

УДК 621.74, 620.1, 621.002.3.001.37, 621.002.3

№ держреєстрації 0122U200394

Інв. №

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002

тел. +38(057) 7003888 <http://btu.kharkov.ua>, [info@btu.kharkov.ua](mailto:info@btu.kharkov.ua)



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи

Валерій МИХАЙЛОВ

**ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**«РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ВИГОТОВЛЕННЯ, ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ,  
НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ»**

**(остаточний)**

Керівники НДР

Завідувач кафедри ІС та ТММ  
д.т.н., проф.

Професор кафедри ІС та ТММ  
д.т.н., проф.


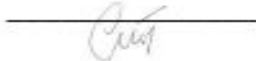

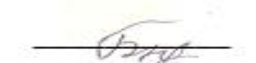

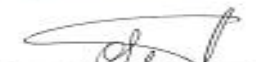
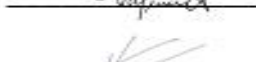






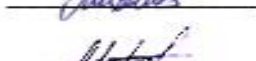

Автухов А.К.

Клочко О.Ю.

Рукопис закінчено 08 грудня 2023 року

Результати цієї роботи розглянуто науково-технічною радою факультету мехатроніки та інжинірингу, протокол № 4 від 12.12.2023 р.

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівники НДР: Завідувач кафедри СІ та ТММ д.т.н., проф. Професор кафедри СІ та ТММ д.т.н., проф.	 	А.К. Автухов (зміст) О.Ю. Ключко (реферат, розділ 2.1)
Розділ 1 Відповідальний виконавець: Професор кафедри СІ та ТММ к.т.н., проф. Виконавці: Доцент кафедри СІ та ТММ доц. Ст. викл. кафедри СІ та ТММ	  	Науменко О.А. (розділ 1.1) В.А. Бантковський (розділ 1.2) С.В. Лисенко (розділ 1.3)
Розділ 2 Відповідальні виконавці: Професор кафедри СІ та ТММ д.т.н., проф. Доцент кафедри СІ та ТММ к.т.н., доц. Виконавці: Ст. викл. кафедри СІ та ТММ к.т.н. Аспірант кафедри СІ та ТММ Аспірант кафедри СІ та ТММ	    	Тришевський О.І. (розділ 2.2) О.Б. Калюжний (розділ 2.3) Л.В. Омельченко (розділ 2.4) О.С. Воронов (розділ 2.1) Є.В. Ковалевський
Розділ 3 Відповідальні виконавці: Доцент кафедри СІ та ТММ д.т.н., доц. Доцент кафедри СІ та ТММ к.т.н., доц. Виконавці: Доцент кафедри СІ та ТММ к.т.н., доц. Доцент кафедри СІ та ТММ к.т.н., доц. Аспірант кафедри СІ та ТММ	    	І.М. Рибалко (розділ 3.1) Є.С. Дерябіна (розділ 3.2) О.В. Тіхонов (розділ 3.1) О.Д. Мартиненко (розділ 3.3) А.В. Захаров (розділ 3.1)

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 137 с., 3 розділи, 175 джерел.

СТАЛІ ТА СПЛАВИ, СТРУКТУРА, ПОКРИТТЯ, ВІДНОВЛЕННЯ, ВИРОБНИЦТВО, ВЛАСТИВОСТІ, ЗМІЦНЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ, ВИРОБИ МАШИНОБУДУВАННЯ, ПОЛІМЕРИ, КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Звіт з науково-дослідної роботи ДР 0121U114471 «Розробка та впровадження технологічних процесів виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин з метою підвищення експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності технічних об'єктів», складається з трьох розділів за напрямками наукової діяльності кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні:

1. Підвищення надійності та довговічності технічних об'єктів за рахунок вдосконалення інфраструктури технічного сервісу, дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах

2. Підвищення надійності та довговічності технічних об'єктів за рахунок дослідження, розрахунку і моделювання технологічних процесів виготовлення та відновлення виробів

3. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей машинобудування

**Об'єкт дослідження** – процеси виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин; підвищення якості та споживчих властивостей матеріалів; підвищення зносостійкості відновлених, зміцнених поверхонь; зменшення витрат матеріальних ресурсів.

**Мета роботи** – підвищення надійності та довговічності технічних об'єктів за рахунок удосконалення інфраструктури технічного сервісу, технологічних процесів виготовлення, відновлення, зміцнення деталей машин із отриманням результатів теоретичних та експериментальних досліджень, щодо підвищення якості та споживчих властивостей матеріалів; зменшення витрат матеріальних ресурсів.

**Методи дослідження** – під час проведення досліджень широко використовували сучасні методи аналізу структури, механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів та покриттів. Для цього застосовували методи та методики теоретичного та експериментального аналізу структури та мікроструктури, оцінку механічних, фізичних та хімічних властивостей, вплив

термічної обробки.

## ЗМІСТ

<b>Розділ 1. Підвищення надійності та довговічності технічних об'єктів за рахунок вдосконалення інфраструктури технічного сервісу, дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах</b>	<b>8</b>
1.1. Обґрунтування інфраструктури технічного сервісу, дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах (проф. Науменко О.А.)	8
Вступ	8
1.1.1. Аналіз останніх досліджень і публікацій	9
1.1.2. Мета, об'єкт і предмет дослідження	10
1.1.3. Матеріали і методи дослідження	10
1.1.4. Обґрунтування інфраструктури технічного сервісу	11
1.1.5. Дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах	15
Висновки	19
Перелік літературних джерел	19
1.2. Оцінка номенклатури деталей машин, що визначають ресурс (доц. Бантковський В.А.)	20
Вступ	20
1.2.1. Постановка завдання і мети досліджень	21
1.2.2. Аналіз останніх досліджень та літератури	21
1.2.3. Результати та обговорення	23
Висновки	31
Перелік літературних джерел	32
1.3. Вивчення вхідних та вихідних параметрів варіаторів комбайнів та розробка рекомендацій для відновлення деталей варіаторів зернозбиральних комбайнів (ст. викл. Лисенко С.В.)	35
Вступ	35
1.3.1. Постановка завдання досліджень	35
1.3.2. Матеріали і методи досліджень	35
1.3.3. Результати та обговорення	36
Висновки	39
Перелік літературних джерел	40

<b>Розділ 2. Підвищення надійності та довговічності технічних об'єктів за рахунок дослідження, розрахунку і моделювання технологічних процесів виготовлення та відновлення виробів</b>	43
2.1. Теоретичне та експериментальне моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей хромовмісних сплавів: Причини і характер деградації карбідної фази в чавунах при експлуатації виробів. (проф. Ключко О.Ю., асп. Воронов О.С.)	43
Вступ	43
2.1.1. Матеріали та методи досліджень	44
2.1.2. Результати досліджень та їх обговорення	46
Висновки	52
Перелік літературних джерел	53
2.2. Розробка методики силового розрахунку універсальних клітей профілезгинального стану (проф. Тришевський О.І.)	57
Вступ	57
2.2.1. Постановка завдання досліджень	57
2.2.2. Аналіз останніх досліджень та літератури	58
2.2.3. Матеріали досліджень	60
2.2.4. Результати та обговорення	61
Висновки	66
Перелік літературних джерел	66
2.3. Теплофізичні властивості об'ємних високопористих полімерних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) (доц. Калюжний О.Б.)	68
Вступ	68
2.3.1. Матеріали і методи дослідження	69
2.3.2. Результати дослідження	71
Висновки	74
Перелік літературних джерел	74
2.4. Підвищення властивостей та експлуатаційної стійкості покриттів при їх модифікуванні вторинною сировиною (ст. викл. Омельченко Л.В.)	77

	9
Вступ	77
2.4.1. Розробка методики отримання вторинної сировини для модифікування рідкої ванни наплавленого шару	77
2.4.2. Матеріали і методи дослідження	78
2.4.3. Постановка завдання дослідження	78
2.4.4. Результати досліджень	78
Висновки	84
Перелік літературних джерел	85
<b>Розділ 3. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей машинобудування</b>	<b>86</b>
3.1. Нові технологічні процеси відновлення деталей наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною (доц. Рибалко І.М., доц. Тіхонов О.В., асп. Захаров А.В.)	86
Вступ	86
3.1.1. Аналіз методів відновлення і зміцнення ріжучих елементів робочих органів ґрунтообробних машин	87
3.1.2 Дослідження впливу кераміки на структуру	91
3.1.2.1. Технологія зміцнення культиваторних лап	91
3.1.2.2. Обладнання для наплавлення	92
3.1.2.3. Вибір режимів наплавлення	93
3.1.2.4. Матеріал для наплавлення	96
3.1.2.5. Дослідження структури покриттів	97
3.1.2.6. Дослідження мікротвердості нанесених покриттів	99
3.1.2.7. Дослідження розподілу компонентів в покритті і перехідній зоні	103
3.1.2.8. Стендові випробування на зношування	106
Висновки	110
Перелік літературних джерел	111
3.2. Вдосконалення технології відновлення деталей шляхом нанесення покриттів газополуменевим напилюванням з використанням механічної обробки (доц. Дерябкіна Є.С.)	115

	10
Вступ	115
3.2.1. Постановка завдання досліджень	116
3.2.2. Активація поверхні металу обробкою щітковим інструментом	116
3.2.3. Вплив щіткової обробки на шорсткість і міцність зчеплення газополуменевого покриття з основою	120
Висновки	126
Перелік літературних джерел	126
3.3. Підвищення довговічності довгомірних деталей шляхом нанесення покриттів методом електроіскрової обробки (доц. Мартиненко О.Д.)	128
Вступ	128
3.3.1. Матеріал і методи дослідження	128
3.3.2. Результати дослідження	129
Висновки	133
Перелік літературних джерел	134



## РОЗДІЛ 1

# ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ, ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ПОТРЕБУ В ЗАПАСНИХ ЧАСТИНАХ

### 1.1. Обґрунтування інфраструктури технічного сервісу, дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах

Виконавець: проф., к.т.н., проф. Науменко О.А.

#### ВСТУП

Розбудова а також відбудова інфраструктури технічного забезпечення сільськогосподарського виробництва займає ключове місце в зростанні ефективності функціонування секторів агробізнесу, територіального розподілу окремих видів технічного сервісу. В теперішній час і найближчій перспективі суттєво загострюється проблема ремонту техніки, яка задіяна в сільськогосподарському виробництві. Це пов'язано перш за все з війною, тимчасовою окупацією територій, значним зменшенням їх оновлення, постачанням вживаних машин та обладнання, пошкодження значної кількості техніки в господарствах, які були в окупації або знаходяться в прифронтовій зоні.

Ефективне і своєчасне виконання ремонтно-обслуговуючих робіт, в таких умовах суттєво залежить від організаційного і технологічного забезпечення відновлення та розбудови бази технічного сервісу (СТО, ремонтних майстерень, технічних центрів, компаній з реалізації запасних частин та матеріалів).

Інтенсивне наповнення сучасними технічними засобами технологічних процесів в сільському господарстві значно випереджає розвиток бази технічного сервісу (обслуговування і ремонту) цієї техніки. І зовсім неприйнятним є той факт. що це змушує сільгоспвиробників викликати службу сервісу з Польщі, Німеччини і навіть Великобританії.

Тому найгострішою проблемою виправлення таких диспропорцій є ство-

рення умов в Україні для забезпечення якості послуг, які надаються сільськогосподарській техніці і транспортним засобам, у відповідності з світовими і європейськими стандартами, а також підвищення ефективності їх використання.

Створення і подальший розвиток мережі об'єктів технічного обслуговування і ремонту пов'язано з реконструкцією, модернізацією, спеціалізацією діючих підприємств, а також з новим будівництвом.

На нинішньому етапі напрямок формування відбудови і розвитку інфраструктури технічного сервісу є безумовно пріоритетною задачею галузі.

#### 1.1.1. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як в Україні, так і за кордоном були досліджені умови і розроблені перспективні напрямки розвитку ремонтно-обслуговуючої бази агропромислового комплексу. На жаль не змогли навести прикладів розробки і практичної реалізації хоча б окремих елементів програми розвитку мережі сервісних підприємств в АПК України.

Концептуальні засади розбудови ремонтно-обслуговуючої бази були сформовані науковцями і практиками ще 2000 році.[1] В подальшому за ініціативою ННЦ ІМЕСГ така тематика постійно обговорюється на засіданнях «круглих столів». Деякі питання особливостей організації системи технічного сервісу нашли відображення в публікаціях працівників наукових установ та закладів освіти [2],[3],[4] та інші. Але більш глибокої розробки і обґрунтувань потребують напрямки розвитку технічних центрів і майстерень сервісних послуг, як найбільш реальні для масового застосування.

В той же час є приклади, які свідчать, що за перші п'ять років реалізації комплексної програми розвитку технічного сервісу шляхом залучення коштів вітчизняних і закордонних інвесторів без витрат бюджетних коштів було реконструйовано, побудовано, проведено технічне переозброєння більш як 1400 об'єктів технічного сервісу та створено більш як 15 тис. робочих місць. Реалізація заходів, спрямованих на динамічний розвиток сервісу і технічного обслуговування і ремонту техніки сприяла створенню сучасного ринку сервісних послуг, зорієнтованого на підвищення якості технічного обслуговування; економічну безпеку.

### 1.1.2. Мета, об'єкт, предмет і завдання дослідження

*Мета дослідження.* Метою дослідження є дослідження параметрів, які необхідно враховувати при обґрунтуваннях організації сервісного підприємства по обслуговуванню і ремонту технічних засобів аграрного виробництва, а саме: кількісний склад видів машин по регіонам та коливання наявності за останні 7 років, марки придбаної техніки та їх основні характеристики. В представленій роботі представлені окремі результати виконаних досліджень. обґрунтування інфраструктури технічного сервісу, дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах та оптимізація їх запасів.

*Об'єкт дослідження.* Об'єктом дослідження є інфраструктура технічного сервісу, запасні частини та фактори впливу на їх потребу. Система технічного сервісу. Техніка, яка потребує технічного обслуговування та ремонту. Запасні частини для техніки

*Предмет дослідження.* Предметом дослідження є взаємозв'язок між інфраструктурою технічного сервісу, запасними частинами та факторами впливу на їх потребу.

*Завданнями дослідження* є обґрунтування необхідності та взаємозв'язку елементів інфраструктури технічного сервісу, дослідження основних факторів впливу на потребу в запасних частинах.

### 1.1.3. Матеріали і методи дослідження

*Матеріали дослідження.* Статистичні дані про наявність техніки, яка використовується в агропромисловому виробництві; розподіл її по регіонам і областях, дані фактичної реалізації запасних частин через мережу системи постачання;

- Аналітична інформація про діючу інфраструктуру об'єктів надання послуг з обслуговування і ремонту техніки та трансформація концепції технічного сервісу
- Дані про фактори впливу на потребу в запасних частинах
- Нормативно-технічна документація з експлуатації та ремонту техніки
- Дослідницькі роботи в галузі технічного сервісу

*Методи досліджень.* В процесі дослідження використовувались такі основні методи: аналіз статистичних даних, опитування фахівців, експертний аналіз, аналітичний метод, метод статистичної обробки даних та метод моделювання.

#### 1.1.4. Обґрунтування інфраструктури технічного сервісу

За перші п'ять років реалізації комплексної програми розвитку технічного сервісу шляхом залучення коштів вітчизняних і закордонних інвесторів без витрат бюджетних коштів було реконструйовано, побудовано, проведено технічне переозброєння більш як 1400 об'єктів технічного сервісу та створено більш як 15 тис. робочих місць. Реалізація заходів, спрямованих на динамічний розвиток сервісу з технічного обслуговування і ремонту техніки сприяла створенню сучасного ринку сервісних послуг, зорієнтованого на підвищення якості технічного обслуговування; економічну безпеку.

Тенденція очевидна – технічний сервіс набуває стрімкого розвитку, об'єми значно збільшуються в зв'язку з тим, що парк машин та обладнання ще багато років буде ускладнюватись, зростати і поновлюватись, він стає найбільш перспективним бізнесом на ринку сільськогосподарської техніки.

На відміну від країн Євросоюзу ми знаходимося на початку запровадження сервісної стратегії технічного забезпечення АПК. Більш того серед науковців і держуправлінців немає чіткої констатації очевидного стратегічного напрямку, не визначені пріоритети, не робиться бодай моральної підтримки ентузіастам сервісної діяльності. До 70% об'ємів з ремонту і технічного обслуговування сільсько- господарської техніки виконувалися безпосередньо в господарствах. Але аналіз показує що в нинішній час:

- -сільськогосподарські підприємства не створюють і не планують створювати ремонтно-обслуговуючу базу, так як це вимагає значних інвестицій, які швидко не окупляються;
- ті що отримали в спадщину ремонтні майстерні поступово звужують їх діяльність Ремонт машин потребує кваліфікованих робітників, сучасного обладнання, гарні виробничі приміщення, які при малих об'ємах виробництва окупити неможливо.

- великі агрофірми зберегли ремонтно-обслуговуючу базу, але машино-тракторний парк комплектують, як правило, новими закордонними моделями, складної конструкції з електронними системами.

Тому обґрунтування, які можуть сприяти розвитку системи сервісного обслуговування техніки АПК є надзвичайно актуальними.

В процесі досліджень був проведений статистичний аналіз даних Державної служби статистики України.

1. Наявна щорічна кількість по Україні становила: тракторів 128-130 тис. шт., зернозбиральних комбайнів 26,3-27,4 тис.шт., кукурудзозбиральних 1,6-1,5 тис.шт., агрегати для доїння корів 9,5-10,2 тис.шт. Аналіз середньорічної кількості та коефіцієнта варіації свідчать про те що в останні 5-7 років кількісний склад основних видів техніки досить стабільний, коефіцієнт варіації становить 2-3%.

2. Слідуючий важливий параметр, який суттєво може впливати на територіальне розміщення сервісного підприємства це відсоток техніки від загальної кількості, яка знаходиться в конкретній області, або регіоні.

Аналіз проведений по всіх областях і регіонах (рис.1.1). Виявлені області на які припадає найбільша питома вага кількості певних видів техніки. Наприклад, по тракторам це Дніпропетровська обл.-9,6%, Кіровоградська-9,5%,Одеська-7,3%.Найбільше тракторів в Центральному регіоні-36,3%.Зернозбиральних комбайнів у Запорізькій і Кіровоградській областях по 7,5% від загальної кількості по Україні. Для кукурудзозбиральних комбайнів це Кіровоградська Вінницька і Одеська обл. на які припадає більш як по 10% техніки. Доїльних агрегатів найбільше в Чернігівській, Харківській та Київській обл.-біля 9%.

На рис. 1.1 наведена діаграма наявності сільськогосподарської техніки для всіх регіонів України яка може бути вихідним матеріалом при плануванні відновлення кількісного складу технічних засобів, а також створення ремонтно-обслуговуючих підприємств.

3. Поновлення техніки. За довоєнні 5 років господарства придбали біля 17 тис. тракторів.

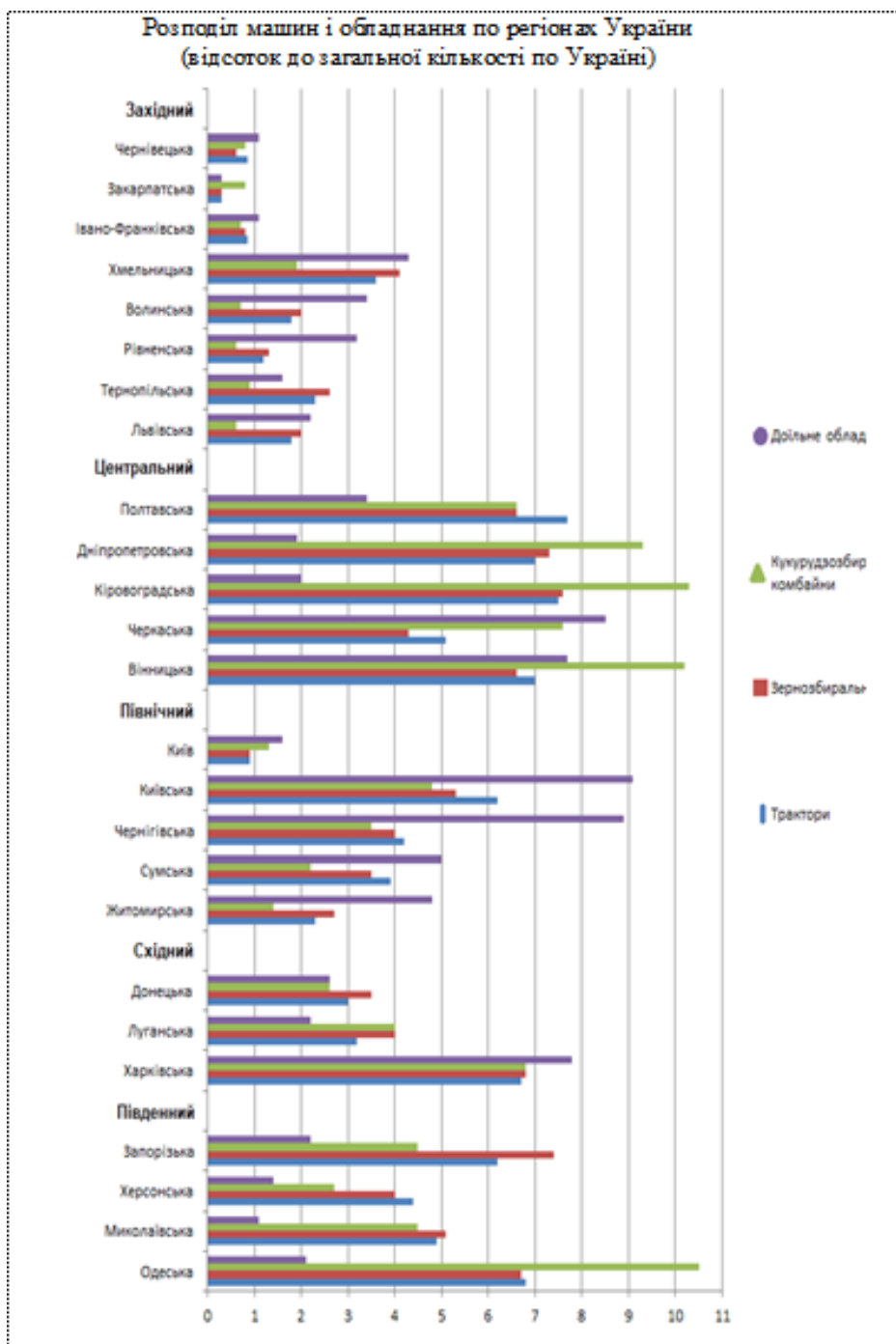


Рисунок 1.1 - Діаграма наявності сільськогосподарської техніки для всіх регіонів України

Таблиця 1.1 - Аналіз щорічної купівлі тракторів «John Deere»

	Кількість	Середня ціна , грн
З потужністю від 60 до 100 квт	17	1 616 189
З потужністю понад 100 квт	185	3 428 743

Марочний склад надзвичайно різноманітний: «Беларус», «Кий». «Коваль»,

«ХТА», «ХТЗ», «ЛТЗ», «Case», «Callenger», «Deuts-Fahr», «Fendt», «JCB Fasttras», «John Deere», «Lamborghini», «Landini», «Massey Ferguson», «Claas», «New Holland», «Same», «Versitay», «Ag-Chem Terra-Gator», «Holmer-Terra», «Kirovets», «Vredo», «Me Cornsck», «ГЯ-200 Ярило», «Valtra». Найбільше придбано: «John Deere»-26%, «New Holland»-14%, «Беларус»-14%, «Case»-13%.

