навичок при створенні мат. моделей процесів ДВЗ та конструкцій окремих вузлів і деталей для студентів спец. 142 "Енергетичне машинобудування" (спеціалізація "Двигуни внутрішнього згоряння") / Наливайко В. С. [та ін.] ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. - Миколаїв : Торубара В. В. [вид.], 2017. – 135

10. Технологічні основи машинобудування [Текст] : навч. посіб. для студентів ВНЗ спец.: 131 "Прикладна механіка"; 133 "Галузеве машинобудування"; 142 "Енергетичне машинобудування"; 015 "Професійна освіта (транспорт)" / Дмитриченко М. Ф. [та ін.] ; Нац. трансп. ун-т. - Київ : НТУ, 2017. - 208 с.

11. Інженерна та комп'ютерна графіка [Текст] : навч. посіб. : для студентів ден. та заоч. (дистанц.) форм навчання для спец.: 015 "Професійна освіта", 182 "Технологія легкої промисловості", 131 "Прикладна механіка", 133 "Галузеве машинобудування"Ю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", 152 "Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка"Ю 171 "Електроніка" / Ю. А. Ковальов, Д. А. Макатьора ; Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. - Київ : КНУТД, 2016. - 282 с.

12. Основи теорії та динаміки автомобільних двигунів [Текст] : підруч. для студентів ВНЗ, які навчаються за спец. "Галузеве машинобудування" / В. Ф. Шапко, С. В. Шапко ; Кременчуц. нац. ун-т ім. Михайла Остроградського. - Харків : Точка, 2016. - 231 с.

13. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості [Текст] : навч. посіб. для студентів ВНЗ напрямів підгот. 6.010104 "Професійна освіта", 6.050503 "Машинобудування", 6.070106 "Автомобільний транспорт", 6.050501 "Прикладна механіка" / С. С. Дяченко [та ін.] ; Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. - Харків : ХНАДУ, 2016. - 347 с.

14. Вибір раціональних співвідношень розмірів деталей та розрахункове дослідження процесів двигуна за допомогою методів комп'ютерного проектування [Текст] : метод. вказівки до виконання курс. роботи з дисципліни "Основи комп'ютерного проектування ДВЗ" для студентів спец. 133 "Галузеве машинобудування" (спеціалізація "Двигуни внутрішнього згоряння") ден. та заоч. форм навчання / Ткаченко С. Г., Хоменко В. С., Авдюнін Р. Ю. ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. - Миколаїв : Торубара В. В. [вид.], 2016. – 31

15. Створення та впровадження нового класу евтектичних композиційних матеріалів в інноваційні технології підприємств машинобудування [Текст] : монографія / В. Є. Панарін [та ін.]. - Запоріжжя : Мотор Січ, 2016. - 263 с.

16. Теоретичні основи створення системи автоматизованого управління ризиком для об'єктів машинобудування підвищеної небезпеки [Текст] : монографія / Марченко Д. М., Жидков А. Б. ; Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. - Сєверодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. - 174 с.

17. Проектування заготовок і технології їх виготовлення [Текст] : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підгот. "Професійна освіта. Машинобудування", "Інженерна механіка", "Машинобудування", "Прикладна механіка" / В. Є. Богуславський, В. М. Гарнець, В. О. Шаленко ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. - Київ : КНУБА, 2016. - 139 с.

18. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу) [Текст] : монографія / [Ковалевський С. В. та ін.] ; за заг. ред. д. т. н., проф. Ковалевського С. В. ; Донбас. держ. машинобуд. акад. - Краматорськ : ДДМА, 2016. - 188 с.

19. Операційна діяльність сучасних підприємств машинобудування [Текст] : монографія / В. М. Гриньова, М. Ю. Явдак. - Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. - 219 с.

20. Основи технології машинобудування [Текст] : [навч. посіб.] / О. В. Дерібо ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2013 . Ч. 2. - 2015. - 111 с.

21. Формування окремих складових системи менеджменту підприємств машинобудування [Текст] : монографія / Укр. інж.-пед. акад. ; [за заг. ред. канд. техн. наук, доц. Гусарова О. О.]. - Харків : УПА, 2015. - 141 с.

22. Композиційні плазмові покриття на основі порошків валкових чавунів [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.06 / Шевченко Олександр Володимирович ; Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". - К., 2004. - 20 с.

23. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання [Текст] : підруч. для студентів напрямів 6.050502 - інженерна механіка та 6.050503 - машинобудування / Л. К. Похилько, І. В. Добров ; Нац. металург. акад. України. - Дніпропетровськ : ІМА-прес : НМетАУ, 2015. - 249 с.

24. Технологія сільськогосподарського машинобудування [Текст] : підруч. для вищ. техн. закл. України / Б. М. Гевко [та ін.]. - Вид. 2-ге, перероб. і допов. - Тернопіль : Паляниця В. А., 2015. - 418 с.

25. Автоматизація виробничих процесів [Текст] : навч. посіб. для студентів напряму підгот. 6.050503 "Машинобудування" ден. та заоч. форм навчання / Луц. нац. техн. ун-т ; [уклад.: Ю. Л. Гунько, Ю. В. Федорусь]. - Луцьк : РВВ Луц. НТУ, 2015. - 168 с. :



26. Основи технології машинобудування [Текст] : [навч. посіб.] / Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, [2015]. Ч. 2 : Практикум / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. І. Сухоруков. - 2015. - 115 с.

27. Забезпечення управління ефективністю діяльності підприємств машинобудування [Текст] : монографія / Череп Алла Василівна, Батракова Тетяна Іванівна ; Держ. ВНЗ "Запоріз. нац. ун-т". - Запоріжжя : ЗНУ, 2015. - 203 с.

28. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення [Текст] : навч. посіб. для студентів ВНЗ напрямів підгот. 050502- "Інженерна механіка" та 050503 - "Машинобудування" / Ю. М. Кузнєцов [та ін.]. - Київ ; Кременчук ; Севастополь : Точка, 2014. - 499 с.

29. Технологічні аспекти керування якістю виробів машинобудування [Текст] : монографія / Є. А. Фролов [та ін.] ; [під. ред. Є. А. Фролова] ; Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. - Харків : Щедра садиба плюс, 2014. - 238 с.