Таблиця 1.2 - Аналіз руху тракторів в с/г підприємствах обраного регіону

	Надійшло протягом року		Вибуло	
	Всього	Списано, в т.ч	Всього	Списано, в т.ч
Харківська	457	302	373	184
Полтавська	513	345	459	253
Луганська	112	89	191	47

Також проведений аналогічний аналіз по вантажним автомобілям, зернозбиральним і кукурудзозбиральним комбайнам. Придбання зернозбиральних комбайнів характеризується наступним співвідношенням:

John Deere -	21%	Ltxion-	6%
Class -	10%	Полісся-	5%
Tukano -	7%	Інші -	40%
Casse -	9%		

Інформація по сформованому за останні роки машиннотракторному парку дозволить найбільш правильно визначитись з спеціалізацією виробництва.

4. Автомобілі в агропідприємствах. Загальна кількість вантажних автомобілів зменшувалась стабільно в останні роки. З 100 до 80 тис. шт., 54% всіх вантажних автомобілів експлуатується в господарських товариствах.

Фермерські господарства становлять 75% всіх зареєстрованих сільськогосподарських підприємств, на їхню долю приходить 17% парку вантажних автомобілів, але на 100 фермерських господарств зареєстровано лише 42 автомобіля.

Оновлення парку автомобілів на підприємствах агропромислового комплексу здійснювалось шляхом придбання як нової, так і вживаної техніки.

Агропідприємства придбали в останні роки переважно нові вантажні автомобілі з дизельними двигунами вантажопід'ємністю до 5 т. З іскровим запаленням було куплено всього 259 автомобілів за 6 років.

Таблиця 1.3 – Наявність вантажних автомобілів у сільськогосподарських підприємствах (дані довоєнного періоду).

Вантажні та вантажно-пасажирські автомобілі	В сільськогосподарських підприємствах всього	У тому числі					
		в господарських товариствах	в приватних підприємствах	в кооперативах	в фермерських господарствах	в державних підприємствах	в підприємствах інших форм господарювання
Кількість	81158	44189	14006	3752	14245	2194	2772
Відсоток від загальної кількості	100	54	17	5	17	3	4
Середній показник на 1 господарство	1,78	6,34	4,36	8,38	0,42	11,03	4,68

#### 1.1.5. Дослідження факторів впливу на потребу в запасних частинах

Продаж запчастин протягом багатьох років не розглядалася як один з основних видів бізнесу. Заводи утримувалися тенденцією, що їх основним джерелом доходу є виробництво нової техніки. Тому виготовлення і реалізація запасних частин традиційно розглядається як додаткове навантаження при відповідному ставленні до їх регулярності і якості виробництва. Це призвело до дефіциту запасних частин в сфері обслуговування та експлуатації техніки, особливо в аграрному секторі в період сезонної підготовки техніки до польових робіт. На заводах процвітали спекуляції, крадіжки, бартерні взаємозаліки, тощо.

Відповідно, практично не існувало ринкової дистриб'юторської мережі, постачальницького обслуговування в сфері продажу запчастин.

Перехід до нових ринкових відносин з одного боку стимулював створення мережі підприємців і компаній, які займаються тільки продажем запчастин, з іншого боку, заводи відчули суттєве підвищення рентабельності у виробництві запчастин.

Нинішній час вимагає нової концепції виготовлення, постачання та реалізації запасних частин з врахуванням особливостей машиновикористання в сільськогос-



подарському виробництві. Особливо вивчення закономірностей важливо для запровадження технологій «Індустрії – 4.0», зокрема, предиктивна аналітика, статичне моделювання, які можуть допомогти робити прогноз із достатнім для практичного використання рівнем точності.

**Мета досліджень:** встановити тенденції споживання запасних частин для обслуговування та ремонту машин, які використовуються переважно в АПК.

Бралися до уваги основні фактори впливу на потребу в запасних частинах, зокрема: наявність відповідних видів техніки в регіоні та її оновлення, технічні характеристики машин і обладнання, сезонність аграрного виробництва і коливання потреби в запасних частинах.

**Характеристика об'єкта досліджень.** Проведений аналіз діяльності компанії, що займаються поставками вузлів, деталей та матеріалів для сільськогосподарської техніки. Приблизно 30% обсягу продажу припадає на сільгосп виробників, 20% – на ремонтні майстерні і близько 50% – на посередників. Компанія торгує як оригінальними запчастинами, так і «неоригінальними» запчастинами, що поставляються підприємствами, які виробляють в основному за своєю документацією, а також за документацією, розробленою фахівцями компанії. Компанія складається з головного офісу, на частку якого припадає 85,5% обороту, і двох філій: магазину в районному центрі і місця обмеженої торгівлі на авторинку, на частку яких припадає 7,2% та 7,3% обороту.

**Результати досліджень.** В останні роки з'явилася необхідність в розробці нової концепції реалізації запасних частин, зріс інтерес до різних питань обґрунтування потреби в запасних частинах. Серед них одним з важливих і складних є врахування сезонності в замовленнях на запчастини. Тому для того, щоб оцінити вплив сезонності на реалізацію запасних частин був проведений аналіз діяльності компанії, що займається поставками агрегатів, вузлів, деталей, матеріалів до сільськогосподарської техніки. Відправлення вантажів складає до 600 кілограмів у день в сезонні підйоми і до 350 кг / день в період відносних спадів поставок. Для оцінки помісячного коливання попиту на запасні частини використовувався коефіцієнт сезонності, який являє собою відношення обсягу продажів в конкретному місяці до середньомісячного обсягу продажів в аналізованому році (рис. 1.2.)

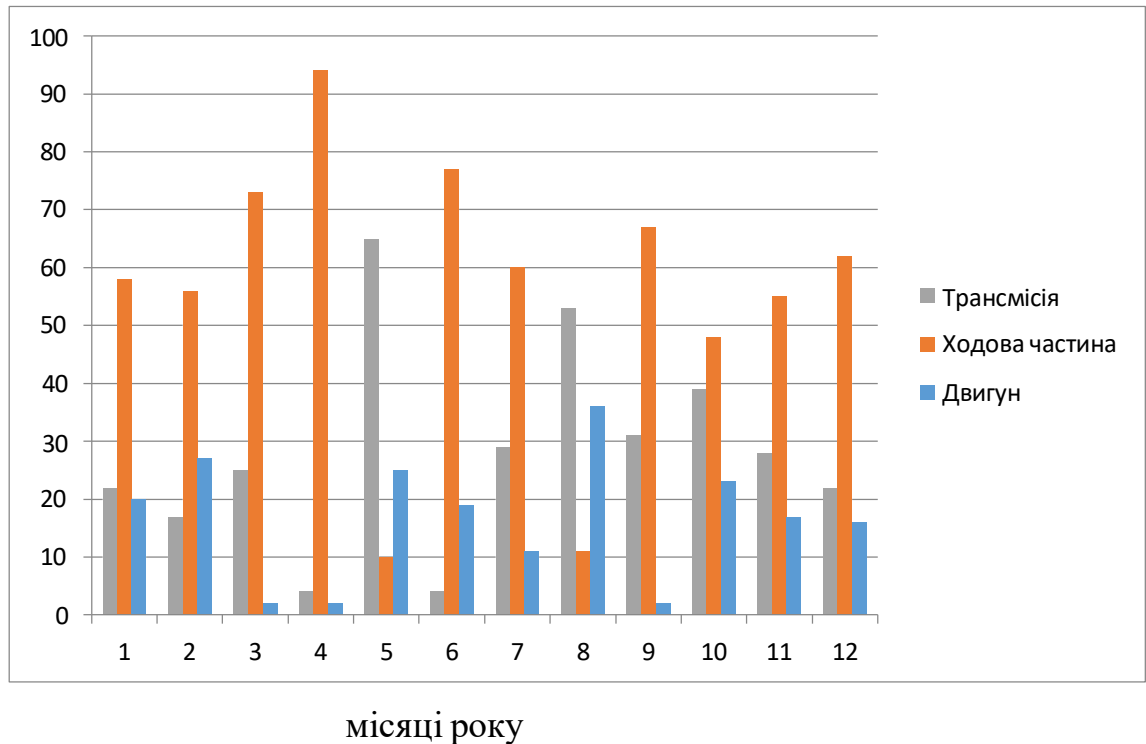


Рис. 1.2 Розподіл запитів на запасні частини на протязі року

В процесі досліджень вивчалось номенклатура, кількість реалізованих запчастин по кожній позиції, їх вартість та дохід. Всього було проаналізовано біля 4000 найменувань, які дали дохід майже 2 млн гривень. Деякі (15 найменувань) стали збитковими. ABC аналіз по доходу дав можливість виявити майже 700 найменувань запасних частин, що дають 80% доходу. Це такі, як: глушник, ланка ланцюга

, шків, каретка, тощо. Ще біля 900 найменувань мають досить значний вплив на дохід компанії. Це такі найменування, як: манжети, гайки, патрубки, тощо. І це складає біля 15% доходу. Решта – 2500 найменувань приносить біля 5% доходу.

Як бачимо (рис.1.3), розташування об'єкта реалізації запасних частин істотно впливає на сезонність продажів. Найбільше до коливань схильні продажі в контейнерному місці на авторинку.

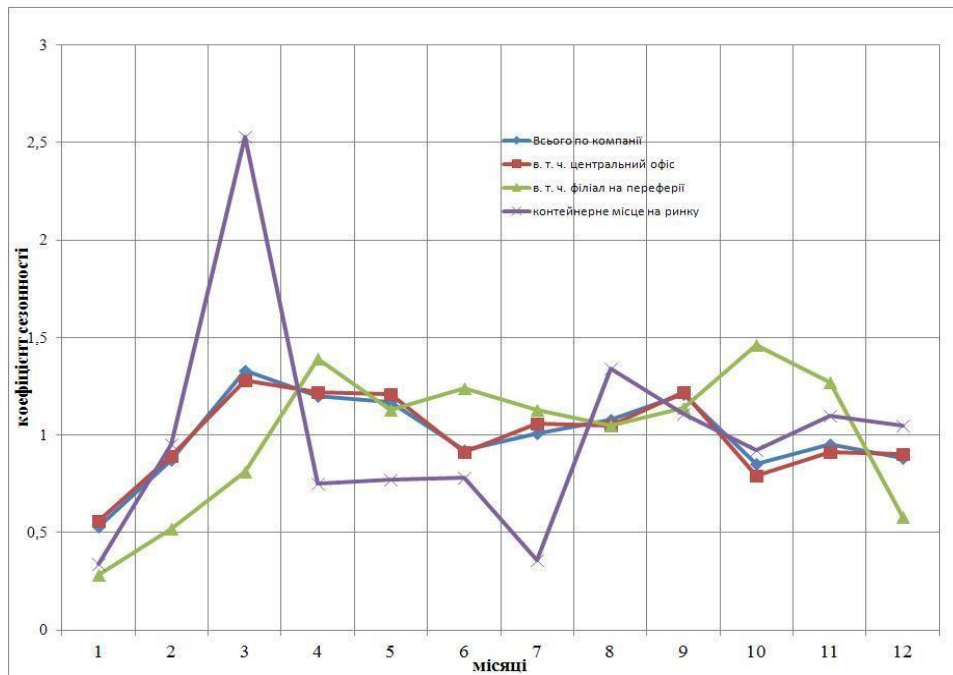


Рис. 1.3 - Вплив розташування об'єкта реалізації запасних частин на сезонність продажів

Піки купівельної активності припадають на березень і серпень (коефіцієнти сезонності 2,53 і 1,34), а різке падіння на січень, червень (коефіцієнти 0,34 і 0,36). Магазин запасних частин розташований на периферії (райцентрі) має піки продажів в квітні і жовтні і стабільний обсяг реалізацій в літні місяці. Реалізація через центральний офіс відрізняється найбільшою стабільністю. Однак спостерігається підвищення попиту на запасні частини в березні і вересні. Відносний спад в червні. Таким чином сезонність істотно впливає на обсяг реалізації запасних частин і її врахування суттєво може підвищити ефективність діяльності магазину запчастин. Аналіз сезонності продажів необхідно проводити в кожному конкретному випадку розміщення підприємства. ABC-XYZ аналіз за принципом Парето може бути ефективнішим з урахуванням сезонності реалізації.

## ВИСНОВКИ

Проведений аналіз дає можливість планувати розвиток інфраструктури обслуговування і ремонту машин та обладнання агропідприємств, закуповувати і проектувати відповідне технологічне обладнання, планувати виготовлення і постачання запасних частин.

Періоди виготовлення та постачання запасних частин повинні враховувати попит, сезонність і розташування об'єкта реалізації, а отримані результати досліджень можуть бути системою аналізу для запровадження предиктивної аналітики.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Организационные формы технологического сервиса и прогноз их развития в рыночных условиях ведения хозяйства в агропромышленном комплексе Украины. К., 2001. ННЦ ІМЕСГ, 2001- 170с.

2. Науменко, О. А. Обґрунтування структури сервісних центрів АПК / О. А. Науменко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - Харків ., 2010. - Вип. 96: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонт. вир-ві. – С.11-15.

3. Ремонт машин та обладнання : підручник / О. І. Сідашенко, О. А. Науменко, Т. С. Скобло, О. В. Тіхонов, М. І. Черновол, З. В. Ружило, В. А. Войтов, В. К. Аветісян, А. К. Автухов, О. Д. Мартиненко, В. А. Бантковський, П. С. Сиромятніков, О. В. Сайчук ; за ред. О. І. Сідашенко, за ред. О. А. Науменко; ХНТУСГ.

- 2-ге вид., перероб. і доп. - К. : Агроосвіта, 2014. - 665 с.

4. Технологічна та функціональна структура сервісного виробництва / О. А. Науменко, І. В. Науменко // Вісник Харків. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. - Харків : ХНТУСГ, 2013. - Вип. 132: Техн. системи і технології у тваринництві. - С. 121-125.

## 1.2. Оцінка номенклатури деталей машин, що визначають ресурс

Виконавець: доц. Бантковський В.А.

### ВСТУП

За даними Української Асоціації «Надійність машин і споруд», за період експлуатації на запчастині тракторного двигуна витрати металу складають 50-100 % його маси, шасі трактора – 100 %. Витрати коштів на технічне обслуговування і ремонт автомобілів, тракторів за весь термін служби в 3-6 разів перевищує вартість їх виготовлення.

Парк автотранспортних засобів в Україні по технічному рівню, моральному і фізичному зносу вимагає відновлення, терміни амортизації майже у 50 % машин значно перевищені (більше 10 років). Ресурс двигуна після ремонту за технічних умов повинен бути не нижчим 80 % ресурсу нового двигуна, проте насправді складає тільки 30-50 %. Середнє напрацювання на відмову трактора Т-150К в 2 рази, а термін служби в 2-3 рази менше, ніж у зарубіжних аналогів.

Розвиток конструкцій машин відбувається при постійнім прагненні до збільшення їх продуктивності, що майже завжди супроводжується підвищенням механічної й теплової напруженості рухливих сполучень деталей [1]. При цьому ставляться завдання досягнення високої надійності й довговічності машини, зниження її маси, скорочення витрати дефіцитних матеріалів. Відомо, що підвищення довговічності машини навіть у невеликому ступені веде до значної економії металу, зменшення витрат на виробництво запасних деталей; скорочуються число й обсяг ремонтів, а отже, збільшується кількість фактично працюючих машин [1].

Оскільки при конструюванні машин ураховуються й економічні фактори виробництва й експлуатації, конструктору необхідно проводити перспективний прогноз тривалості використання даної машини з урахуванням тривалості експлуатації машин попередніх моделей. У ряді випадків цей строк становить 25 років, а іноді й більше, наприклад, для автомобілів, тракторів, транспортних літаків, металообробних верстатів [2]. При виборі конструктивного рішення необхідно враховувати майбутні витрати не тільки на виготовлення машини і її окремих вузлів, але й на обслуговування й ремонт.

Останні витрати при тривалій експлуатації машини в багато разів більші вартості її виготовлення.

Проблема підвищення строку експлуатації виробів і деталей, особливо в тих випадках, де їх заміна або ремонт неможливий, є актуальною.

### 1.2.1. Постановка завдання і мети досліджень

На основі оцінки номенклатури деталей, які визначають ресурс автотракторної техніки і сільськогосподарських машин, встановити переважні види й величини зношування деталей. Визначити методи та способи відновлення деталей машин, які найчастіше використовуються на підприємствах агропромислового комплексу.

### 1.2.2. Аналіз останніх досліджень та літератури

Аналіз причин відмов машин, проведений у роботах [3-6] показав, що ресурсною відмовою, яка найбільше часто зустрічається, є вихід з ладу через зношування й руйнування деталей пари тертя шийка колінчатого валу – вкладиш підшипника ковзання, табл. 1.4.

Таблиця 1.4 - Кількісна оцінка ресурсних відмов двигунів

Найменування	Кількість %				
	СМД-62	ЯМЗ - 238НБ	ЯМЗ - 240Б	Д-240	КамАЗ - 740
Вихід з ладу групи шийка колінчатого валу – вкладиш підшипника ковзання (КШМ)	67	55	45	40	56
Зношування циліндро – поршневої групи (ЦПГ)	14	20	35	44	24
Обрив поршня	14	15	15	10	8
Обрив шатуна і його болтів	1	10	5	6	9
Обрив болтів кріплення маховика	–	–	–	–	3

Аналіз динаміки зміни зазорів у трибосистемах двигунів транспортних засобів також показав, що найбільш інтенсивний характер збільшення зазору поряд із циліндропоршневою групою (ЦПГ) має сполучення кривошипно-шатунного механізму (КШМ), тобто шийка колінчатого валу – вкладиш підшипника ковзання.

Залежність зміни зазору в КШМ від наробітку представлені на рис. 1.4 [5].

Аналіз графічних залежностей, представлених на рис. 1.4, показав, що характер кривих зміни зазорів у з'єднанні вкладиш – шийка колінчатого вала двигуна в нового й відремонтованого двигунів аналогічний, причому швидкість зношування сполучень у двигунів після ремонту вища, чим у нових.

Відомо, що на підтримку працездатності тракторів за строк їх служби витрачається коштів в 3 – 4 рази більше, ніж на їх виготовлення. При цьому 60-80% цих засобів витрачається на усунення відмов і несправностей [5]. На ремонт тракторів задіяно в 4 рази більше виробничих потужностей, ніж на їх виготовлення. Легковий автомобіль, що має масу 1000 кг, стає непридатним для ремонту, якщо втрата його маси від зношування складе 1 кг, а також підраховано, що до списання трактора Т- 130 на запасні частини для ремонту й технічного обслуговування потрібно витратити стільки ж металу, скільки він важить сам – 12000 кг. У нормативах надійності, для оцінки довговічності тракторів і їх основних складових частин використовується ресурс до першого капітального ремонту із заданою гарантованою ймовірністю безвідмовної роботи.

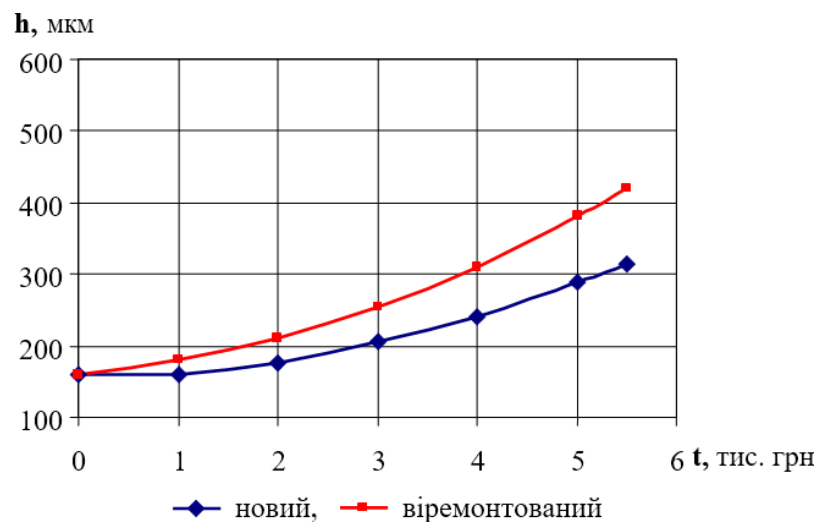


Рис. 1.4 - Зміни зазорів у з'єднанні вкладиш – шийка колінчатого вала двигуна від часу наробітку

До 1990 року Україна щорічно купувала близько 52 тисяч тракторів і парк тракторів становив 495 тисяч машин. У зв'язку зі спадом виробництва вже 2005

року в сільськогосподарських підприємствах України було 194,92 тисячі тракторів усіх марок. У такий спосіб за 15 років випуск тракторів скоротився більше чим в 30 раз, а в 2009 році більш ніж в 100 раз. Відсоток використання виробничих потужностей тракторних заводів також знизився з 93% в 1985 році до 5,2% в 1997 році. А в 2009 році виробничі потужності підприємств були завантажені до 2%.

У зв'язку із цим у цей час в експлуатації питома вага тракторів випущених до 1985 року досягає 25%, випущених в 1986-1990 роках – 42%. Більше половини тракторів, які є в наявності, були випущені близько 20 років тому.

Так, наприклад, кількість тракторів марки «ЮМЗ», які перебувають у господарствах України становить близько 50 тисяч штук. З них більше половини вимагає капітального ремонту. І якщо не вжити відповідних заходів, то до 2025 року вони залишаться в одиничних екземплярах у господарствах України. Трохи краща ситуація із тракторами «ХТЗ», однак за 8 місяців 2009 року господарствами України було придбано всього 150 штук цих тракторів. Враховуючи дану економічну ситуацію потрібні нові системні підходи до збільшення ресурсу машин шляхом відновлювання деталей визначаючих їхній ресурс.

### 1.2.3. Результати та обговорення

У відповідності ДСТУ 2863-94 програма по забезпеченню надійності повинна містити етап розробки нормативів довговічності, безвідмовності, ремонтпридатності. Це основа керування процесом забезпечення необхідної надійності.

На основі аналізу впливу ряду факторів: навантаження, частоти обертання, ступеню забруднення мастильного середовища, конструктивних особливостей вузлів, сполучень на інтенсивність зношування й динаміку нагромадження втомлених ушкоджень, а також з урахуванням накопиченого досвіду підвищення працездатності деталей і вузлів на Харківському тракторному заводі була визначена номенклатура деталей шасі колісних тракторів типу Т-150 К, які вимагають підвищення довговічності [5]. Номенклатура містить 36 деталей. Переважні види ушкоджень: зношування – 33 деталі, питинг зубів – 2 деталі, спікання втулки з валом – 1 деталь. Якщо проаналізувати обрані можливі шляхи підвищення довговічності, то на час-тку зміцнюючих технологій доводиться 9



деталей (плазмове напилення – 3 дет., хіміко-термічне зміцнення – 3 дет., лазерне зміцнення – 3 дет.), що становить більш 27%, а серед них плазмове напилення й лазерне зміцнення займають обсяг 67%.

Ресурс більшості машин залежить від відносно невеликої кількості деталей. Це дозволяє планувати обсяги їх відновлювання, розробляти, випускати й впроваджувати спеціальне устаткування, створювати й розбудовувати спеціалізовані виробництва, нарощувати обсяги й розширювати номенклатуру відновлюваних зношених деталей. Агрегати й вузли автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин являють собою сукупність безлічі деталей типу: вал, втулка, важіль, корпус, шестірня, що зазнають у процесі експлуатації впливу різного роду навантажень і середовища, які приводять до необоротних процесів зношування їх робочих поверхонь. При обробці статистичних даних по відмовах деталей автомобілів встановлений наступний їхній розподіл: зношування – 53,4%; руйнування (тріщини, поломка, обривши частини деталі) – 18,9%; деформація (розтягання, скручування, вигин) – 10,4%, інші види дефектів – 17,3%. Аналізуючи дефекти деталей, що виникають при експлуатації, слід мати на увазі, що кожна окрема деталь піддається різному навантаженню, виду деформацій і умовам змащення [7, 8].

При узагальненні видів зношування деталей, які виникають в експлуатації машин, виготовлених на різних заводах, встановлюються характерні дефекти, властиві машинам різного призначення. У деталях машин, які вишли з ладу, спостерігається абразивне зношування, втомне руйнування поверхневого шару, контактне схоплювання, зминання й корозія. У числі дефектів зустрічаються тріщини, сколювання й викрашування зубів, поломка зубів, скручування шліців і валів.

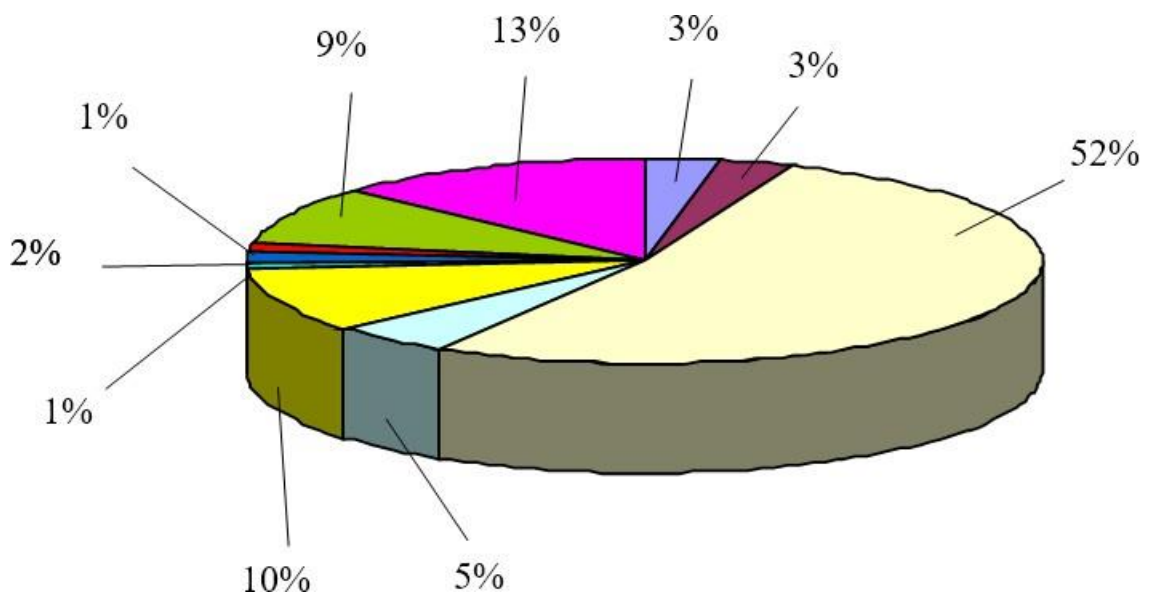
Абразивне зношування превалює над усіма іншими: близько 40% деталей мають чисто абразивне зношування й 50% – абразивне зношування в комбінації з іншими видами зношування й руйнувань поверхневого шару.

Дуже часто, на одній деталі й навіть на одній і тій же поверхні тертя спостерігається кілька видів зношування й руйнування (табл. 1.5).

За даними досліджень, зношування поверхонь деталей тракторів, автомобілів і сільськогосподарських машин розподіляється приблизно в такий спосіб, рис. 1.5.

Таблиця 1.5 - Характерні види зношування й руйнувань деталей машин моделей

Вид зношування й руйнування	Імовірність повторення, %
Змінання й абразивне зношування зубів і шліців сполучних муфт	14,8
Втомне руйнування поверхневого шару й абразивне зношування зубів шестірні	15,8
Відколи й абразивне зношування зубів шестірні	20,1
Абразивне зношування деталей	38,8
Контактне захоплення деталей	10,5
Корозія деяких деталей у комбінації з різними видами зношування й руйнуваннями поверхневого шару	3,5–10



Циліндричні – 52%; конічні й сферичні – 3%; шліци – 3%; пази, канавки, лиски – 5%; різьблення – 10%; плоскі поверхні – 1%; зуби шестірні – 2%; профільні, фасонні поверхні – 1%; тріщини й злами – 9%; порушення геометричної форми – 13%.

Рис. 1.5 - Зношування поверхонь деталей автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин

При цьому 40% дефекту, що найбільше часто зустрічається, – зношування циліндричної поверхні – становить зношування зовнішньої циліндричної поверхні, 60% – внутрішньої, рис. 1.6. Необхідно відзначити, що найбільше число деталей (близько 83%) має зношування до 0,6 мм. З них зношування до 0,1 мм – 52%, до 0,2 – 12%, до 0,3 – 10%, до 0,4 – 1%, до 0,5 – 5% і до 0,6 – 3%, що відповідає технологічним можливостям газотермічних способів нанесення покриттів [5].

При взаємодії з ґрунтом робочі органи ґрунтообробних і садильних машин

знають інтенсивного абразивного зношування. Крім того, робочі органи сільськогосподарських машин експлуатуються в умовах хімічно-абразивного середовища, що пов'язано з додаванням в ґрунт різноманітних добрив та наявності в ньому вологи. У сукупності ці фактори чинять настільки сильний вплив на робочі органи сільськогосподарських машин, що робить їх непридатними до експлуатації, практично через декілька годин інтенсивної роботи.

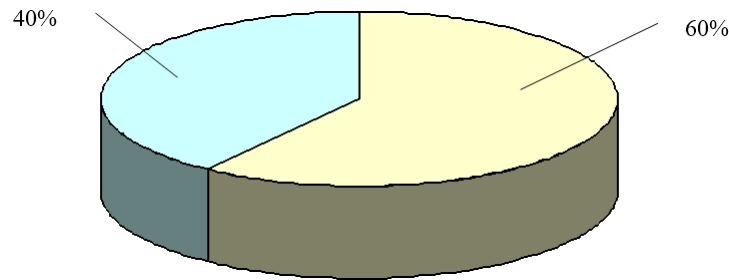


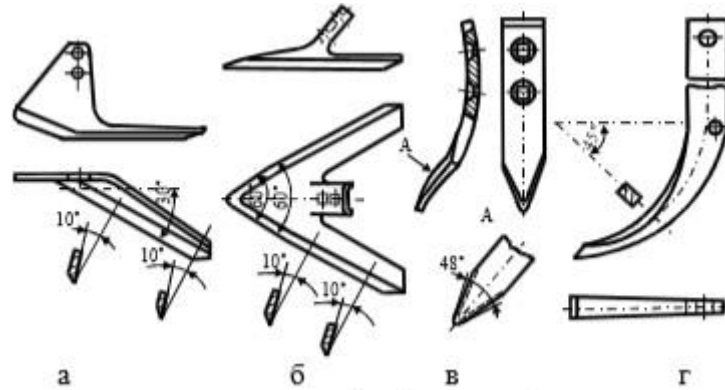
Рис. 1.6 - Зношування циліндричних поверхонь деталей автомобілів, тракторів, і сільськогосподарських машин

В даний час в Україні для обробки ґрунту в сільському господарстві застосовують такі робочі органи ґрунтообробних машин: леміші плугів, стрілочасті та односторонні лапи культиватора, різні конструкції сошників, диски борін, диски лу- щильника, розпушувачі та ін. [9]. В середовищі ґрунту робочі органи підлягають інтенсивному абразивному зношуванню [10, 11]. Типовими представниками робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами є лапи культиваторів, призначені для розпушування ґрунту, знищення бур'янів і перемішування частинок ґрунту. Їх форма (рис. 1.7) залежить від виду і типу оброблюваної культури, стадії її розвитку і стану ґрунту, а основні параметри обумовлені ДСТУ 7328:2013 та ДСТУ 7329:2013.

Для найбільш розповсюджених культиваторів КПС-4 використовують стрілочасті лапи шириною захвату  $B=270$  і  $330$  мм і товщиною 5 або 6 мм. Для найбільш розповсюджених культиваторів КПС-4 використовують стрілочасті лапи шириною захвату  $B=270$  і  $330$  мм і товщиною 5 або 6 мм.

Технічні вимоги передбачають їх виготовлення зі сталі, що по фізико-механічних властивостях не нижче марки 65Г (ДСТУ 3683-98). Твердість різальної крайки лапи, виготовленої без наплавлення, після термообробки в загартованій зоні повинна складати 44...54 HRC і не більше 352 HB в незагартованій зоні [12, 13].

Для наплавлених лап оговорюється лише максимальна товщина різальної крайки – 0,5 мм. Хвилястість різальних елементів по крайці не повинна бути більше 2 мм при нерівності різальної крайки по висоті не більше 0,4 мм.



- а) пласко різальна одностороння; б) пласко різальна стрілчаста з хвостовиками; в) розпушуюча списоподібна; г) розпушуюча долотоподібна

Рис. 1.7 - Лапи культиваторів

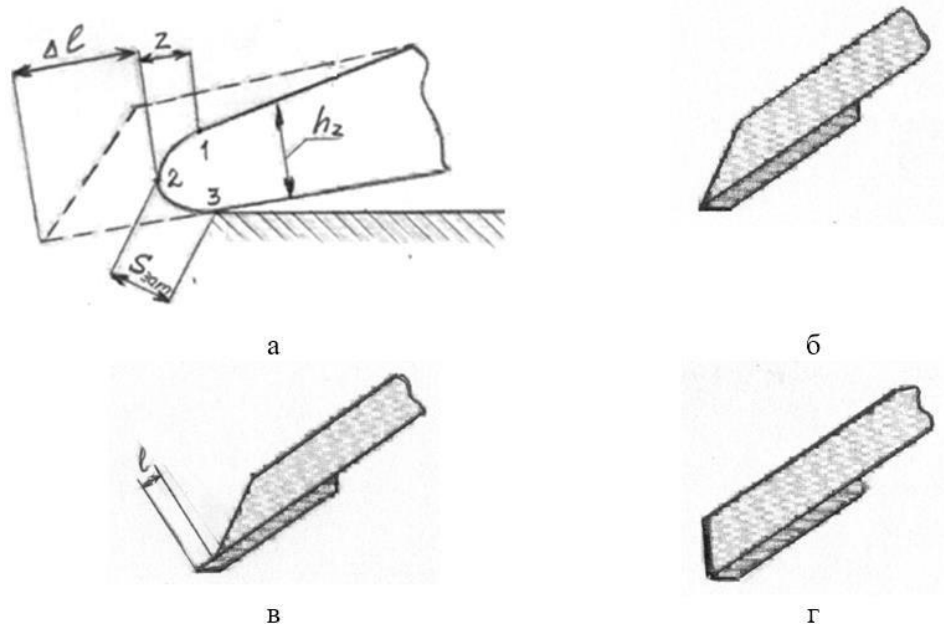
Наявність тріщин в основному металі лап не допускається. ДСТУ не регламентує склад зміцнювального твердого сплаву, проте, обумовлює напрацювання на одну лапу – 30 га. При виконанні операцій обробки ґрунту швидкість переміщення культиватора знаходиться в межах 1,25...3,3 м/с.

В процесі зношування робочі органи ґрунтообробних машин їх різальних елементів (рис. 1.8, а) змінюються за розмірами  $\Delta\ell$ ,  $z$  та спостерігається затуплення, що обумовлює зміну основних параметрів геометричної форми різальних елементів: ширина затилкової фаски  $S_{зам}$ , кут затилкової фаски  $\delta_{зам}$ , товщина різальної кро- мки  $h_z$  на відстані  $z$  від її вершини.

По лінії 1-2 лицьової сторони різальних елементів відбувається контакт з відрізанним шаром ґрунту, в точці 2 спостерігається його відрив, а лінія 2-3 – визначає затилкову фаску, яка переміщується по дну борозни. В момент відриву шару ґрунту кожна з двох зон, що характеризується лініями 1-2 та 2-3, контактує приблизно з однаковою кількістю абразивних частинок і в процесі переміщення робочих орга- нів ґрунтообробних машин зношується його робоча поверхня.

Дослідження [12, 14, 15] свідчать, що зміцнення однієї з робочих поверхонь

різального елемента тонким шаром твердого сплаву стримує утворення затилкової фаски і дозволяє отримати ефект самозагострювання, як результат вибіркового зношування локальних областей робочої поверхні [16, 17]. При цьому спостерігаються такі варіанти результату зношування різального елемента: нормальне самозагострювання (рис. 1.8, б); переагострювання з виламуванням оголених твердих ділянок (рис. 1.8, в); затушення й округлення різальної крайки



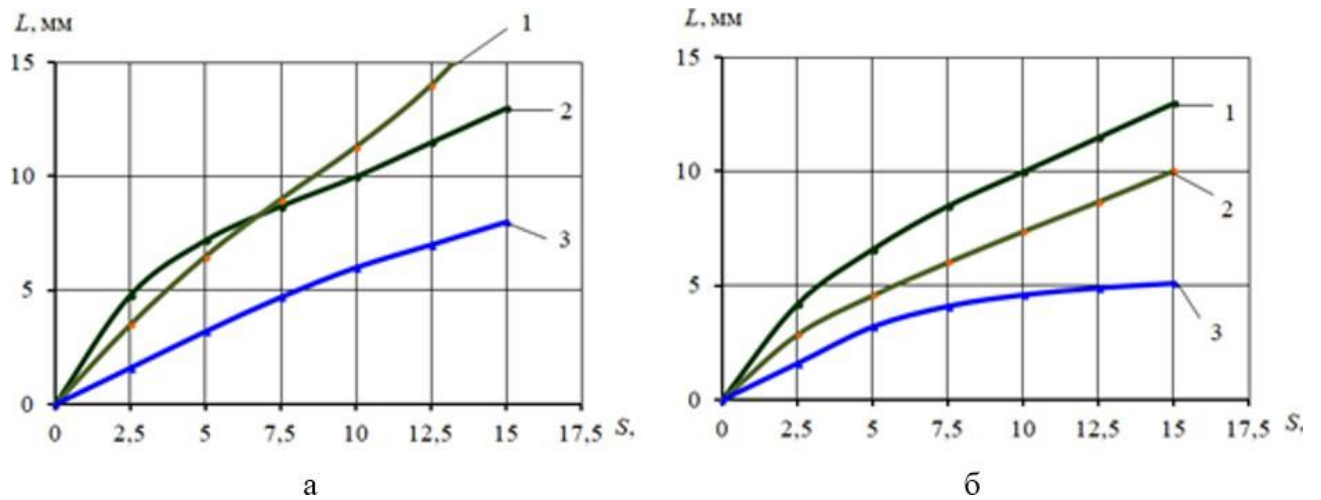
(рис. 1.8, г).

1-2 – лицьова сторона; 2-3 – затилкова сторона

Рис. 1.11 - Схема характеру зношування і зміни параметрів форми різального елемента: однорідного (а) та варіанти зношування біметалевого (б-г)

В процесі експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами найбільше зношується носок (рис. 1.9). Результати досліджень свідчать, що інтенсивність зношування носку (рис.1.9, а) стрілочастих лап культиваторів на різних типів ґрунтів у 1,8...2,5 рази вище, ніж середини їх різальної частини (рис. 1.9, б). Виявляються дві умовні стадії процесів зношування: на першій – криволінійна залежність зносу від напрацювання з тенденцією зменшення його інтенсивності, а на другій – лінійна залежність [18, 19].

Зношування різальних елементів робочих органів в абразивному середовищі ґрунту приводить до зміни їх профілів (рис. 1.10).



1 – піщано-щебенисті; 2 – важкі суглинисті; 3 – середньо суглинисті

Рис. 1.9 - Залежність зносу носку (а) та середини різальної частини (б) стрілочастих лап культиватора від напрацювання на різних ґрунтах



а і б – суглинні; в і г – глинисті (напрацювання 40 і 80 Га)

Рис. 1.10 - Характер зміни профілю різальних елементів стрілочастих лап на різних ґрунтах

Порівняльний аналіз профілів різальних елементів стандартних лап культиваторів, зношених на різних ґрунтах, показує, що в більшості випадків вони мають округлу форму. Це можна пояснити тим, що культивацію ґрунту здійснюють на невелику глибину, порядку 10...12 см, і удари та ковзання його абразивних частинок вздовж робочої поверхні обумовлюють затуплення різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин.

Останнє впливає на стійкість ходу робочих органів по глибині та на зміну вертикальної сили реакції ґрунту [20]. Зазначимо, що у нових робочих органах ґрунтообробних машин ця сила спрямована вниз. Одночасно з напрацюванням робочих органів спостерігається зростання горизонтальної складової, тягового опору [21], і збільшення товщини різального елемента [22].

Дослідження [23] свідчать, що внаслідок зношування робочих органів і збільшення товщини різального елемента від 0,2...0,3 мм до 0,8...1,2 мм тяговий опір підвищується на 7...14%, а до 2 мм – відповідно на 34%. Згідно ДСТУ 7328:2013 для різних типів робочих органів існує гранична товщина різальних елементів: для стрілочастих лап культиваторів при експлуатації на чорноземних ґрунтах і швидкості руху агрегату до 10 км/год гранична товщина не повинна перевищувати 0,8 мм, а при більш високих швидкостях – 0,8...1,0 мм. Якщо основною метою обробки ґрунту є підтримка його верхнього шару в рихлому стані, при малій кількості бур'янів, то ця величина може бути збільшена до 1,4 мм. Інтенсивність зношування істотно залежить від вологості ґрунту [24, 25]: зі зменшенням вологості верхня грань різального елемента стрілової та односторонньої лап, зношується більш інтенсивно. При високій вологості (22...28 %) загальний їх знос значно знижується через налипання вологого ґрунту. Зазначимо, що на інтенсивність зношування також впливає щільність ґрунту [26, 27]. Для підвищення зносостійкості робочих органів і якісного виконання ними функцій зміцнюють їх робочі поверхні з урахуванням умов експлуатації, характеристик і властивостей матеріалів та типів ґрунтів. Зміцнення намагаються здійснити такими способами щоб в експлуатації реалізувати ефект самоорганізації форми різального елемента (самозагострювання), при якому істотно знижується процес зношування [28, 29].

У різних галузях народного господарства, у тому числі і при ремонті деталей транспортних засобів, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей [2, 3]. Аналіз даних [5] дозволяє зробити висновок, що частка деталей, що відновлюються на підприємствах агропромислового комплексу наплавленням, газотермічними, електрохімічними та іншими методами, що найчастіше застосовуються, становить:

– методами наплавлення	34,4%
– способами газотермічного напилення	26,1%
– електрохімічними покриттями	20,4%
– іншими методами	19,1%

Нанесення покриттів методами наплавлення посідає перше місце серед використовуваних технологій. В останні роки набуло розвитку застосування композиційних матеріалів, отриманих з використанням СВС-процесу, для наплавлення по-верхонь деталей машин, що працюють в умовах абразивного середовища [30, 31].

Способи газотермічного напилення, що займають в даний час за обсягом деталей, що відновлюються 2 місце, використовуються на підприємствах з середини 70 років. Слід зазначити, що основна частка деталей, що відновлюються газотермічними покриттями (94%), займає газополуменеве напилення (ГПН).

Якість відремонтованих деталей визначається технологічними можливостями процесу відновлення, внаслідок яких формуються фізико-механічні властивості та структурний стан матеріалу, геометрія та інші характеристики поверхні. Також важливі і супутні процеси, такі як поширення теплоти, зміна структури основного металу в зоні термічного впливу, виникнення залишкових напруг та деформацій. Для забезпечення надійної захисної дії покриття на основу необхідно прагнути послабити вплив залишкових напруг, кисню, дефектності покриття.

При ситуації, що склалася, необхідно розробити систему відновлювального ремонту деталей машин, що враховує тип сполучення й спосіб відновлення зношеної поверхні, розробку технологічної документації, що забезпечує одержання заданої якості відновленої поверхні деталі, підготовку кваліфікованих фахівців.

## ВИСНОВКИ

На основі комплексної оцінки автотракторних деталей і сільськогосподарських машин, що визначають ресурс, встановлено, що абразивне зношування превалює над усіма іншими видами зношування: близько 40% деталей мають чисто абразивне зношування й 50% – абразивне зношування в комбінації з іншими видами зношування й руйнувань поверхневого шару, близько 83% деталей машин має зношування до 0,6 мм.

Аналіз методів та способів відновлення деталей машин показав, що частка



деталей, що відновлюються на підприємствах агропромислового комплексу методами наплавлення та способами газотермічного напилення становить понад 60% (34,4 та 26,1% відповідно).

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сідашенко О.І. Ремонт машин та обладнання: Підручник. / О.І. Сідашенко, Т.С. Скобло, О.В. Тіхонов, та ін.; За ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. -2-е вид. перероб. доп. – Х.: «Міськдрук», 2014. – 741 с.
2. Гавриш А. П. Зміцнення металевих поверхонь деталей машин та механізмів / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, М. П. Підберезний. – К. : Наук. думка, 1995. – 174 с.
3. Гавриш О. А. Системные технологии финишной обработки деталей / О. А. Гавриш, Т. А. Роик, А. П. Гавриш. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 388 с.
4. Гевко Б. М. Технологія сільськогосподарського машинобудування : підручник / Б. М. Гевко, І. С. Гевко, Д. Л. Радик. – К. : Кондор, 2006. – 490 с.
5. Лузан С.О. Комплексна оцінка номенклатури деталей, які визначають ресурс мобільної техніки та її безпеку / С.О. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: 2014. – Вип. 148. – С. 478-485.
6. Теоретические основы технологи ремонта машин: Учебник в 3-х т. / Сидашенко А.И., Науменко А.А., Скобло Т.С. и др.. / Под ред. А.И. Сидашенко, А.А. Науменко. Том 1. (Теория и технология производственных процессов ремонта машин) – Харьков: ХНТУСХ, 2005. – 590с.
7. Doshchekina I., Tatarkina I., Storchak O. Enhancement of durability of tractor suspension axles // Автомобильный транспорт. 2017. Вып. 41. С. 38-42.
8. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М. Белас О.М., Войтов В.А. [та ін.]. За ред. Войтова В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342с.
9. Іванишин В., Іліяшик В., Дуганець В. Аналіз конструкцій і приставок до зернозбиральних комбайнів та особливості їх використання на збиранні сої та ріпаку // Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження. – 2016. – № 20. – С. 187-197.
10. Сидоров С. А., Миронов Д. А., Ценч Ю. С., Миронова А. В. Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворежущих рабочих органов в различных почвенных условиях // Инженерные технологии и системы. - 2020. – Том 30, № 4. – С. 699-710. – DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.

11. Sidorov S. A., Mironov D. A., Khoroshenkov V. K., Khlusova E. I. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines // *Welding International*. – 2016. – Vol. 30, Issue 10. – P. 808–812. –DOI: 10.1080/09507116.2016.1148408.
12. Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин. Том 1 / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Скобло Т.С. та інші. \ За ред.О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. – Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018 – 416с.
13. Практикум з ремонту машин. Технологія ремонту машин, обладнання та їх складових частин. Том 2 / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Скобло Т.С. та інші. \ За ред.О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. – Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018 – 491с.
14. Технологія ремонту машин та обладнання. Курс лекцій. / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Лузан С.О. та інші. Навч. посібник – Харків: ХНТУСГ, 2017. – 361с.
15. Sidorov S. A., Mironov D. A., Khoroshenkov V. K., Khlusova E. I. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines // *Welding International*. – 2016. – Vol. 30, Issue 10. – P. 808–812. –DOI: 10.1080/09507116.2016.1148408.
16. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. – Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. – 370 с.
17. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide / S. A. Sidorov, Ya. P. Lobachevskii, V. K. Khoroshenkov [et al.]. // *Metallurgist*. – 2018. – Vol. 61. – P. 1023–1028. – DOI: 10.1007/s11015-018-0602-5.
18. Семчук Г.И. Динамика изнашивания лап культиваторов // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2013. – № 6/5(14). – С. 27-28.
19. Mudarisov S. G., Gabitov I. I., Lobachevsky Y. P. [et al.]. Modeling the Technological Process of Tillage // *Soil & Tillage Research*. – 2019. – Vol. 190. – P. 70–77. –DOI: 10.1016/j.still.2018.12.004.
20. Семкин Д.С. О влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию. *Вісник СіБАДИ*. 2017. Вип. 1(53). С. 37-43.
21. Ремонт сільськогосподарської техніки. Довідник / В.К. Аветісян, В.А. Бантковський, В.О. Деєв та інші; За ред.. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К.: Урожай, 1992. – 304с.

22. Сухарев Э.А. Общая теория капитального ремонта машин:Ровно, РГТУ, 2001. – 202с.
23. Матеріалознавство: навчальний посібник / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, Т. С. Климова, І. Г. Черниш. – К.: НАУ, 2012. – 492 с.
24. Дослідження зношуючої здатності ґрунтів та її вплив на довговічність робочих органів ґрунтообробних машин / А.В. Захаров, І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, О.В. Сайчук // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання – Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13, том 1. – С. 106-117.
25. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап / І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, А.В. Захаров, О.О. Гончаренко// Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2022. – № 4(83). – С. 37-42.
26. Максимов И. И., Алексеев В. В. Гидрофизика почв в мелиорации : Монография. Київ : Новий час. – 2017. – 280 с.
27. Оптимізація виробництва в машинобудуванні:навчальний посіб. для студентів закл. вищ. освіти / Н.М. Колпаченко, О.В. Сайчук, В.К. Аветісян,В.А. Бантковський та ін.. – Харків: Діса плюс,2020. – 250с.
28. Грядунов С.С., Сиваков В.В. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Том 31, № 4. – С. 544-558. – DOI: 10.15507/2658-4123.031.202104.544-558.
29. Ryabov V. V., Motovilina G. D., Khlusova E. I. [et al.]. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – P. 839–844. – DOI: 10.1007/s11015-016-0374-8.
30. Luzan, S.A., Sidashenko, A.I., Luzan, A.S. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using shs-process (2020) Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 42 (4), pp. 541-552. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.42.04.0541>.
31. Luzan, S.O., Luzan, A.S. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Deposited Materials of the Ni–Cr–B–Si System with Inclusions of Dispersed Phases (2020) Materials Science, 56 (3), pp. 381-388. DOI: 10.1007/s11003-020-00441-x.

### **1.3. Вивчення вхідних та вихідних параметрів варіаторів комбайнів та розробка рекомендацій для відновлення деталей варіаторів зернозбиральних комбайнів**

Виконавець: ст. викл. Лисенко С.В.

#### **ВСТУП**

Об'єкт і предмет дослідження є процеси, що призводять до втрати працездатності та ефективного функціонування варіаторів комбайнів.

Закономірності процесу зносу і пошкодження спряжень варіатора, а також конструктивно – експлуатаційні фактори, що їх обумовлюють.

Мета роботи - прогнозування і забезпечення необхідного ресурсу варіаторів зернозбирального комбайна КЗС-9-1 «Славутич».

#### **1.3.1. Постановка завдання досліджень**

Розробити методика по вивченню надійності, а також вхідних і вихідних параметрів варіаторів зернозбиральний комбайнів, визначення структури навантаження варіатора від дії експлуатаційних навантажень, встановлення закономірностей процесів накопичення ушкоджень деталей варіатора, розробити рекомендації та документацію по відновленню деталей варіаторів зернозбиральних комбайнів при експлуатації

#### **1.3.2. Матеріали і методи досліджень**

Під час проведення досліджень рішення поставлених задач забезпечується використанням методології з'єднання теоретичних і експериментальних досліджень, узагальнення відомих наукових результатів. При вирішенні окремих завдань використовувався комплекс обчислювальних методів теорії надійності, статистичний аналіз, сучасні методи інженерного аналізу і використані пакети програм «SolidWorks», та ін. Застосування існуючих і розроблених експериментальних методик.

Наукова новизна розробок полягає у встановленні та визначенні структури навантаженості варіатора від дії експлуатаційних навантажень, розробці методики по вивченню надійності, а також вхідних і вихідних параметрів варіаторів

зернозбиральний комбайнів. Встановленні закономірності процесів накопичення ушкоджень деталей варіатора. Розробці рекомендацій та документацію по відновленню деталей варіаторів зернозбиральних комбайнів при експлуатації.

### 1.3.3. Результати та обговорення

*Встановлено*, що надійність варіаторів визначається їх технічним станом. У зв'язку з цим важливо знати динаміку накопичення пошкоджень деталей варіаторів, види ушкоджень, характеристику кожного ушкодження, в загальному їх числі. Працездатність клинопасових варіаторів зернозбиральних комбайнів визначається геометричними параметрами пасового контуру і шківів, способом натягу пасів і величиною натягу, кінематичними, динамічними а також температурними параметрами режимів роботи передачі, як за величиною, так і за розподілом їх за часом. Параметричними відмовами варіаторів можна вважати граничний знос шківів і пасів, який призводить до неприпустимого ковзання. Перевантаження викликають не тільки великі напруги в пасах, а й короткочасне підвищене ковзання, що переходить в буксування, яке призводить до їх нагрівання і інтенсивного зносу. Ці явища створюють також осередки втомних руйнувань паса.

У кордтканевих пасах руйнування часто починається з тріщин нижнього шару кордтканини, що примикає до гуми шару стиску. Обрив окремих волокон кордтканини призводить до тріщин в нитках в напрямку, близькому до перпендикуляру до поздовжньої осі паса, які, розростаючись і переходячи на наступний шар тканини, перерізають весь несучий шар. Іноді тріщини викликають розшарування несучого шару паса. Відстань між тріщинами приблизно однаково (для пасів перетину  $50 \times 22$  воно дорівнює приблизно  $4 \div 6$  см). При цьому зовні пас виглядає абсолютно неушкодженим, лише іноді з'являються різкі глибокі тріщини гуми шару стиску. На загальний ресурс пасів істотно впливають умови їх зберігання в період між збиральними сезонами.

Встановлено, що найбільш характерний вид ушкоджень шківів - знос робочої поверхні, залежить від часу роботи. Проведено аналіз відмов варіаторів і зроблено

висновок, що основні несправності, що виникають в блоках варіаторів, мають технологічний і експлуатаційний характер.

У гідрокерованих варіаторах зернозбиральних комбайнів необхідне натягнення гілок паса створюється осьовим впливом пружин, кулачків або натискних пристроїв гідравлічного типу. Викладено метод визначення осьових зусиль, який враховує фактори, що впливають на величини цих осьових зусиль.

Встановлено, що при перехідних режимах в процесі регулювання швидкості взаємодія паса зі шківками таке ж, як і при сталій швидкості. Різниця виявляється лише в тому, що при зближенні дисків шківки кут ковзання зменшується і тягова здатність даного шківки збільшується; при роздвіженні дисків відбувається зворотна картина.

– *доведено ефективність*, забезпечення довговічності паса варіатора, за рахунок вибору профілю конусної поверхні шківків, що виключає ексцентриситет дії сил на всіх радіусах вигину та дає можливість забезпечити належне контактування паса. У зв'язку з наявністю формованого зуба в шарі стиснення паса суттєво знижується жорсткість при згині і, відповідно, напруги, що підвищує довговічність паса.

– *представлено*, що заходи для підвищення терміну служби деталей варіаторів повинні бути спрямовані на усунення можливості їх перекошу, забезпечення мінімального осьового переміщення, а також на розробку раціональних конструкцій деталей спряжень, розробку матеріалів і видів обробки для їх виготовлення і підбір відповідних сортів мастила для застосування в експлуатації.

Гідрокерований варіатор зернозбирального комбайна КЗС-9-2 дозволяє змінювати оберти молотильного барабана в залежності від культури та умов збирання в широкому діапазоні швидкостей, від  $n_{\max}=1013 \text{ об}^{-1}$  до  $n_{\min}=465 \text{ об}^{-1}$

Для варіатора молотильного барабана, що містить відносно невелику кількість деталей, виконаний поелементний аналіз конструкції.

Варіатор молотильного барабана складається з ведучого блоку і блоку веденого. Їх маса становить відповідно 57,3 кг та 73.4 кг. Блок ведучий складається з 2

складальних одиниць (диск рухомий і нерухомий диск) і 25 деталей, 18 з яких стандартні вироби. Блок ведений складається з 2 складальних одиниць (диск нерухомий і рухомий диск) і 91 деталі, 47 з яких стандартні вироби.

При експлуатації варіаторів виникають такі основні пошкодження деталей: руйнування пасів, зношування конусної поверхні дисків, зношування поверхні під маточину рухомого диска, зношування поверхні отвору під маточину приводного шківів, поверхні отвору під напрямний палець, шліцьових з'єднань.

Критеріями при визначенні оптимальних допустимих відхилень параметрів (допустимих спрацювань) можуть бути: мінімум питомих витрат на одиницю напрацювання машин, мінімальна імовірність відмови елемента (максимальна безвідмовність), максимальний строк служби елемента та інше. На основі цього приймається рішення про можливість використання деталі без її відновлення (заміни) за умови забезпечення надійної роботи відремонтованого об'єкта у міжремонтний період. Враховуючи це, а також переваги і недоліки того чи іншого критерію встановлено, що оптимальні допустимі при ремонті параметри технічного стану (допустимі спрацювання) визначаються за умови забезпечення максимальної безвідмовності відремонтованого елемента у міжремонтний період.

– *аргументовано*, що перспективним напрямом у питанні при вирішенні задач про ресурс машин необхідно враховувати зниження металоємності, що досягається ускладненням конструкторських рішень, застосування нових технологій і матеріалів з більш високими характеристиками міцності, нових покриттів і пально – мастильних матеріалів, вирішити питання про величину напрацювання до якої доцільно експлуатувати кожен конструктивний елемент.

Принципова відмінність клинопасової передачі та варіатора закладено у способі створення натягу паса. У передачах це забезпечується за рахунок зміни параметрів поздовжнього контуру, наприклад, збільшення межцентрової відстані  $a$ , в варіаторах – за рахунок зміни положення конусних дисків регульованого шківів при сталості міжцентрової відстані.

З метою вирівнювання тиску та підвищення довговічності паса запропоноване новітнє профілювання дисків.

Кут профілю паса не залишається постійним під час роботи на різних діаметрах дисків. Величина зміни кута паса при переміщенні його з більшого на менший діаметр дисків залежить від конструкції та перерізу паса, величини найменшого діаметра та різниці між найбільшим та найменшим діаметрами дисків. Наявність не- повного прилягання паса до дисків погіршує умови його роботи та викликає нерів- номірне зношування бічних граней. Для поліпшення умов роботи та рівномірного зносу бічних поверхонь паса диски повинні профілюватися по кривій — дузі кола, що забезпечує плавне зменшення кута від більшого діаметра до меншого відпо- відно до закону зміни кута профілю паса.

Профілювання дисків є доцільним для пасів із розрахунковою шириною 40 мм і вище, у яких величина деформації кута клину виходить значною, внаслідок чого порушується прилягання бічних граней паса до дисків.

– *обґрунтовано*, що підвищення швидкохідності, вимог до вібростійкості, надійності, безшумності, займаним габаритам викликали подальший розвиток в загальній гаммі механічних передач, особливо передач тертям гнучким зв'язком (ПТГСЗ). На такі передачі, особливо клинопасові варіатори, в даний час покладаються функції для зміни обертів молотильного барабана, вентилятора, мотовила, тощо, в залежності від культури і умов збирання в широкому діапазоні швидкостей. Не підлягає сумніву, що широке використання варіаторів швидкості в різних галузях техніки може дати значний економічний ефект. Як відомо, продуктивність багатьох механізмів може бути значно збільшена за рахунок зміни швидкості робо- чої машини. Тому проблема безступінчатого регулювання за допомогою варіаторів швидкості вельми актуальна.

За експлуатаційними даними близько 6 - 10% відмов зернозбирального комбайна припадає на клинопасові передачі (КПП).

## ВИСНОВКИ

*Розроблено*, досліджено та охарактеризовано надійність варіаторів зернозбирального комбайна. Визначені причини відмов варіаторів на основі аналізу даних по відмовам основних конструктивних елементів варіаторів.



*З'ясовано*, що при розрахунку та визначенні діючих навантажень на варіатор молотильного барабана необхідно використовувати зв'язок осьової сили зі швидкісним і силовим режимом роботи.

*Деталізовано*, в результаті виконаних досліджень вивченню технічного стану піддавалися основні деталі які найбільше впливають на довговічність і безвідмовність варіатора молотильного барабана: диск рухливий; диск нерухомий; маточина рухлива; маточина нерухома; вал порожнистий, маточина приводна.

При експлуатації варіаторів виникають такі основні пошкодження деталей: руйнування пасів, зношування конусної поверхні дисків, зношування поверхні під маточину рухомого диска, зношування поверхні отвору під маточину приводного шківів, поверхні отвору під напрямний палець, шлицевих з'єднань.

Перспективи подальшого використання отриманих результатів, або подальшого розвитку – планується впровадження отриманих результатів дослідження в навчальний процес ДБТУ та у виробництво, а також розробка інноваційної технології відновлення деталей варіаторів сільськогосподарської техніки.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- наукових публікацій у матеріалах наукових конференцій;

1. Розрахункові дослідження технологічних похибок деталей варіаторів зернозбиральних комбайнів та їх вплив на довговічність / Лисенко С.В. / Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» ДБТУ, 24 – 25 листопада, Харків – 2022, с.192-194.

2. Підвищення надійності та довговічності сучасних клинопасових варіаторів комбайнів / Лисенко С.В. Брик І.І. / Матеріали міжнародного форуму молоді. «Молодь і сільськогосподарська техніка в ХХІ столітті» Збірник тезисів ХVІІІ-го міжнародного форуму молоді. ХНТУСГ. 2022. 31.03.22-01.04.22. с. Харків 2022.

3. Проектування сучасних клинопасових варіаторів зернозбиральних комбайнів / Лисенко С.В. Брик І.І. Сметана А.Ю./ Матеріали I Всеукраїнської інтернет-конференції «Сервісна інженерія та нові матеріали в машинобудуванні», ДБТУ, 10-11 лютого 2022, с.57-58, Харків.

4. Розрахунок навантажень та забезпечення довговічності клинопасових варіаторів молотильного барабана / Лисенко С.В. / Всеукраїнської науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПВ» 9–10 травня 2023 року Харків, с.26.

5. Підвищення надійності клинопасових варіаторів зернозбиральних комбайнів / Лисенко С.В. / Матеріали V Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» ПДАУ, 21-22 лютого, 2023 Полтава, с. 93-96.

6. Підвищення зносостійкості дискових робочих органів лазерним термозміцненням / О. Д. МАРТИНЕНКО, А. К. АВТУХОВ; С. В. ЛИСЕНКО; М. Л. ТИМОШЕНКО, Р. В. НОВІКОВ. / ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (1906-1987) «КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ» с.24, 23-24 лютого 2023 року м. Київ.

7. Вплив кількості проходів електродінструментом при електроісровій обробці на якість нанесеного покриття / О. Д. Мартиненко, С. В. Лисенко та інш. / Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (1906-1987), «КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ» с.111,23-24 лютого 2023 року м. Київ.

Участь у наукових конференціях за темою НДР – результати виконаної НДР було оприлюднено на наступних наукових конференціях:

8. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» ДБТУ, 24 – 25 листопада, Харків – 2022, с.192-194.

9. Матеріали міжнародного форуму молоді. «Молодь і сільськогосподарська техніка в XXI столітті» Збірник тезисів XVIII-го міжнародного форуму молоді. ХНТУСГ. 2022. 31.03.22-01.04.22. с. Харків 2022.

10. Матеріали I Всеукраїнської інтернет - конференції «Сервісна інженерія та

нові матеріали в машинобудуванні», ДБТУ, 10-11 лютого 2022, с.57-58, Харків.

11. Всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ» 9–10 травня 2023 року Харків, с.26.

12. Матеріали V ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА ІНТЕРНЕТ-КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ» ПДАУ, 21-22 лютого, 2023 Полтава, с. 93-96.13. ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володи-мира Савовича (1906-1987) «КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ» с.24, 23-24 лютого 2023 року м. Київ.

## ТЕМА 2

# ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА РАХУНОК ДОСЛІДЖЕННЯ, РОЗРАХУНКУ І МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ВИРОБІВ

### 2.1. Теоретичне та експериментальне моделювання і прогнозування структурування та властивостей хромовмісних сплавів: Причини і характер деградації карбідної фази в чавунах при експлуатації виробів

Виконавці: проф., д.т.н., проф. Ключко О.Ю., аспірант Воронов О.С.

#### ВСТУП

Високовуглецеві сплави (чавуни) знаходять широке застосування в металургії та машинобудуванні. Їх використовують для виготовлення виробів, що працюють в умовах високих питомих тисків, тертя та корозії.

Хромовмісний чавун, легований 0.9-1.5%Cr, 1.5-4.5%Ni застосовують для виготовлення робочого інструменту - валків для формування різних профілів прокату на листових, велико-, середньо- і дрібносортовних станах гарячої прокатки [1,2]. При цьому, їх виготовляють різними способами: стаціонарним і відцентровим методами лиття [3].

Структура такого матеріалу складається з карбідів цементитного типу легованих хромом, невеликої частки (до 7-10%) компактної або пластинчастої форми графіту, а також мартенситної матриці і залишкового аустеніту.

Основною причиною пошкоджуваності робочої поверхні таких валків є руйнування карбідної фази, частка якої сягає 25-35%. Найбільша пошкоджуваність і подальша деградація цієї фази відзначається при наявності в структурі включень масивних карбідів цементитного типу. Спостережуване пов'язано з тим, що під дією високих питомих тисків (в робочому шарі листових валків чистових клітей станів гарячої прокатки тиск досягає 30 GPa) і циклічних впливів з охолодженням водою, в цієї фазі формується дислокаційна упорядкована структура, що змінює її стабільність [2]. Проведеними дослідженнями [4,5] було встановлено, що значний внесок у деградацію

структурних складових, формування дефектів кристалічного стану та стимулювання дифузії вуглецю в умовах дії локальних деформацій, вносять і графітові, особливо пластинчасті виділення.

В опублікованих роботах [2] показано, що дефекти кристалічної будови (дислокації), виявляють двома основними методами: аналізами тонкої фольги на просвіт і спеціальним вакуумним травленням за формуванням фігур (ямок) травлення. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки. Разом з тим, обидва методи не дають повного уявлення щодо ролі дислокацій в дифузійних процесах різних фаз, особливо карбідних, характерних для легованих чавунів з масивними включеннями цементиту або спеціальних карбідів.

В останні роки розвиток методів оптико-математичного дослідження структуроутворення, що базується на можливості визначення мінливості параметрів [6], які характеризують енергетичний стан системи, дозволяє виявляти не тільки характер перебігу дифузії і компонентів, але й оцінювати тип формованих нових фаз, їх розподіл, а також деградацію карбідної фази в умовах дії локальних напружень і робочих температур використовуваних виробів.

У зв'язку з цим, **метою досліджень** було вивчення причин і характеру деградаційних процесів, що відбуваються в карбідній фазі хромовмісного чавуну, який найбільш широко застосовується для прокатних валків. Це дозволить намітити основні напрямки розробок на створення нової технології їх виробництва з найбільш стабільними властивостями в експлуатації.

### 2.1.1. Матеріали та методи досліджень

Для моделювання процесів, що відбуваються при деформації і нагріванні до температур робочого шару валка ( $600^{\circ}\text{C}$ ), дослідження проводили на установці типу системи Лозинського (вакуумній камері, з системою візуальної фіксації, в якій відбувається нагрів зразка і його деформація). Зразок, відібраний від робочого шару валка з хромовмісного чавуну розміром  $3 \times 4 \times 80\text{мм}$ , жорстко закріплювали, а нагрівали тільки середню його частину. Область нагріву становила  $\sim 15\text{мм}$ . Найбільш висока температура відповідала вузької зоні не більше  $3\text{мм}$ . Дослідження здійснювали при спостереженні *in situ* і нагріванні  $250^{\circ}\text{C}$ - $600^{\circ}\text{C}$  в вакуумі  $0.3\text{Pa}$ , час травлення  $30\text{хв}$ .

Структурні зміни в карбідній фазі оцінювали скануючим електронним мікроскопом (SEM) JEOL JSM-6390LV при збільшеннях  $\times 4700$  (рис.2.1). Залежно від температури вакуумного травлення виявили різну ступінь мінливості ямок травлення, яке описували оптико-математичним методом.

Доказом того, що спостережені ямки травлення відповідають місцям виходу дислокацій, є наявність фігур травлення правильної форми, переміщення і взаємодія їх при термічному травленні, підвищення щільності в процесі деформації, формування субмікроструктури.

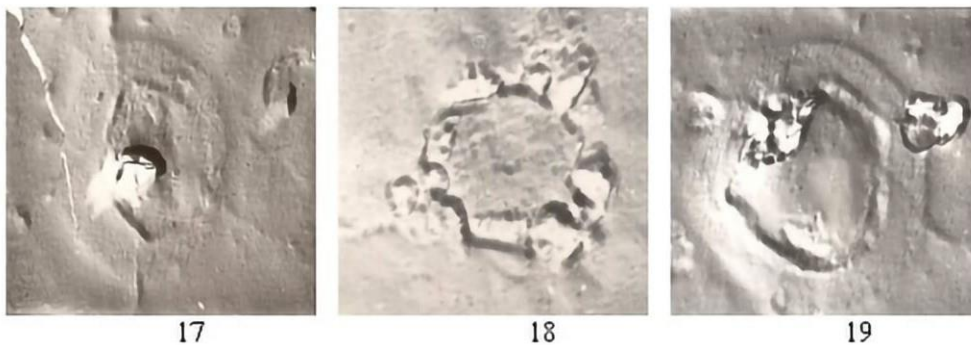


Рис.2.1. Електронні мікрофотографії структури ямок травлення та рельєфу, навколо одиничне розтравленої дислокації карбідної фази (фотографії 17-19) хромо- вмісного валкового чавуну,  $\times 4700$ . Вакуумне травлення

Опис електронних зображень базувався на нових методиках і підходах в дослідженнях, наведених в роботах [7,8].

Аналіз проводили відповідно до розташування обчислюваних значень на зображеннях металографічної структури в цифровому форматі .bmp, поділеному на фрагменти розміром  $3 \times 3$  пікселя.

У кожній точці з координатами  $(x, y)$  металографічного зображення вираховували умовний колір, що задавався значенням лапласіану функції  $C(x,y)$ , за допомогою якого описували дисипацію енергії [9] в процесі структуроутворення:

$$L(x, y) \equiv \Delta C(x, y) = \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2} \quad (2.1)$$

$C(x, y)$  в кінцеве-різницевого поданні матиме вигляд матриці  $C_{ij}$  розміром  $3 \times 3$  пікселя:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{i-1,j-1} & c_{i-1,j} & c_{i-1,j+1} \\ c_{i,j-1} & c_{i,j} & c_{i,j+1} \\ c_{i+1,j-1} & c_{i+1,j} & c_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Обробку такої матриці виконували шляхом послідовного сканування кожного пікселя, задаючи його як точку, що знаходиться всередині фрагмента заданого розміру (3×3). За координати брали піксель зображення (щодо центрального елемента  $c_{i,j}$ ;  $i$  – номер строки,  $j$  – номер стовбця). Де  $c_{i,j}$  – код кольору в заданому цифровому форматі. Кінцеве-різницеve подання лапласіану (2.1) для кожної точки аналізованого фрагмента зображення мало вигляд:

$$L(x, y) \approx \frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 c}{\Delta y^2} = L = c_{ij} + c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}, \quad (2.3)$$

де крок за координатами на цифровому зображенні  $\Delta x = \Delta y = 1$ .

Мінливість складу, оцінювану в одній конкретній точці фази обраного фрагмента зображення, задавали співвідношенням, числа збігів умовного кольору середньої точки по відношенню до її навколишніх.

На підставі цього, був розроблений новий багатоступінчастий підхід аналізу структурного стану карбідної фази при нагріванні і локальної деформації, дифузії в цієї зоні. Локальна деформація була отримана за рахунок жорсткого закріплення зразка і відсутності умов для релаксації напружень.

### 2.1.2. Результати досліджень та їх обговорення

Згідно оптико-математичного опису фаз цифрового формату .bmp, розглядали відтінки кольору в проміжку від 0 до 255, розділеного на 4 групи фаз, що включали 16 інтервалів (умовних кольорів), для яких умовний колір 01 - ставився до виділення графіту (ймовірно квазікристалічної графітової плівці, оскільки індентор Н $\cap$  не порушував її цілісності); 02-09 - фериту з різним ступенем пошкодженості і вуглецю; 10 - бейніту (перехідної фази між феритом і цементитом, пересиченої вуглецем, близької за концентрацією цього компонента до аустеніту); 11-16 - карбідним фазам нестехіометричного складу і цементиту.

В результаті обчислень на основі сканування пікселів зображення встановлені всі випадки збігу значень умовних кольорів в точках всередині кожного заданого фрагмента зображення з середньою точкою  $c_{i,j}$ . Виходячи з розмірності матриці фрагмента (2), можливі 7 поєднань груп фаз.

При аналізі фази, що відрізняються і їх поєднання на цифрових зображеннях мі-

кросструктур (див. рис.2.1) були представлені у відтінках сірого кольору для кожного поєднання (рис.2.2), а також додатково описані різними кольорами на одному зображенні для кращої ідентифікації фаз (рис.2.3). Частка виявлених окремих кольорів та їх поєднань на цих зображеннях наведені в табл.2.1 і 2.2.

Виявлені ямки травлення і, описані в кольорі поєднання (див. рис.2.3), згідно з табл.2.2, характеризуються наступним чином: 01 - червоний колір - вуглець (графітова плівка); 06 - жовтий - ферит, насичений вуглецем; 10 - блакитний - бейніт; 11 - синій - карбіди типу  $Fe \sim C$  (ймовірно змінного складу); 15 - чорний - карбіди імовірно [2] типу  $Fe \sim 2 C$ ; 16 - зелений - цементит.

Таблиця 2.1. Співвідношення виявлених поєднань груп фаз при скануванні всередині фрагментів  $3 \times 3$  пікселі

Кількість виявлених поєднань груп фаз, %							Структура, №
1	2	3	4	5	6	7	
графіт	бейніт	карбіди	ферит + графіт + бейніт	графіт + карбіди	бейніт + карбіди	ферит + графіт + бейніт + карбіди	
16,2	00,1	60,4	00,7	18,8	03,0	00,8	17
70,5	00,1	09,7	00,6	17,2	01,4	00,5	18
19,6	00,6	50,4	01,9	21,8	04,3	01,5	19

Таблиця 2.2. Виявлені групи фаз і кількісна оцінка поєднання їх умовних кольорів

Інтервал умовних кольорів, №			Поєднання групи фаз, №	Частка поєднань, %, для фото мікроструктур		
				17	18	19
01	0	0	1	15.2	69.7	17.4
06	0	0	1	00.0	00.0	02.1
11	0	0	3	15.9	02.1	13.6
15	0	0	3	01.7	00.0	03.9
16	0	0	3	15.5	04.0	13.6
11	16	0	5	27.2	03.4	17.5
01	16	0	5	15.8	13.0	14.2
01	15	0	5	01.3	02.7	05.5
10	11	0	6	02.8	01.3	03.9
06	10	0	4	00.0	00.0	01.9
15	16	0	3	00.0	00.0	01.8
01	11	16	5	01.4	01.5	01.6
06	10	11	7	00.0	00.0	01.1

При цьому блакитний колір бейніту добре проявляється при збільшеннях тільки в  $\sim 10000$  раз, і він знаходиться в зонах не тільки поєднання з кольором 11, але і самостійно, у вигляді окремих зерен, розташованих в зонах локальних деформацій,



а також ланцюжків, що описують їх границі.

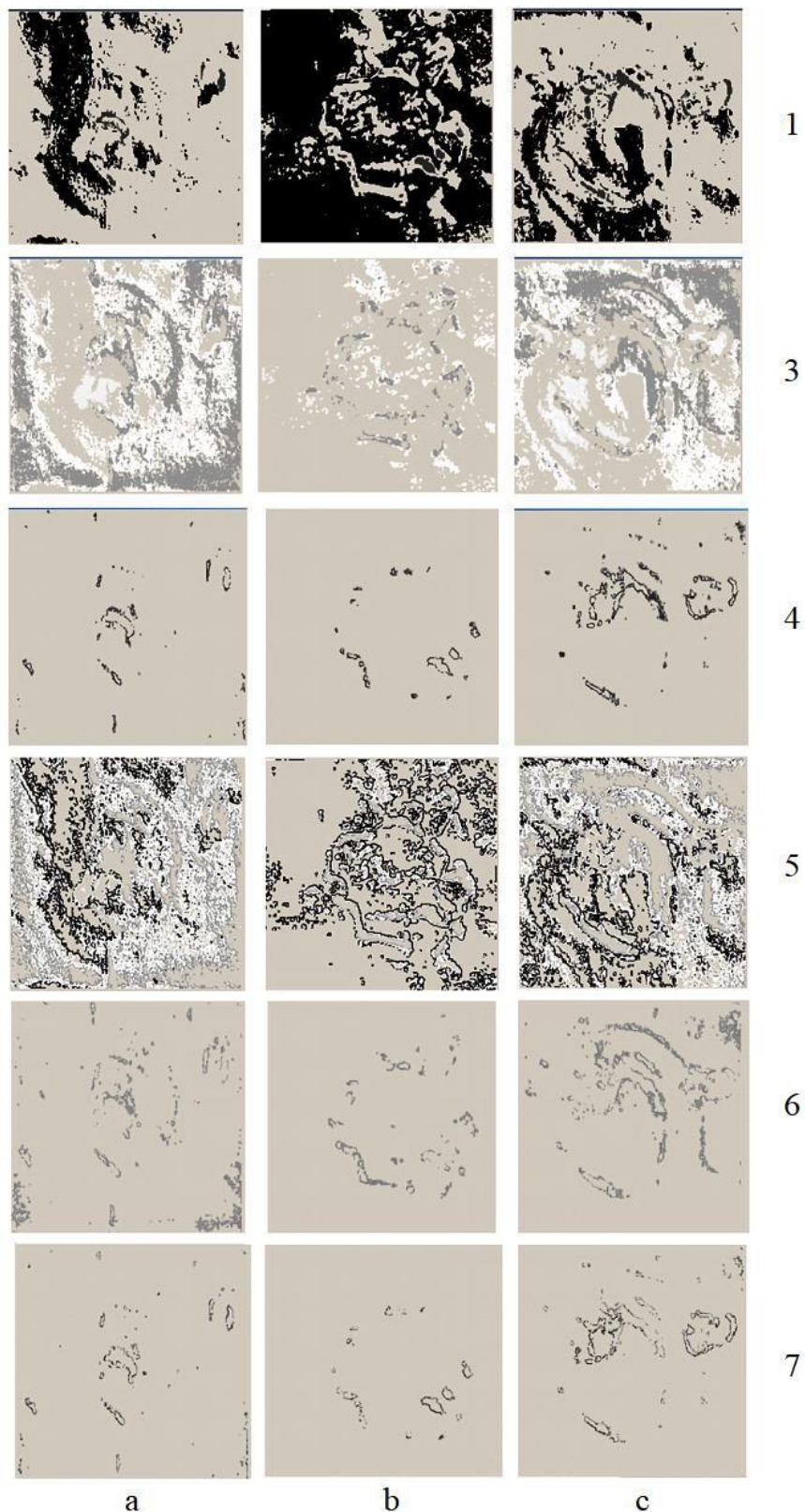


Рис.2.2. Розподіл мінливості виявлених поєднань груп фаз (інтервалів умовних кольорів) для зображення рельєфу поверхні в місці формування дислокаційної структури (див. рис.2.1); а, б, с - структури 17,18,19 відповідно. Справа цифрами вказані номери поєднань груп фаз (див. табл.2.1 і 2.2)

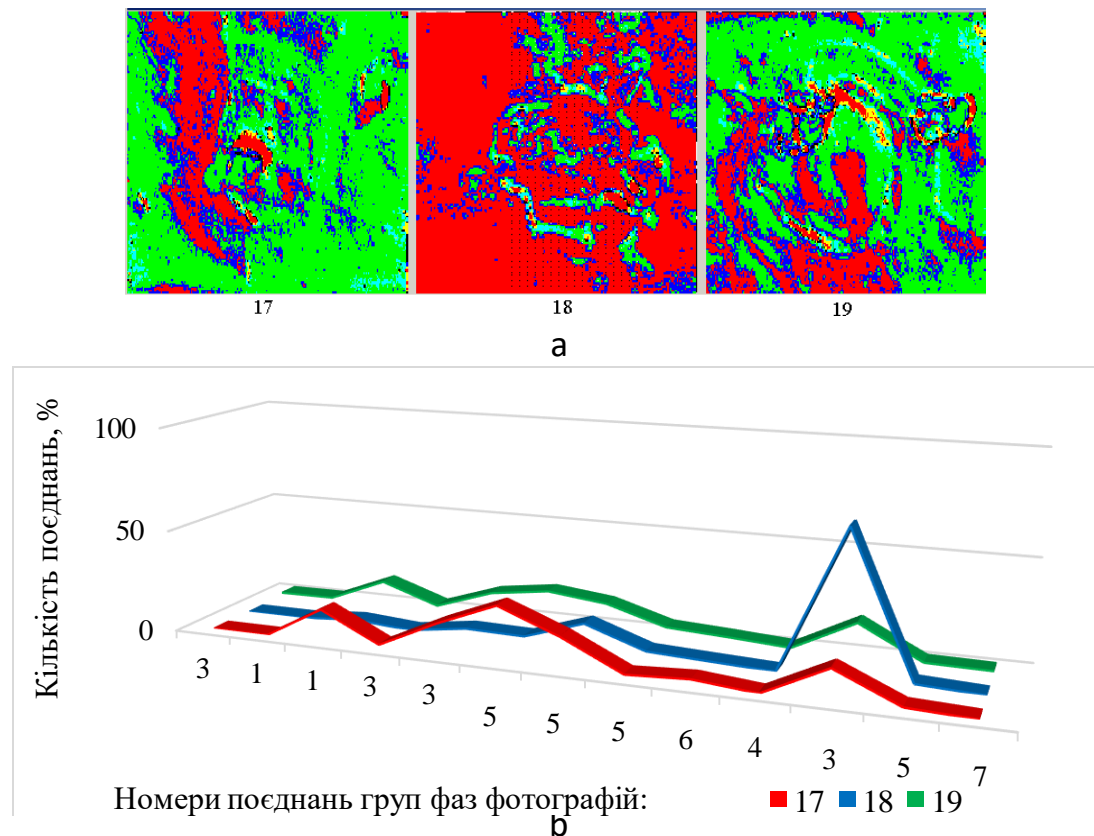


Рис.2.3. Формована неоднорідність в областях дислокаційної структури карбідної фази Fe<sub>3</sub>C для фотографій 17-19 (див. рис.2.1): а): розподіл мінливості; б) кількісна оцінка ступеня неоднорідності в цементиті за місцем виявлених дислокацій

Такий колір, практично не фіксується, що відображено у незначній кількості (див. табл.2.2), однак він чітко проявляється в подвійних і потрійних поєднаннях з карбідною фазою типу Fe<sub>x</sub>C<sub>y</sub> (кольором 11) і феритом, насиченим вуглецем (колір 06) (див. рис.2.2, поєднання 4, 6 і 7).

Одночасно виявлено фази, що утворюють парні сполуки (поєднання кольорів), які суттєво визначають перебіг процесів, що відбуваються.

Це, в першу чергу, зв'язок карбідів нестехіометричного складу (інтервал умовного кольору 11) і цементиту (інтервал 16), що утворюють поєднання номер 5 (див. табл.2.2 і рис.2.2), яке, значною мірою, характерне для умов нижчої температури вакуумного травлення (див. рис.2.1, структура 17).

При такій температурі зберігається зелений колір базового (до травлення) цементиту (див. рис.2.3, а). Формування карбідів нестехіометричного типу, особливо

складу, що задається інтервалом умовного кольору 11 (синій колір), супроводжується появою значної частки фази, позначеної червоним кольором, яка, ймовірно, відповідає квазікристалічному графіту, і чітко виявляється оптико-математичним аналізом (інтервал умовного кольору 01). Максимальна частка такої фази на поверхні досягає 69.7%. Така фаза фіксується і в поєднаннях з цементитом, що входять в поєднання груп фаз номер 5 (див. табл.2.1, 2.2 і рис.2.2).

В серії робіт [10,11] експериментально і теоретично було також показано розкладання сполуки метал-вуглець з утворенням різних типів структур при впливі підвищених температур, тиску, в умовах вакууму та інших чинників. Процеси розкладання з'єднань полегшуються при наявності нестабільної сполуки. Виділення вуглецю автори ідентифікували, як шари з наносфер, аморфних і кристалічних ниток, аморфних частинок сферичної і складної форми, аномального розподілу пір, шару- ватої або стовпчастої структури, монокристалів.

З аналізу отриманих фотографій ямок травлення в даній роботі, встановлено, що при більш низькій температурі вакуумного травлення (фото структур 17 і 19) виявляються деформаційні області навколо виходу дислокацій, а при  $t = 600^{\circ}\text{C}$  (фото 18) спостерігається їх релаксація. При цьому всередині ямок травлення, сформованих при більш низькій температурі, відзначається наявність дифузійного потоку, подібного ламінарної течії рідини в трубопроводі під тиском. Залежно від рівня локальних напружень, області базового цементиту мають червоний колір, тобто покриваються графітовою плівкою, а під нею одночасно фіксується виділення нестехіометричного карбїду, що входить в умовний інтервал 11 (синього кольору). У цих зонах, а також в межах ямок травлення, виявлені додатково нові фази і їх з'єднання. Вони добре розшифровуються, згідно з розподілом інтервалів умовних кольорів та їх поєднань (див. табл.2.1). Це карбїди, відповідні умовним кольорам 11 і 16, а також невеликій частці карбїдів імовірно типу  $\text{Fe} \cap 2\text{C}$  (чорний колір - інтервал номер 15) - до 3.9%.

Частка фериту не перевищує 2.1% і фактично відсутня в поєднанні з іншими фазами. Поява цієї фази (інтервал умовного кольору 06) відзначається тільки на

одній з фотографій (див. табл.2.2) структури 19 в поєднанні з бейнітом і нестехіометричним складом карбідів (інтервал кольорів 11) і з чітко вираженою зоною локальних напружень біля границі з ямкою травлення (див. рис.2.3, кольори жовтий, блакитний і синій) на фотографії 17 при збільшенні лише до ~ 10000 раз.

Потрійне поєднання карбідних фаз (кольорів 11,16) і графіту (інтервал 01), що відноситься до поєднання груп фаз під номером 5 (див. табл.2.2, рис.2.2), характеризується близькими значеннями для всіх фотографій (див. рис.2.1), що відповідає частці 1.4-1.6%. З цього випливає, що основне зменшення частки цементиту відбувається за рахунок виділення графіту з утворенням нової фази нестехіометричного карбиду складу  $Fe_{1-x}C_x$ . Такі фази і їх сполуки є максимальними при розвитку процесів деградації цементиту.

Одночасно з часткою і типом сформованих карбідних фаз оцінили і ступінь неоднорідності, виявлену в ямках травлення (див. рис.2.3, б). З наведених даних видно, що найбільша неоднорідність характерна для 3-ої групи поєднань фаз, особливо в умовах максимальних локальних деформацій і впливу більш високих температур (фото структури 18). Для інших варіантів (фото 17 і 19), де збережена основа цементиту, має місце істотно менша неоднорідність і вона також характерна для цих карбідних фаз.

Отримана інформація про нестабільність карбідної фази, оцінена спеціальним моделюванням при нагріванні і деформації, що відповідає умовам експлуатації прокатних валків з чавуну з великими включеннями [12], дозволяє намітити шляхи підвищення стабілізації структурного стану такого матеріалу за рахунок карбідної фази різного ступеня легування. Для вирішення цієї проблеми слід використовувати комплексний підхід, що базується на дробленні включень цементиту, його стабілізації і зменшенні локальних напружень при виготовленні і експлуатації виробів.

Ефективність такого підходу може бути вирішена одночасним використанням відцентрового лиття і спеціальним модифікуванням рідкого металу, які сприятимуть дробленню і стабілізації карбідної фази, не знижуючи її загальної частки і твердості сплаву, а також регламентованим охолодженням виливка в процесі криста-

лізації для розпаду залишкового аустеніту при використанні ефекту магніострикції карбідної фази [13,14]. Магнітне перетворення цементиту в хромовмісному чавуні знаходиться в інтервалі 190°-230°C і для реалізації цього ефекту вилівок масою 6-10 т повинен перебувати при кристалізації в такому інтервалі (охолодження в кесоні) протягом ~ 6 год. Це забезпечується нагрівом металевої форми перед заливанням металу до зазначеної температури магнітного перетворення легованого цементиту. Такий технологічний процес виробництва прокатних валків істотно підвищує стабільність фази карбиду і сплаву в експлуатації.

## ВИСНОВКИ

1. Розподіл фаз всередині ямок травлення, описаний з використанням енергетичних параметрів, що визначають функції потужності дисипації енергії і напружень, за допомогою оператора Лапласа і дивергенції [8] для різних поєднань фаз, дозволило встановити, що процес дифузії компонентів відбувається за аналогією з переміщенням рідини в трубі і має вид ламінарної течії. При цьому, також формуються різні фази і їх поєднання, що чітко фіксують дифузійні потоки, одночасно виділяючи границі локальних деформацій.

2. Детальний аналіз фотографій при збільшеннях ~ в 10000 раз дозволив виявити наступне. На більш ранніх етапах нагрівання при низькій температурі і в умовах розвитку локальних деформаційних зон в зерні цементиту з'являються ділянки навколо ямок травлення, в яких визначається розпад цементиту з виділенням нестехіометричного карбиду  $Fe \curvearrowright C \curvearrowright u$  (типу  $Fe \curvearrowright 1.8C$  і ін., згідно дослідженнями, проведеним в роботі [2]), позначеного синім кольором (див. рис.2.3, а), і графітової плівки (червоний колір, см. рис.2.3, а), що його покриває. Одночасно, в окремих зонах навколо ямок травлення розпад цементиту супроводжується виділенням точкових (одиничних включень фаз) карбідів імовірно типу  $Fe \curvearrowright 2C$ . Їх поява в цементиті може відзначатися як в одиничних випадках, так і в поєднанні з бейнітом і феритом (блакитний і жовтий кольори). Таке поєднання фаз характерно і для максимальної температури травлення з фіксацією ямок, у яких в результаті релаксації напружень відсутня зона локальних деформацій (фотографія структури 18).

3. Отримана інформація про причини і характер деградаційних процесів карбідної фази, що визначають загальну експлуатаційну стійкість прокатних валків, може бути ефективно використана при розробці нових комплексних технологій їх виробництва, зберігаючи необхідний рівень твердості і стабілізуючи карбідну фазу різних типів чавунів. Це може бути досягнуто застосуванням багатьох технологічних прийомів.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Александрова Н.М., Белкин Е.Л., Власовец В.М., Клочко О.Ю., Мартыненко А.Д. Производство и применение прокатных валков// Справочник/ Под ред. проф. Т.С. Скобло. - Харьков: Изд. ЦД №.1, 2013. - 572с.
2. Скобло Т.С., Воронцов Н.М., Рудюк С.И., Будагьянц Н.А., Воронина В.А. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов. - М.: Металлургия, 1994. - 336с.
3. Автухов А.К. Обобщение разработок по использованию и производству хромоникелевого чугуна для изготовления прокатных валков// Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ. - 2017. - Вип.183. - С.64-76.
4. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Сидашенко А.И., Сайчук А.В., Рыбалко И.Н. Особенности структурной деградации в отливках из серых чугунов, работающих в условиях нагружения// Промышленность в фокусе. – 2016. - 41, №4. - С.55-57.
5. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование локальной структурной неоднородности в сером чугуне оптико-математическим методом// Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів [Наук. журнал]. – 2017. - №8. - С.193-200.
6. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л., Сидашенко А.И. Исследование структуры высокохромистых чугунов// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. -2017. - 83, №5. - С.27-38.
7. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L. Structure of high-chromium cast iron// Steel in Translation, 2012, 42, №3. P. 261–268.  
<https://doi.org/10.3103/S0967091212030151>
8. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л., Сидашенко А.И. Новые подходы в

исследовании неоднородности гетерогенных структур [New Approaches in Study of Inhomogeneity of Heterogeneous Structures]// Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2018. – 40, №2. –С.255-280. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255>.

9. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. - М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1955. - 520с.

10. Грибов В.Г., Домрачев Г.А., Жук Б.В. и др. Осаждение пленок и покрытий разложением металлоорганических соединений - Наука, 1981. - 322 с.

11. Домрачев, Г.А., Лазарев, А.И., Каверин, Б.С. и др.: Роль углерода и металла в самоорганизации системы железо-углерод при различном содержании компонентов// Физика твердого тела. - 2004. – 46, №10. - С.1901-1915.

12. Скобло Т.С., Автухов А.К., Сідашенко О.І., Соколов Р.Г. Чавун робочого шару двошарових прокатних валків// Патент України UA №101550, опубл.25.09.2015. - Бюл.№18.

13. [Skoblo](#) T.S., [Klochko](#) O.Yu., [Sidashenko](#) A.I., [Sokolov](#) R.G. Heat treatment of two-layer alloyed-iron rollers// Steel in Translation. – 2013. – 43, №9. –P. 603-606. <https://doi.org/10.3103/S096709121309012X>

14. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Погорелов В.Я. та інші. Спосіб термічної обробки валків з високолегованого чавуну// Патент України UA №65602, опубл.12.12.2011. - Бюл.№23.

Опубліковано за темою

15. O.Yu. Klochko, M. Bilinska, O.S. Voronov. Influence of hardness on variability of structural state parameters in high-alloyed cast iron. Science and technology today (Technology series) Issue № 8(8) 2022, 89-99. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8\(8\)-89-99](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8(8)-89-99)

16. Клочко О.Ю., Воронов О.С. Новий підхід до оцінки структуроутворення високоуглецевих сплавів та його вплив на експлуатаційні властивості, Тези Міжнародної науково-технічної конференції “Матеріалознавство та технології”, Харків, ХНАДУ, 22-23 вересня 2022 р., С.6-7.

17. Клочко О.Ю., Галкін М.Г., Рубець Є.І. Дослідження залежності властивостей

легованих білих чавунів від хімічного складу. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні» (м. Одеса, НУ «Одеська політехніка», 24-25 листопада 2022р.), Одеса: НУОП, 2022, С.66-68.

18. Ключко О.Ю., Рубець Є.І., Галкін М.Г. Оцінювання напружено-деформованого стану при кристалізації масивних чавунних виливків. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (м. Харків, ДБТУ, 24-25 листопада 2022 р), Харків: ДБТУ, 2022, С. 337-338.

19. Ключко О.Ю., Новицький А.О., Куценко В.Ю. Метод дослідження якості металовиробів, заснований на вимірі коерцитивної сили. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні» (м. Одеса, НУ «Одеська політехніка», 24-25 листопада 2022р.), Одеса: НУОП, 2022, С.68-70

20. Ключко О.Ю., Воронов О.С., Новицький А.О., Куценко В.Ю. Вплив хімічного складу на структуру та властивості високохромистого сплаву. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (м. Харків, ДБТУ, 24-25 листопада 2022 р), Харків: ДБТУ, 2022, С. 337-338.

21. Воронов О.С. Застосування та умови експлуатації виробів з високохромистих чавунів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні» (м. Одеса, НУ «Одеська політехніка», 24-25 листопада 2022р.), Одеса: НУОП, 2022, С.31-32

22. S.P. Romaniuk, M.S. Bilinska, A.V. Taran, O.Yu. Klochko, K. Nowakowska-Langier, A.K. Marchenko, E.S. Deryabkina, G.P. Nikolaychuk. Non-Destructive Control of PVD Coating Surface Defects. Problems of Atomic Science and Technology. 2022. №6(142). Series: Plasma Physics (27), p. 139-142. <https://doi.org/10.46813/2022-142-139>

23. Skoblo, T., Klochko, O., Trishevskij, O., Belkin, E., Deryabkina, E. (2023). Modeling of Degradation Processes of Cast Iron Carbide Phase of Mill Rolls at Operation. In:



Advances in Mechanical and Power Engineering . CAMPE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., p. 771–778. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_13)

24. Klochko O. Y., Voronov O. S. STUDY OF STRUCTURE FORMATION OF HIGH CHROMIUM ALLOYS WITH COMPUTER ANALYSIS //Publishing House “Baltija Publishing”. – 2023. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-277-7-104>

25. Воронов О.С., Клочко О.Ю. Метод дослідження структури металу рейок загартованих СВЧ. Матеріали Міжнародної мультидисциплінарної науково-практичної інтернет-конференції молодих дослідників, здобувачів вищої освіти та науковців 6-7 квітня 2023р. м. Київ, вид-во: Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, 2023, С.296-300.

26. Клочко О.Ю., Воронов О.С. Вплив вольфраму на структуру і властивості високохромистого комплекснолегованого чавуна. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті", ДБТУ, Харків, 06-07. 04. 2023, С.94

27. Клочко О.Ю., Артеменко А.Г. Нові технології нанесення зносостійких покриттів на деталі паливної апаратури автомобільних двигунів. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті", ДБТУ, Харків, 06-07.04.2023, С.95

28. Клочко О.Ю., Гринько О.А., Богун С.Ю. Технологія термічної обробки різальних елементів системи подрібнення кормозбирального комбайна. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті", ДБТУ, Харків, 06-07.04.2023, С.98

29. Клочко О.Ю., Шнель В.А., Абрамов Д.Д. Підвищення зносостійкості поршневіх пар. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті", ДБТУ, Харків, 06-07.04.2023, С.109.

## **2.2. Розробка методики силового розрахунку універсальних клітей профіле- згинального стану**

Виконавець: проф., д.т.н., проф. Тришевський О.І.

### **ВСТУП**

У конструкціях різних видів сільськогосподарської техніки широке застосування знаходять гнуті економічні профілі різної конфігурації. Їх застосування у сільгоспмашинах забезпечує значну економію металу та у зв'язку з цим зниження ваги машин та механізмів. Одночасно зі зниженням маси машин зменшується потрібна потужність їх приводних двигунів, знижується тиск машин на ґрунт.

Гнуті профілі поставляються на машинобудівні підприємства, що виготовляють сільгосптехніку, з металургійних комбінатів, де виготовляються на сучасних високопродуктивних профілезгинальних агрегатах. В останні роки у зв'язку з економічною ситуацією, що склалася в Україні, нова сільгосптехніка виготовляється в обмеженій кількості, у зв'язку з чим виробництво гнутих профілів малотоннаж- ними партіями на високопродуктивних агрегатах металургійних підприємств стає економічно нерентабельним.

#### **2.2.1. Постановка завдання досліджень**

В даний час основними постачальниками гнутих профілів для потреб сільського господарства є невеликі приватні компанії, що виготовляють необхідні профілі на профілезгинальних станах власної спрощеної конструкції. Причому, у зв'язку з відсутністю в технічній літературі відповідних рекомендацій щодо силового розрахунку та проектування обладнання профілезгинальних агрегатів, а також відсутністю власного досвіду з розрахунків, проектування та виготовлення таких машин, найчастіше експлуатовані профілезгинальні стани мають суттєві конструктивні недоліки, що обмежують можливості цього обладнання, щодо випуску якісних гнутих профілів. У зв'язку з викладеним особливу актуальність для інженерів-конструкторів, що займаються питаннями розрахунків, проектування та виготовлення нових профілезгинальних станів, набувають дослідження, спрямовані на отримання надійних методик розрахунку силових параметрів найбільш навантаженого при експлуатації обладнання

таких агрегатів, до якого в тому числі належать і універсальні клітини профілезгинальних станів.

*Метою досліджень* є визначення зусиль, і крутних моментів, що діють на елементи конструкції універсальної робочої кліті профілезгинального стану, для загального випадку формоутворення сортового несиметричного профілю швелерного типу.

*Об'єктом виконаних досліджень* являється розробка еквівалентної розрахункової схеми дії цих зусиль для силового розрахунку кліті стану при проектуванні нового обладнання.

*Предмет досліджень* - методика розрахунку конструкцій універсальних клітей профілезгинальних станів, призначених для виробництва малотоннажних партій гнутих профілів для сільгоспмашинобудування; зусилля та крутні моменти, що діють на елементи конструкції універсальної робочої кліті профілезгинального стану для загального випадку формоутворення сортового несиметричного профілю швелерного типу.

#### 2.2.2. Аналіз останніх досліджень та літератури

Незважаючи на досить значну кількість публікацій, що стосуються різних аспектів конструкції та експлуатації профілезгинального обладнання, робіт, присвячених аналізу сил і моментів, що виникають у процесі формування, та їх впливу власне на елементи конструкції клітей профілезгинального стану а, тим більше, спроб їх аналітичного визначення та розрахунку у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі практично не виявлено.

Наприклад, у роботі [1] викладаються загальні принципи роботи обладнання профілезгинального стану, проте питання розрахунків окремих елементів його обладнання не розглядаються.

У частині роботи [2], що стосується обладнання для виробництва гнутих профілів, зазначається, що через високу вартість станів, великі витрати на інструмент і значні втрати часу на перевалку, виготовлення профілів малими партіями за традиційною технологією з використанням великогабаритних багатоклітинних станів утруднено.

І тому актуальності набувають питання, пов'язані з розробкою технології та проектування профілезгинального обладнання виходячи з найменших витрат на виробництво.

Розроблено методику розрахунку параметрів профілезгинального стану, яка дозволяє: оптимізувати кількість робочих клітей та діаметр валків з метою зниження маси обладнання, визначити максимально допустимий кут підгинання в першій та кожній наступній клітці стану, розрахувати зусилля та роботу деформування, витрачені на отримання профілю. Проте питання силового розрахунку клітей стану в роботі не розглядаються

У роботі [3] обговорюються питання розробки математичних моделей, які необхідні для проектування нових дротяних станів та прокатно-волочильних агрегатів. Для інтенсифікації процесу прокатки використовують багатовалкові калібри (рис. 2.4).

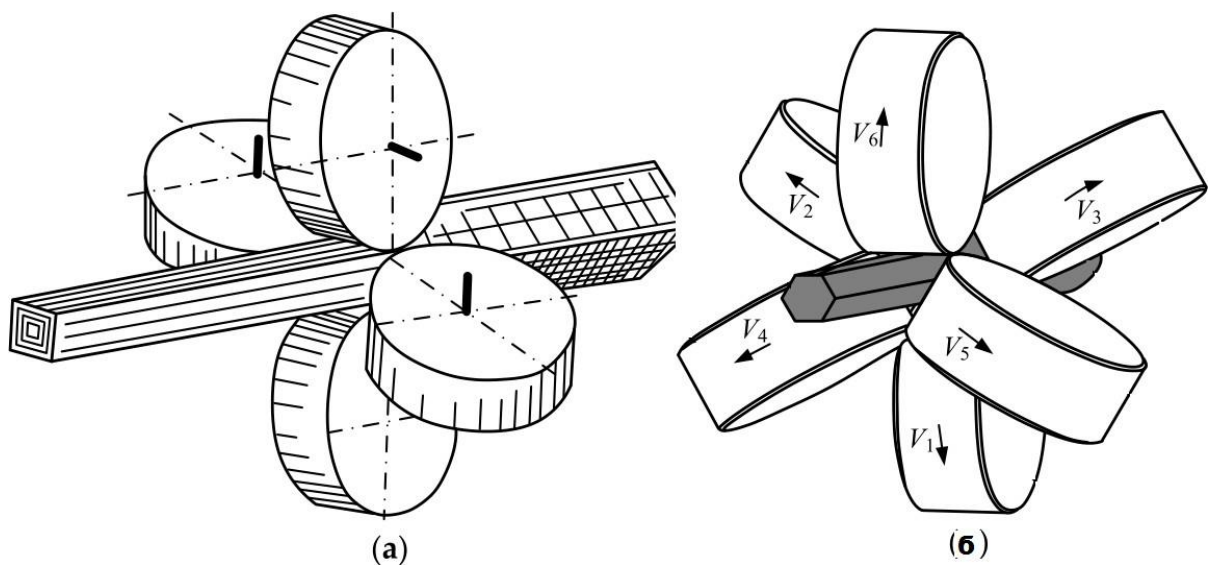


Рис.2.4 - Схема прокатки заготовки а) квадратної форми: у чотирьохвалковому калібрі; б) шестигранної форми – у клітці з шестивалковим калібром.

У роботі наведено рівняння для визначення середнього питомого тиску прокатки металу, виходячи з умови рівноваги сил, що діють на елементарний об'єм в осередку деформації, отримане у припущенні, що зміцнення вздовж осередку деформації передбачається лінійним. Однак, суттєві відмінності в умовах протікання процесів гарячої прокатки дрібних сортових профілів та дроту та профілювання в універсальних клітках, схемах докладання та дії зусиль та крутних

моментів у клітках не дозволяє використовувати наведені залежності для силового розрахунку клітей профілезгинального стану.

У розділі роботи [4], який стосується обладнання, що використовується при виробництві гнутих профілів, описуються конструкції клітей профілезгинальних станів різного типу: звичайних двовалкових зі станинами відкритого типу, консольних, способи кріплення та налаштування в них комплектів формуючих валків. Однак, сили, що діють у кліті в процесі формоутворення, схеми їх докладання та силові розрахунки конструкції кліті в роботі не розглядаються.

У роботі [5] наведено конструкцію кліті та розглядаються питання нанесення спеціального рельєфу на окремі ділянки гнутих профілів, визначається потрібне зусилля для формування цих рифлень. Однак схема дії цього зусилля на елементи кліті не наводиться, сам процес формоутворення рифлень за рахунок місцевої витяжки металу у валках принципово відрізняється від процесів отримання гнутих профілів шляхом пластичного вигину в ряді клітей стану, а сам отриманий вираз для визначення зусилля формування швидше може бути використаний для визначення технічної можливості отримання профілів з рифленнями в клітках стану з відомими технічними характеристиками, ніж для силових розрахунків клітей устаткування, що лише проектується.

В цілому слід зазначити, що в абсолютній більшості статей, що стосуються технології та обладнання для виробництва гнутих профілів, питання силового розрахунку клітей профілезгинальних станів не розглядаються, а результати досліджень енергосилових параметрів, що наводяться, в основному стосуються формування конкретних профілів певного типу, а їх результати можуть бути використані лише для визначення технічної можливості формування того чи іншого типу профілів на наявному обладнанні.

### 2.2.3. Матеріали досліджень

Незважаючи на переваги конструкції найбільш поширеної двовалкової робочої кліті зі станинами відкритого типу, вона не повністю задовольняє сучасним вимогам, пов'язаним із зростанням швидкостей профілювання, збільшенням висоти формування, ускладненням сортаменту, підвищенням вимог,

що пред'являються до якості та точності розмірів гнутих профілів. Найбільш доцільним шляхом задоволення цих вимог є застосування універсальних робочих клітей. Відмінністю універсальної кліті від двовалкової є наявність двох касет з вертикальними неприводними валками, осі яких розташовані в одній вертикальній площині з осями горизонтальних приводних валків.

#### 2.2.4. Результати та обговорення

Вертикальні неприводні валки в універсальній кліті забезпечують значне зниження енергосилових параметрів профілювання внаслідок зменшення тертя у калібрах валків та запобігання порушення поверхні металу профілів. Застосування вертикальних валків підвищує стійкість робочих валків, забезпечує стабільність швидкості руху профілю у валках, що значно полегшує синхронізацію роботи обладнання профілезгинальних агрегатів.

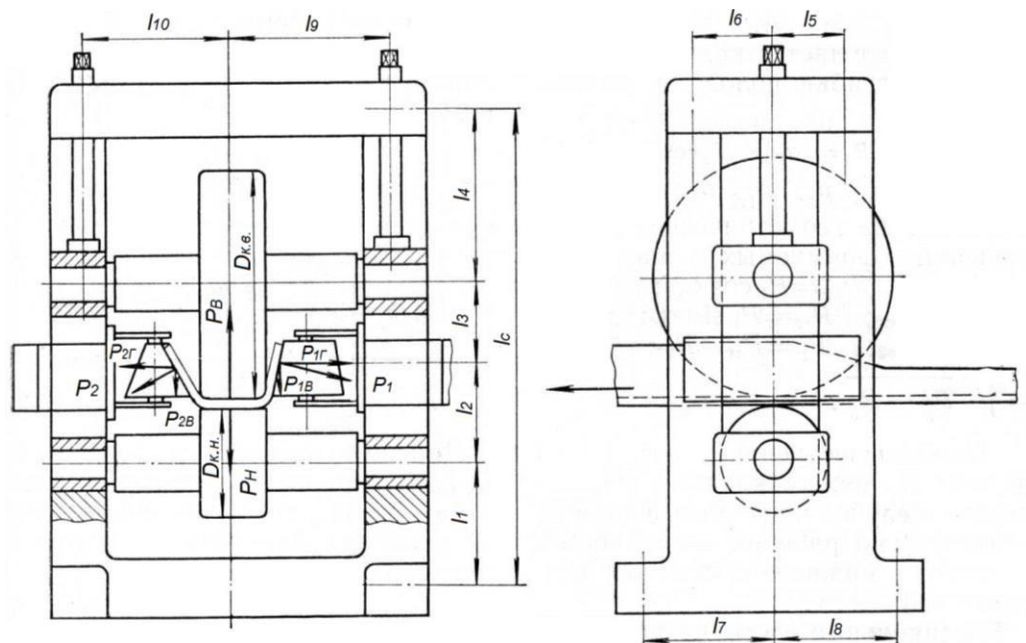


Рис.2.4 - Схема дії зусиль на елементи конструкції універсальної кліті при профілюванні несиметричного швелера

Зниження втрат потужності на тертя при формуванні профілів в універсальних клітях з вертикальними валками досягається за рахунок вирівнювання швидкостей профільних елементів валка і полоси, що формується.

Однак вертикальні валки в перших робочих клітках стану ускладнюють формування профілів з відносно великими по ширині елементами, що підгинаються, і при невеликому сумарному куті підгинання.

Розподіл зусиль, що діють при профілюванні в універсальній клітці з вертикальними валками, визначається, головним чином, характером розподілу тисків профільованої заготовки на поверхню валків. Вони залежать від типу профілю та його геометричних розмірів.

На рис. 2.4 показано схему сил, що виникають в осередку деформації при профілюванні несиметричного профілю швелерного типу, які впливають на елементи конструкції універсальної клітці.

Зусилля  $P_h$ , що діє на нижній валок від стінки швелера, що формується.

$$\begin{aligned}
 P_h &= \int_{c_1}^{h-c_2} P h b dx + \int_{c_2}^{h-c_1} \left( \frac{4x}{h^2} \left( \sigma_T s^2 + 3,52 * 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{2,6} \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \times h^{-2,6} x \right) dx + \int_{c_2}^{h-c_1} \left( \frac{\sigma_T s^2}{4x} + 3,52 * 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{2,6} h^{-2,6} x \right) dx = \quad (2.4) \\
 &= A \ln \left( \frac{h-c_1}{c_2} * \frac{h-c_2}{c_1} \right) + B \left[ \frac{\alpha^{1,4}}{h^{2,6}} * \frac{(h-c_1)^2 - c_2^2}{2} + \frac{\alpha^{1,4}}{h^{2,6}} * \frac{(h-c_2)^2 - c_1^2}{2} \right]
 \end{aligned}$$

де  $c_1$  — відстань від вершини кута підгинання до початку контакту полоси з поверхнею валка по одній полиці,  $c_2 = s \left( \frac{135}{\alpha_{c_1}} + \frac{1}{2} \right) \operatorname{tg} \frac{\alpha_{c_2}}{2}$ ;  $c_2$  — відстань від вершини кута

підгинання до точки початку контакту полоси з поверхнею валка по іншій полиці  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ - кути підгинання полиць за прохід, град;  $A = \frac{\sigma_T s^2}{4}$ ;  $B = 3,52 * 10^{-4} E s^{2,6}$ ,  $\alpha_{c_1}$  і  $\alpha_{c_2}$  сумарні кути підгинання відповідних полиць швелера за прохід.

Зусилля  $P_1$  і  $P_2$ , що діють на робочі поверхні вертикальних неприводних валків від розподіленого тиску полиць швелера, що формуються, визначаються за формулами:

$$P = \int_{c_1}^{b_1} P dx = \int_{c_1}^{b_1} \left( \frac{\sigma_T s^2}{4x} + 3,52 * 10^{-4} E \alpha^{1,4} s^{2,6} h^{-2,6} x \right) dx =$$

$$= A \ln \frac{b}{c_1} + B \alpha_1^{1,4} b_1^{-2,6} \left( \frac{b^2 - c^2}{2} \right); \quad (2.5)$$

$$P_2 = \int_{c_2}^{b_2} P_x dx = \int_{c_2}^{b_2} \left( \frac{\sigma s^2}{4x} + 3,52 * 10^{-4} E \alpha_2^{1,4} s^{2,6} h^{-2,6} \right) dx =$$

$$= A \ln \frac{b}{c_2} + B \alpha_2^{1,4} b_2^{-2,6} \left( \frac{b^2 - l^2}{2} \right). \quad (2.6)$$

Зусилля  $P_B$ , що діє на верхній валок, визначається як сума зусиль від підгинання полиць та стінки швелера

$$P_B = P_H + P_1 \cos \alpha_{c1} + P_2 \cos \alpha_{c2}. \quad (2.7)$$

Зусилля  $P_{1B}$ ,  $P_{2B}$ ,  $P_{1\Gamma}$ ,  $P_{2\Gamma}$ ,  $P_p$ ,  $P_c$  визначають з геометричних співвідношень елементів профілю, що формується:

$$P_{1B} = P_1 \cos \alpha_{c1}; \quad P_{2B} = P_2 \cos \alpha_{c2}; \quad P_{1\Gamma} = P_1 \sin \alpha_{c1};$$

$$P_{2\Gamma} = P_2 \sin \alpha_{c2}; \quad P_p = P_{1\Gamma} - P_{2\Gamma}; \quad P_c = \sqrt{P_p^2 + P_B}.$$

Найбільше зусилля натягу полоси  $P_T$  між клітями спостерігається у разі про-  
слизання її щодо робочих поверхонь верхнього та нижнього приводних валків.

Вертикальні складові зусиль від підгинання полиць ( $P_{1B}$  і  $P_{2B}$ ) створюють кру-  
тні моменти на стійках станин.

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= P_{1B} l_{1B}, \\ M_2 &= P_{2B} l_{2B}, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

де  $l_{1B}$  і  $l_{2B}$  — плечі докладання зусиль  $P_{1B}$  і  $P_{2B}$ .

Величини  $l_{1B}$  і  $l_{2B}$  визначають виходячи із заданих конструктивно лінійних ро-  
змірів  $l_9$  і  $l_{10}$  за формулами:

$$\left. \begin{aligned} l_{1B} &= l_9 - \frac{h_1}{2} - x_{01} \sin \alpha_{c1}, \\ l_{2B} &= l_{10} - \frac{h_1}{2} - x_{02} \sin \alpha_{c2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

де  $h$  — ширина горизонтального елемента профіля;  $x_{01}$  і  $x_{02}$  — відстані від вершин  
кутів підгинання відповідних полиць до точок докладання рівнодіючих  $P_1$  і  $P_2$ :



$$\begin{aligned}
 x_{01} &= \frac{A(b_1 - c_1) + \frac{b \alpha^{1,4}}{3 b_1^{2,6}} (b_1^3 - c_1^3)}{P b_1}; \\
 x_{02} &= \frac{A(b_2 - c_2) + \frac{B \alpha^{1,4}}{3 b_2^{2,6}} (b_2^3 - c_2^3)}{P b_2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Лінійні розміри  $l_1, l_c, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9, l_{10}$  визначають конструктивно, а розміри  $l_2, l_3, l_4$  — в залежності від розмірів профілю за формулами:

$$\begin{aligned}
 l_2 &= \frac{D_{к.н.}}{2} + s + x_{01} \cos \alpha_{c1}; \\
 l_3 &= \frac{D_{к.н.} + D_{к.в.}}{2} + s - l_2; \\
 l_4 &= l_2 - (l_1 + l_2 + l_3),
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

де  $s$  — товщина полоси, що формується;  $D_{к.н.}$  і  $D_{к.в.}$  — катаючі діаметри нижнього та верхнього валків. Після визначення величин активних сил, що діють на систему, і точок їх прикладання визначаємо реакції зв'язків.

На рис. 2.5 наведено еквівалентну розрахункову схему правої станини (див. рис. 2.4) універсальної кліті з позначенням діючих на неї зусиль.

Реакції  $R_1$  і  $R_2$  знаходять із системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
 \frac{R_2}{2} l_c + \frac{P_p}{2} (l_1 + l_2 + l_3) - \frac{P_{1Г}}{2} (l_1 + l_2) - \frac{P_p}{2} l_1 + \frac{M_1}{2} &= 0; \\
 \frac{R_2}{2} + \frac{P_p}{2} - \frac{P_{1Г}}{2} + \frac{R_1}{2} &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

рішення якої дає:

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \left[ R_{1Г} (l_1 + l_2) + P_p (l_2 + l_3) - M_1 \right] / l_c; \\
 R_1 &= P_{1Г} - R_2.
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Реакції  $R_3$  і  $R_4$  знаходимо із системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
 R_3 (l_7 + l_8) - \frac{P_{Т.В.}}{2} (l_1 + l_2 + l_3) - \frac{P_{Т.Н.}}{2} l_1 + G l_8 &= 0, \\
 R_3 + G - R_4 &= 0, \quad \text{або}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

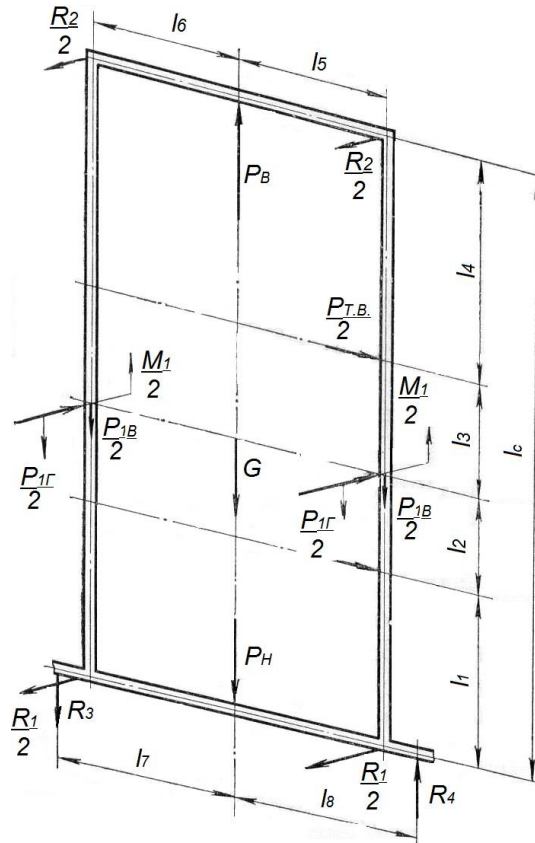


Рис.2.5 - Еквівалентна розрахункова схема зусиль, що діють на праву станину універсальної кліті

$$R_3 = \frac{\frac{P_{Т.В.}}{2} (l_1 + l_2 + l_3) + \frac{P_{Т.Н.}}{2} l_1 - G l_8}{l_7 + l_8}, \quad (2.15)$$

$$R_4 = R_3 + G$$

Станина робочої універсальної кліті має складну схему навантаження і при її розрахунку облік всіх чинників дуже скрутний. Однак при інженерних розрахунках деякими величинами можна знехтувати, приймаючи такі припущення:

1) при профілюванні з вертикальними неприводними валками вертикальні зусилля  $P_{1В}$  і  $P_{2В}$  незначні порівняно із загальними вертикальними зусиллями  $P_В$  і  $P_Н$ , тому момент  $M_1$  не має істотного впливу і можна прийняти  $M_1 = 0$ ;

2) зусилля натягу полоси при профілюванні в універсальних клітях на кілька порядків менше сумарного зусилля, створюваного тиском металу на валки, тому можна прийняти  $P_T = 0$ .

## ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу схеми дії зусиль на елементи конструкції універсальної кліті профілезгинального стану для загального випадку формування несиметричного швелера визначені вирази для розрахунку сумарних зусиль від підгинання полиць і стінки швелера, а також крутних моментів, що діють на робочі поверхні вертикальних неприводних валків.

2. На підставі виконаних досліджень розроблено еквівалентну розрахункову схему зусиль, що діють на станину універсальної кліті, та реакцій відповідних опор, яка може бути використана для силових розрахунків універсальних клітей ново проєктованого профілезгинального обладнання

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Клімьонов М. В. Чухліб В. Л. Розгляд конструкції профілезгинального стану. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Машини та технології обробки матеріалів тиском./ Національний університет «Запорізька політехніка», 2020.65 с.

2. Тепин Н.В. Совершенствование оборудования и технологии для производства гнутых профилей: дис. канд. техн. наук, 2006. 150 с.

3. Marina N. Samodurova, Olga I. Karandaeva , Vadim R. Khramshin and Ivan V. Liubimov. Calculating Power Parameters of Rolling Mill Based on Model of Deformation Zone with Four-Roll Passes. Machines 2020, 8(4), 73; <https://doi.org/10.3390/machines8040073>.

4. Roll Forming Handbook / edited by G.T Halmos. 2006 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press. 583 p.

5. Тришевський О.І., Воробьов Д.С. Визначення тиску металу на валки при накатці рельєфу на елементах гнутих профілів. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»./ 2019 р. №15 Харків. С. 9-11.

За темою досліджень:

6. Тришевський О. Матеріали 6-й Міжнародної науково-практичної конференції “Science and innovation of modern world” (February 23-25, 2023) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2023. 827 p ISBN 978-92-9472-194-5

7. Тришевський О., Москвіна В., Брик І. Особливості розрахунку клітей профіле-згинального стану // Science and innovation of modern world. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2023. Pp. 299-310. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-innovation-of-modern-world-23-25-02-2023-london-velikobritaniya-arhiv/>.

### 2.3. Теплофізичні властивості об'ємних високопористих полімерних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ)

Виконавець: доц., к.т.н., доц. Калюжний О.Б.

#### ВСТУП

Пористі полімери мають різноманітне застосування: фільтрація і сепарація, оптичні волокна, біомедичні імплантати, тканинна інженерія, каталітичні підложки, тепло- і звукоізоляція, іонні теплообмінники, паливні елементи, капілярні насоси, аератори, сорбенти, заглушники, взуття, одяг і т. д. [1-4]. Серед них все більший інтерес набувають пористі політетрафторетилену (ПТФЕ) через їхні унікальні фізико-хімічні властивості [5-8]:

- надзвичайна хімічна стійкість до всіх мінеральних і органічних кислот, лугів, органічних розчинників, окислювачів, газів та інших агресивних середовищ;
- біологічна і фізіологічна інертність;
- можливість працювати в широкому діапазоні температур від  $-269^{\circ}\text{C}$  до  $+260^{\circ}\text{C}$ ;
- низький коефіцієнт тертя;
- гідрофобність;
- високі діелектричні показники;
- добре піддається механічній обробці.

Різнманітні застосування пористих полімерів вимагають специфічних порових структур [9], кожна з яких може бути отримана певним методом. Наразі існує велика кількість методів формування пористих полімерів, заснованих на хімічних, фізичних і хіміко-фізичних процесах [5, 10-14].

При отриманні пористих полімерів у широкому діапазоні значень пористості використовують різні пороутворювачі, які додаються до полімеру з подальшим випаровуванням, вижиганням або розчиненням [15-18]. При формуванні контрольованих порових структур об'ємних пористих ПТФЕ з відкритою пористістю в якості пороутворювачів можна використовувати розчинні або частково газифіковані неорганічні сполуки [19-21].

Полімерні фільтруючі елементи, виготовлені на основі високопористого ПТФЕ, завдяки своїм фізико-механічним характеристикам успішно використовуються для фільтрації рідин та газів, термодинамічні параметри яких можуть суттєво відрізнятися від нормальних. Зокрема, рекомендований діапазон температур для експлуатації фільтрів з полімерними фільтруючими елементами знаходиться в межах від  $-269$  до  $260^{\circ}\text{C}$ . Ураховуючи, що монтаж фільтроелементів в корпусі фільтра виконується за нормальних температурних умов, зміна температури фільтроелемента під час експлуатації фільтра може сягати значної величини. При такій зміні температури можуть суттєво змінитися лінійні розміри фільтроелемента. Зокрема, при фільтруванні кріогенних рідин розміри фільтроелемента можуть змінитися настільки суттєво, що може статися порушення герметичності з'єднання фільтроелемента в місці ущільнення його в корпусі фільтра. У зв'язку з цим вивчення зміни лінійних розмірів полімерних фільтруючих елементів зі зміною температури та визначення коефіцієнта лінійного температурного розширення (КЛТР) високопористого фторопласта є дуже *актуальною* задачею.

### 2.3.1. Матеріали і методи дослідження

Основою пористого полімерного матеріалу був комерційний порошкоподібний ПТФЕ марки Ф-4ПН (розмір частинок  $80-120$  мкм, щільність  $2,19 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). В якості пороутворювача використовувався хлорид натрію (NaCl) марки "Екстра", Україна, м. Слов'янськ. Щільність NaCl становить  $2,17 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, що близько до щільності ПТФЕ, що дозволяє отримати якісне змішання компонентів [22].

Змішані різним ваговим співвідношенням ПТФЕ і NaCl (65, 70, 75 мас.% NaCl) готувались в міксері Braun FX 3030 в інтервалі температур змішування  $15-180^{\circ}\text{C}$ . При  $190^{\circ}\text{C}$  у ПТФЕ відбувається фазовий перехід першого роду, при якому кристалічна структура змінюється від триклінної до гексагональної елементарної комірки [23]. В результаті при температурі нижче  $190^{\circ}\text{C}$  частки ПТФЕ стають жорсткими, що дозволяє здійснити якісне змішання компонентів. Маса змішуваних компонентів складала  $100$  г, частота обертання лез  $600$  об/хв, час змішування  $300$  с. При таких параметрах змішування відсутнє диспергування компонентів суміші. З приготованої суміші шляхом пресування в прес-формі отримано напівфабрикати

у вигляді дисків діаметром  $D=40\pm 0,1$  мм і товщиною  $h=12\pm 0,1$  мм. Тиск пресування складав  $155\pm 5$  МПа з витримкою при цьому тиску протягом 30 с. Витримка необхідна для рівномірного розподілу тиску по всьому внутрішньому об'єму прес-форми, внаслідок чого суміш якісніше ущільнюється. Під час пресування підготовленої суміші частки її компонентів деформуються як упруго, так і пластично.

Пресування здійснювалося в інтервалі температур від 22 до  $250^{\circ}\text{C}$ . При таких температурах частки ПТФЕ виявляють високу пластичність [23]. Пластичне деформування ПТФЕ усуває внутрішні порожнисті між частками суміші, що запобігає трісненню напівфабрикатів під час наступної термообробки [24].

Спекание ПТФЕ піддається обробці в температурному інтервалі від 365 до  $380^{\circ}\text{C}$ , тобто між температурою початку плавлення кристалічної фази ( $327^{\circ}\text{C}$ ) та деструкцією ( $415^{\circ}\text{C}$ ) [25]. Проте напівфабрикати, що складаються з ПТФЕ та пороутворбвача NaCl, залишаються непідсмаженими в цьому діапазоні температур. Для цих напівфабрикатів розроблено режим термообробки, який включає нагрів за допомогою печі до температури  $t=385\pm 2,5^{\circ}\text{C}$  (середня швидкість нагріву  $\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ ) утримання при даній температурі (час утримання визначається товщиною напівфабриката і становить 5 хв на 1 мм товщини) та охолодження за допомогою печі. Цей режим термообробки забезпечує якісне спікання напівфабрикатів. Під час лушення пороутворювач повністю видаляється з напівфабрикатів проточною водою при температурі  $70-90^{\circ}\text{C}$  протягом 15 годин. Завершальним етапом підготовки пористого ПТФЕ є їхня сушка в сушильних шафах при  $100-120^{\circ}\text{C}$  протягом 12 годин. Маси компонентів суміші, напівфабрикатів і пористого ПТФЕ (m) визначалися з точністю  $\pm 0,01$  г, а розміри напівфабрикатів і пористого ПТФЕ -  $\pm 0,01$  мм. Існує ряд методів визначення пористості ( $\varphi$ ) [26]. У цій роботі  $\varphi$  матеріалів визначалася розрахунковим методом [7]:

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho_V}{\rho_{\text{птфэ}}}\right) \cdot 100, \% \quad (2.16)$$

де  $\rho_V$  – об'ємна густина напівфабрикатів після пресування та термообробки, а також пористого ПТФЕ, отриманого після витягування та висушування ( $\rho_V=4m/\pi D^2h$ ),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{птфэ}}$  – густина ПТФЕ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Максимальний діаметр міжпорових каналів ( $d_{max}$ ) визначався методом бульбашковим [27] і обчислювався за формулою:

$$d_{max} = \frac{4\sigma \cos\theta}{\Delta P} \cdot 10^6, \text{ мкм} \quad (2.17)$$

де  $\sigma$  – поверхнєве натягування проникаючої рідини, Н/м;  $\theta$  – кут змочування на межі, град.;  $\Delta P$  – перепад тиску повітря на пористому ПТФЕ, при якому з пор виштовхується рідина і з'являється перша бульбашка, Па. В якості проникаючої рідини використовувався бензин марки Б-70 ( $\sigma=20,7 \cdot 10^{-3}$  Н/м,  $\cos\theta = 0,92$ ). Перепад тиску визначався U-подібним манометром з точністю  $\pm 5$  Па.

### 2.3.2. Результати дослідження

Вимірювання коефіцієнта лінійного температурного розширення (КЛТР) високопористого ПТФЕ проводилося на кварцовому диференційному дилатометрі з індукційним датчиком переміщення типу ПД-3 (рис. 2.6). Індукційний датчик переміщення є перетворювачем типу диференційно-трансформаторного, на двох котушках якого намотані обмотки збудження (1) і вторинна обмотка (2). Обмотка збудження складається з двох секцій W1 і W2\*, які підключаються до джерела змінного стабілізованого струму частотою 50 Гц. Магнітний потік, що виникає при проходженні струму через обмотки збудження, створює взаємну індуктивність во вторинних обмотках W1 і W2\*, величина якої залежить від положення поршня-серцевини (3). Взаємоіндуктивності M1 і M2\* обмоток W1 і W2\* рівні одна одній при симетричному положенні поршня відносно котушок (магнітна нейтраль).

При зсуванні поршня відносно магнітної нейтралі на кінцях вторинних обмоток виникає потенціал, пропорційний величині зсуву. Калібрування перетворювача ПД-3 виконувалося за допомогою мікрометричного гвинта та індикатора переміщення з точністю вимірювання 1 мкм. Власний хід дилатометра в інтервалі температур від -160 до +100 °С становив менше 1 % від вимірюваної величини абсолютного подовження зразка. Таким чином, точність вимірювання переміщення толкача дилатометра 4 та жорстко пов'язаного з ним поршня індукційного датчика складала - 1 мкм, що повністю відповідає вимогам ГОСТ 15173-70 [2].

Зразок високопористого ПТФЕ розміщувався між толкачем дилатометра та



опорним столиком, а потім охолоджувався за допомогою рідкого азоту до температури мінус 190 °С.

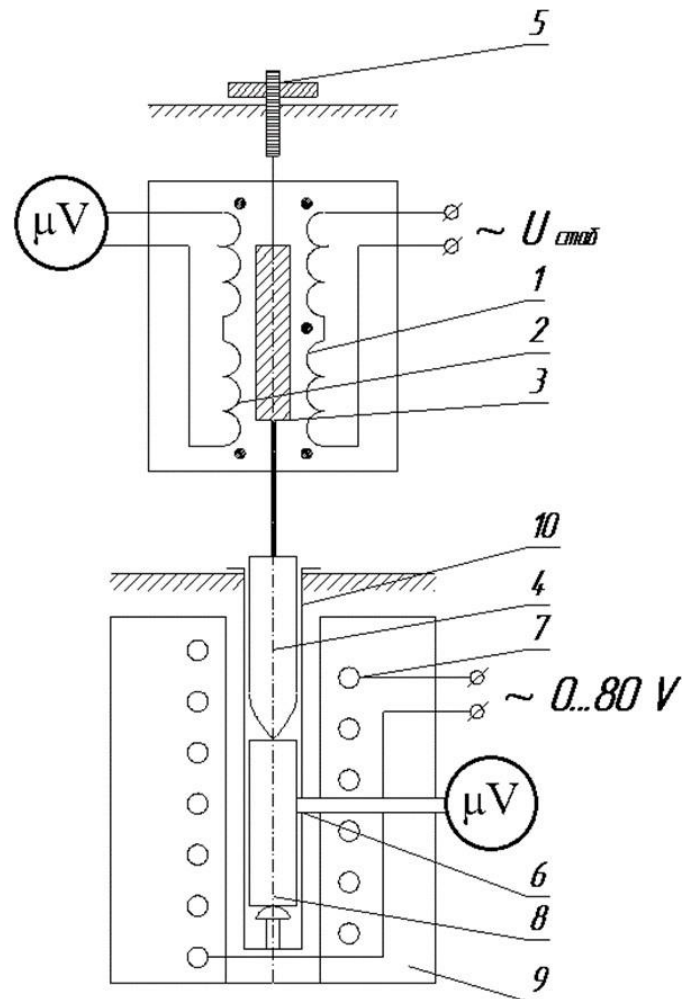


Рисунок 2.6 - Схема кварцового дилатометра з індукційним датчиком

Температуру вимірювалося в середній частині зразка мідь-константовою термопарою 8. Потім здійснювалося нагрівання зразка і, після збільшення температури зразка кожні 10 °С, вимірювалося його абсолютне подовження. Рівномірність нагрівання забезпечувалась адіабатичною оболонкою корпусу дилатометра та автоматичною системою, виконаною на основі блока живлення приладу ІТ-с-400. Похибка вимірювань у всьому інтервалі температур не перевищувала 10 %. Під час попередніх вимірювань було відзначено, що при додатніх температурах навантаження на зразок у вигляді толкача дилатометра та поршня індукційного датчика (~ 8 г) значно зменшує КЛТР, що пов'язано з плинністю зразка під даною навантажен-

ням. У зв'язку з цим була запропонована оригінальна система розгрузки, яка дозволила зменшити навантаження на зразок до 0,5 г.

Для вимірювання КЛТР високопористого ПТФЕ використовувалися зразки у формі циліндрів висотою 50 мм та діаметром 10 мм, виготовлені за допомогою програм графічного комп'ютерного моделювання, за трьома технологічними регламентами (I, II, III), структурні характеристики яких наведено в табл. 2.3. Методика визначення основних структурних характеристик наведено в [3].

Таблиця 2.3 - Основні структурні та фільтраційні параметри зразків фільтруючих матеріалів на основі ПТФЕ

Показник	Номер технологічного регламенту		
	I	II	III
Об'ємна пористість, %	75	70	65
Середній діаметр пор, мкм	82	43	25
Фільтраційна тонкість, мкм	20	5	1

На рис. 2.7 приведені залежності КЛТР від температури для пористих ПТФЕ изготовлених по трем регламентам.

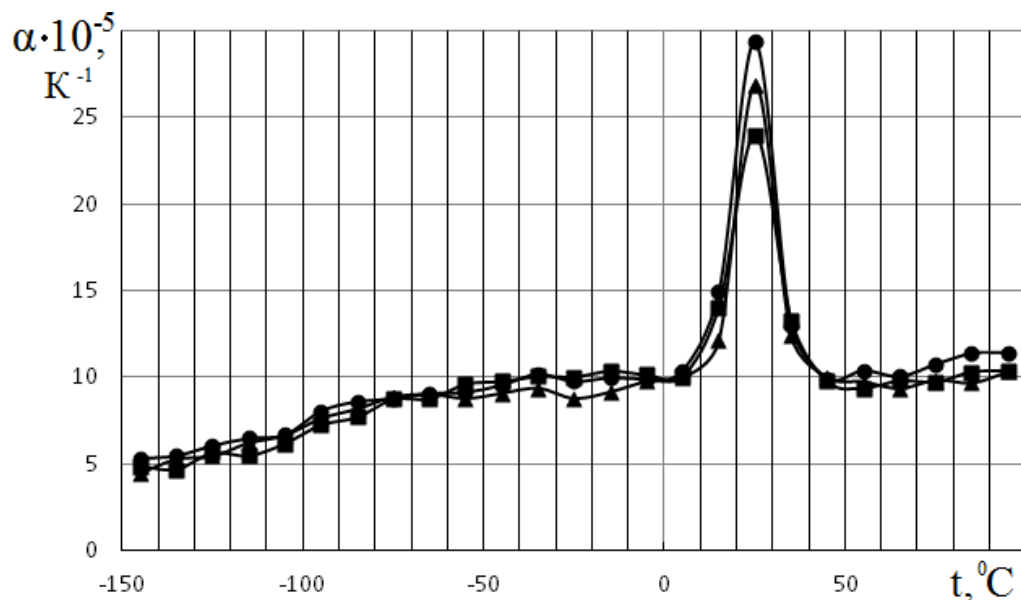


Рисунок 2.7 - Залежність КЛТР високопористих фторопластів від температури: ■ - регламент I; ▲ - регламент II; ● - регламент III

## ВИСНОВКИ

Аналізуючи отримані залежності КЛТР зразків кожного технологічного регламенту від температури, можна зробити наступні висновки:

- в інтервалі температур від мінус  $-150$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  КЛТР зразків високопористого ПТФЕ, виготовлених за різними технологічними регламентами, практично збігаються;
- в області температур фазового переходу 2-го роду ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ) спостерігається більш виразне відмінності КЛТР зразків високопористого ПТФЕ, виготовлених за різними технологічними регламентами, причому його величина зростає зі збільшенням щільності зразка, тобто зі зменшенням пористості та середнього діаметра пор зразка;
- при температурах вище  $40^{\circ}\text{C}$  значення КЛТР залишається незмінним для пористих матеріалів, виготовлених за різними технологічними регламентами.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. Azarniya, A. Azarniya, M.S. Safavi, M. Farshbaf Ahmadipour, M. Esmaeeli Seraji, S. Sovizi, M. Saqaei, R. Yamanoglu, M. Soltaninejad, H.R. Madaah Hosseini, S. Ramakrishna, A. Kawasaki, S. Adams, M.V. Reddy. *Crit. Rev. Solid. State.* **45** (1), 26 (2020), [DOI:10.1080/10408436.2018.1532393](https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1532393).
2. A.G. Slater, A.I. Cooper. *Science.* **348** (6238), aaa8075 (2015), [DOI:10.1126/science.aaa8075](https://doi.org/10.1126/science.aaa8075)
3. Z. Wei, B. Ding, H. Dou, J. Gascon, X.-J. Kong, Y. Xiong, B. Cai, R. Zhang, Y. Zhou, M. Long, J. Miao, Y. Dou, Y. Ding, J. Ma. *Chinese Chem. Lett.* **30**, 2010 (2019), [DOI:10.1016/j.ccllet.2019.11.022](https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2019.11.022).
4. J. Wu, F. Xu, S. Li, P. Ma, X. Zhang, Q. Liu, R. Fu, D. Wu. *Adv. Mater.* **31** (4), 1802922 (2019), [DOI:10.1002/adma.201802922](https://doi.org/10.1002/adma.201802922).
5. E. Babaie, S.B. Bhaduri. *ACS Biomater. Sci. Eng.* **4** (1), 1 (2018), [DOI:10.1021/acsbiomaterials.7b00615](https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.7b00615).
6. R.M.A. Roque-Malherbe. *Surface Area and Porosity Characterization of Porous Polymers*, Chapter 5, *Porous Polymers* (ed. M.S. Silverstein, N.R. Cameron, M.A.

Hillmyer). John Wiley & Sons, Inc. (2011). P. 173–203, [DOI:10.1002/9780470929445.ch5](https://doi.org/10.1002/9780470929445.ch5).

7. P.S. Liu, G.F. Chen. Porous Materials. Processing and Applications. Elsevier Inc. (2014), 576 p. [DOI:10.1016/C2012-0-03669-1](https://doi.org/10.1016/C2012-0-03669-1).
8. J. Gardiner. Aust. J. Chem. **68**(1), 13 (2015), [DOI:10.1071/ch14165](https://doi.org/10.1071/ch14165).
9. M.E. Davis. Nature. **417**, 813 (2002), [DOI:10.1038/nature00785](https://doi.org/10.1038/nature00785).
10. S. Yu, F.L. Ng, K.C.C. Ma, A.A. Mon, F.L. Ng, Y.Y. Ng. J. Appl. Polym. Sci. **127**(4), 2641 (2012), [DOI:10.1002/app.37514](https://doi.org/10.1002/app.37514).
11. M. Stucki, M. Loepfe, W. J. Stark. Adv. Eng. Mater. **20**(1), 1700611 (2018), [DOI:10.1002/adem.201700611](https://doi.org/10.1002/adem.201700611).
12. H. Janik, M. Marzec. Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl. **48**(1), 586 (2015), [DOI:10.1016/j.msec.2014.12.037](https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.037).
13. S. Feng, Z. Zhong, Y. Wang, W. Xing, E. Drioli. J. Membrane Sci. **549**, 332 (2018). [DOI:10.1016/j.memsci.2017.12.032](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.032)
14. L.I. Chernyshev, O.N. Balitskii, N.E. Fedorova, O.I. Get'man, V.M. Yur'ev. Powder Metall Met. C+. **43**, 143 (2004), [DOI:10.1023/B:PMMC.0000035702.20726.53](https://doi.org/10.1023/B:PMMC.0000035702.20726.53).
15. S. Mane, S. Ponrathnam, N. Chavan. Can. Chem. Trans. **4**(2), 210 (2016), [DOI:10.13179/canchemtrans.2016.04.02.0304](https://doi.org/10.13179/canchemtrans.2016.04.02.0304).
16. E. Chevalier, D. Chulia, C. Pouget, M. Viana. J. Pharm. Sci. **97**, 1135 (2008). [DOI:10.1002/jps.21059](https://doi.org/10.1002/jps.21059).
17. A.B. Kalyuzhny, T.L. Karpova, B.G. Kalyuzhny, V.Ya. Platkov. Funct. Mater. **6**, 25 (1999), <http://functmaterials.org.ua/contents/9-2/19.pdf>.
18. I.S. Suhaimin, S.A. Zubir, T.K. Abdullah. Int. J. Cur. Res. Eng. Sci. Tech. **1**, 19 (2018), [DOI:10.30967/ijcrset.1.S1.2018.19-27](https://doi.org/10.30967/ijcrset.1.S1.2018.19-27).
19. A.B. Kalyuzhny, T.L. Karpova, B.G. Kalyuzhny, V.Ya. Platkov. Funct. Mater. **6** (2), 25 (1999).
20. O. B. Kaliuzhnyi, V. Ya. Platkov. Iran. J. Mater. Sci. Eng. **17** (2), 13 (2020), [DOI: 10.22068/ijmse.17.1.13](https://doi.org/10.22068/ijmse.17.1.13).

21. A.V. Maksimkin, S.D. Kaloshkin, V.V. Tcherdyntsev, D.I. Chukov, A.A. Ste-pashkin, [Biomed. Eng.](#) **47**, 73 (2013), [DOI:10.1007/s10527-013-9338-5](#).
22. R. Hogg. Kona Powder Part. J. **27**, 3 (2009), [DOI:10.14356/kona.2009005](#).
23. H.-X. Wang, X. Fang, B. Feng, Z.-R. Gao, S.-Z. Wu, Y.-C. Li. *Polymers*, **10** (1), 56 (2018), [DOI:10.3390/polym10010056](#).
24. T.L. Karpova, V. Ya. Platkov, B.G. Kalyuzhny, I.F. Tisyachnik. *Physics and technology of high pressures*. **9**(1), 36 (1999). (in Russian) [Т.Л. Карпова, В.Я. Платков, Б.Г. Калюжный, И.Ф. Тысячник. *Физика и техника высоких давлений*. **9**(1), 36 (1999).]
25. J.G. Drobny. *Technology of fluoropolimers*. CRC Press Taylor & Francis Group (2009) 250 p.
26. L.M. Anovitz, D.R. Cole. *Rev. Mineral. Geochem.* **80**(1), 61 (2015), [DOI:10.2138/rmg.2015.80.04](#).

## 2.4. Підвищення властивостей та експлуатаційної стійкості покриттів при їх модифікуванні вторинною сировиною

Виконавець: ст. викл., к.т.н. Омельченко Л.В.

### ВСТУП

Для підвищення якості металу виробів використовують крім легуючих домішок і модифікуючі суміші, які складаються із різних компонентів, що зумовлюють створення відновлювальних фазових складових та змінюють умови кристалізації. Такий підхід забезпечує корегування структурою стану металу і отримання при подальших технологічних обробках необхідних властивостей виробів.

Вміст компонентів домішок для модифікування виробів підбирають при одержанні виробів різними методами, в залежності від необхідності забезпечення їх конкретних властивостей при одержанні виробів різними методами.

В останні роки особлива увага приділяється маловитратним технологіям при одержанні виробів. Одним із напрямків є використовуються для модифікування вторинної сировини це - модифікування відновлювальних покриттів шлаками доменного виробництва, золою від спаленого вугілля ТЕЦ та шихтою отриманою при утилізації боєприпасів.

Новітніми є дослідження відновлюючих покриттів модифікованих нано- та дисперсними алмазами, які отримані статистичним навантаженням, динамічним та детонаційним методами. Основним недоліком алмазів з шихтових матеріалів є їх схильність до розпаду з формуванням графіту при навіть невеликому періоді зберігання. Одержання більш стабільних алмазних фракцій досягається багаторазовою детонацією, але це зумовлює високу коштовність стосовно їх отриманню.

2.4.1. Розробка методики отримання вторинної сировини для модифікування рідкої ванни наплавленого шару

*Мета досліджень* – магнітна складовою детонаційної шихти з алмазною фракцією від утилізації певного набору боєприпасів.

*Об'єктом виконаних досліджень* – процеси нанесення покриттів при відновленні та зміцненні робочої поверхні деталей при експлуатації.

*Предмет досліджень* – підвищення експлуатаційної стійкості покриттів при їх модифікуванні вторинною сировиною.

#### 2.4.2. Матеріали і методи дослідження

В дослідженнях використовували сучасні експериментальні та теоретичні методи, методики і обладнання. Оцінювали зміну структуроутворення при модифікуванні вторинною сировиною від утилізації певного набору боєприпасів, у яких закінчився термін зберігання. Для прогнозування можливості та ефективності її використання, при відновленні деталей, вивчали якісний та кількісний склад одержаних зерен конгломерату

#### 2.4.3. Постановка завдання дослідження

В останні роки, нами, разом зі іншими спеціалістами відповідного профілю, було проведено дослідження по одержанню шихти з алмазною фракцією шляхом утилізації певного набору боєприпасів. Така шихта містить нано- та дисперсні алмази, які показали високу стабільність при відносно тривалому зберіганні. Виходячи зі складу формуючих фаз у такій шихті, на першому етапі раніш виконаних досліджень використовували лише не магнітну її фракцію. У виконаних в роботі дослідженнях в перше проводили пошук нових методів і напрямів використання магнітної частки такої шихти. Вперше запропонований напрямок досліджень важливий тому, що може забезпечити нові підходи для ефективного модифікування покриттів з різних матеріалів, які працюють при різних умовах експлуатації. Виконані дослідження сприяють розширенню використання відходів вторинної сировини, забезпечують покращення експлуатаційних властивостей відновлених деталей тому є важливими та актуальними.

#### 2.4.4. Результати досліджень

В дослідженнях використовували сучасні експериментальні та теоретичні методи. Оцінювали зміну структуроутворення під час модифікування магнітною часткою детонаційної шихти від утилізації певного набору боєприпасів, у яких закінчився термін зберігання. Для прогнозування можливості й ефективності її використання для відновлення деталей вивчали якісний і кількісний склади одержаних

зерен конгломерату. Оцінку структуроутворення проводили металографічною оптичною мікроскопією, електронною мікроскопією та теоретичним описом оптико-математичним методом. Теоретичні дослідження ґрунтувалися на виявленні фаз різними кольорами, а додатково вони уможливили оцінити і їхній взаємозв'язок. Властивості покриттів оцінювали згідно з вимірами мікротвердості та коерцитивної сили, а також іспитами на знос в умовах стендових випробувань.

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень було надано рекомендації з використання магнітної складової детонаційної шихти від утилізації боєприпасів, яка вирізняється тим, що вона містить більше тонких включень оксидів заліза ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), які покривають дисперсну алмазну фракцію. Одночасно у конгломератах зерен такої шихти є і нано- та дисперсні включення алмазів з пластичними покриттями, та вони подрібнюються в процесі багаторазової детонації. Враховуючи цю різницю, знайдено додаткові напрями використання магнітної частки шихти для модифікування зміцнювальних і відновлювальних покриттів.

Показано, що використанням такої модифікуючої домішки (за оптимальної технології використання її) забезпечується гальмування дисперсно-зміцнених включень з основного металу, що дає змогу прогнозувати властивості покриття.

Шихта, яка містить дисперсну алмазну фракцію під час внесення її в рідку ванну, є ефективною для використання у спряженнях. Це досягається тим, що така фракція під час тертя за рахунок деформації подрібнюється і її частки довше зберігаються у порожнинах, а потім поступово заміщують зношені, формуючи вторинні захисні оксидні плівки.

Розроблено новий комбінований метод модифікування. Обґрунтовано можливість використання його для модифікування рідкого розчину одноразово для відновлення покриттів і заварювання незначних дефектів. Метод полягає у тому, що дефекти, яких було створено під час експлуатації, можливо ліквідувати заваркою через нанесення шлікерного покриття (локального) на місце їхнього розташування. В залежності від розміру дефектної зони слід використовувати частку домішки від 5,0 до 12%. Після відновлення дефектів ефективним є нанесення додатково покриття з модифікуванням обмазкою електроди. Частка домішки є оптимальною у 5–



7% при нанесенні модифікуючої домішки на покриття електроду і коригується коефіцієнтом анізотропії структури.

Виконані дослідження згідно з використанням детонаційної шихти (магнітної та немагнітної фракцій) від утилізації певного набору боєприпасів пройшли стендові та промислові випробування на ДП «Завод імені В. О. Малишева»; підтверджено їхню ефективність.

В опублікованих у літературі роботах приділяється увага стосовно можливості використання і нерозчинних модифікуючих домішок, які можуть істотно впливати на рідкий розчин і властивості покриттів за рахунок зміни умов кристалізації, формування нових фаз, дислокаційної структури, схильності до дефектоутворення. Ефективність такого модифікування залежить від міри активності та ступеня їхнього зв'язку з киснем, газонасиченості оброблюваного металу. Важливим є також встановлення оптимальних домішок модифікатора та способ його введення.

Методологічно виконання роботи побудовано на основі діаграми Ісікави та відображає послідовність, напрями та зміст досліджень.

Експериментальні дослідження ґрунтувалися на методах металографічної та електронної мікроскопії, локальній спектральній і хімічній аналізі. Конгломерати зерен оцінювали теж статично спектральною та хімічною аналізами. Така шихта після розподілу її з виділенням магнітної складової включає, крім основних компонентів С, Fe, Cu, Al, ще і малу концентрацію модифікуючих і летких складових.

Зміни структурного стану описували теоретично оптико-математичною аналізом, яка уможливила виявити якісний і кількісний склади фаз, їхню зміну через модифікування, а також взаємодії між окремими складовими.

Властивості покриттів оцінювали методами мікротвердості та показниками коерцитивної сили (неруйнівним методом контролю), зміни яких відображають деградацію структурного стану під час експлуатації та рівень виникаючих напружень.

По-перше, розглядали вторинну сировину з алмазною фракцією для модифікування. Розглянуто склад такої детонаційної шихти від утилізації певного набору боєприпасів, які перевищили термін зберігання та використання. Детальний аналіз

її був необхідним, щоб визначити її використання. Оцінено її хімічний склад і можливість розподілу за властивостями. Раніше виконаними дослідженнями було оцінено ступінь впливу на структуроутворення використання такої вторинної сировини. Розглянуто склад і можливість використання магнітної частини такої шихти, а також спосіб її одержання.

Встановлено, що магнітна складова вторинної сировини від утилізації боеприпасів відрізняється тим, що в її складі є підвищена кількість оксидних включень:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , які створюють захисне покриття на алмазній фракції та не подрібнюють її за багатошарової детонації. Наявність значної доли окислів в цих сполуках, а також покриття цими компонентами алмази буде підвищувати їхню експлуатаційну стійкість упродовж всього періоду використання зміцнювальних модифікуванням покриттів за наплавлення.

Оптимальна частка такої модифікуючої домішки, яка вноситься в рідку ванну, залежить від напряму її використання. Таке модифікування за внесення домішки у 6% супроводжується додатковим внесенням з шихтою у рідку ванну компонентів [у%]: 0,7 Al, 2,56  $\text{O}_2$ , 0,46 C, 0,26 Cu, 0,45 Cl, 0,36 Ba, 0,21 Mg.

Загальний склад такої шихти наведено на рис. 2.8.

Введення шихти з алмазною фракцією, а також додатковими компонентами, сприяють модифікуванню рідкої ванни, що зменшує розмір зерен, підвищує мікротвердість. Так, при нанесення відновлювального покриття електродом ER321 на деталь з вуглецевих включень максимальна мікротвердість без модифікуючої домішки дорівнює Н-50-338, а за його модифікування підвищується до Н-50-362 та стає більш однорідним.

Оцінено вплив модифікування на напружений стан, і для цього використовували неруйнівний метод контролю за коерцитивною силою.

Аналізом одержаних результатів вимірів встановлено, що цей показник без модифікування змінюється в межах 25%; після нанесення покриття з домішкою не перевищує 4,4%. Це свідчить про відсутність істотних напружень, які можуть вносити зміни у експлуатаційні показники.

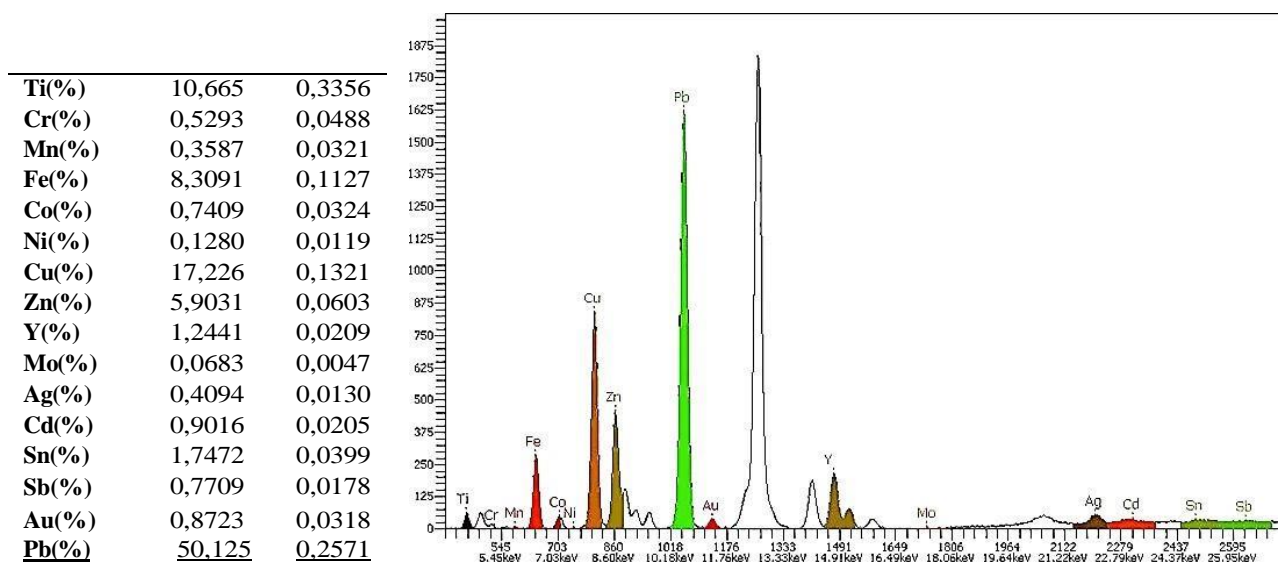


Рисунок 2.8 - Розподіл компонентів у зернах магнітної складової шихти. 1

Виконано теоретичну оцінку зерен конгломерату шихти, що використовувалася для модифікування рідкого розчину нанесенням покриттів. Дослідження проведено статистично оптико-математичним методом опису структуроутворення зерен конгломерату [2]. Показано, що алмазна фракція частіше за все знаходиться у середині зерен, а покривають їх різні типи сполук. Перші наносфери — відносно м'які сполуки з компонентами різних з'єднань, що включають модифікуючі домішки, легкі компоненти та леткі (в цьому випадку алмазна фракція подрібнюється за детонації та виявляється зі збільшенням у  $\times 10000$ ). Другі дисперсні алмази покриті оксидними включеннями, які мають достатньо високу твердість, і за циклічних вибухів детонації така алмазна фракція залишається незмінною за формою та розміром. Її форма округлена та вивчається лише після наплавленням та розчину оксидів заліза, що її покривають.

На рисунку 2.9 показано нановключення алмазів у конгломераті зерен немагнітної частки шихти.

Теоретично оптико-математичним методом описано [3–8], що її розрахунку облік всіх чинників дуже складний. За детонації з формуванням конгломератів кристалізуються різні фази та сполуки, які оцінювали згідно зі зміною кольорів. Встановлено, що в шихті частка одного кольору складає лише 11,26%, з'єднань двох —

80,9%, трьох — 6,19%, чотирьох не перевищує 1,65%, а більше — відповідає 0,81, 0,52, 0,23%. Теоретичну оцінку структуроутворення проводили з використанням Лапласових операторів за розробленими раніше підходами, заснованими на гідродинамічних аналогах із використанням рівнянь Нов'є–Стокса, які враховували дивергенцію (густину фрагменту та дифузійні процеси).

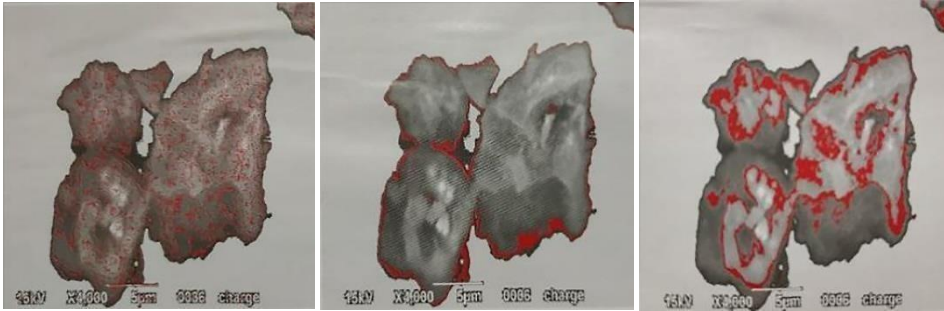


Рис. 2.9 - Розподіл подвійних груп фаз за кольором на алмазних зернах.

Це дало можливість виявити ступінь локальної неоднорідності структури покриттів на металографічних зображеннях.

Аналіз цих зображень мікроструктури для виявлення фазового складу проводили оптико-математичним методом за розрахованими значеннями у цифровому форматі bmp, шляхом сканування зображень, відповідно до розміру комірки 3x3 пікселя. Умовні кольори оцінювали в кожній точці координат такої матриці:

$$C_{x,j} = \begin{Bmatrix} C_{1-i,j-1} & C_{i-1,j} & C_{i-1,j+1} \\ C_{i,j-1} & C_{i,j} & C_{i,j+1} \\ C_{i+1,j-1} & C_{i+1,j} & C_{i+1,j+1} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

Дифузію оцінювали згідно з Ляпласіанами, які для кожної точки (пікселя) фрагменту мають вигляд:

$$L_{x,j} = c(i,j-1) + c(i,j+1) + c(i-1,j) + c(i+1,j) - 4c(i,j) \quad (2.19)$$

Матриця умовних кольорів  $C_{(x,y)}$  фрагменту зображення в кінечно-різницевому представленні. Відповідає кроку за координатами на цифровому зображенні  $\Delta x = \Delta y = 1$

Детальному дослідженню піддавали групу зерен шихти та окремих конгломератів. Одночасно ступінь неоднорідності структури оцінювали і з урахуванням густини фрагмента по дивергенції.

Оптико-математичній обробці піддавали слідуючи конгломерати зерен: загальну їх кількість та четверо окремих, в середині яких знаходилися роздробленні дисперсні алмази, розташовані в оболонці різних кисневих з'єднань.

Оцінюючи загалом, слід відзначити, що сумарна їх оцінка виявила наступне. Частка фаз одного кольору складає 11,26%, двійні з'єднання – 80,9%, трійні – 6,19% та більше 4-6 з'єднань, які сумарно не перевищують 1,65%, що відповідає 0,81; 0,52; 0,22%.

## ВИСНОВКИ

Раніше основна увага приділялася дослідженням використання немагнітної частки шихти, одержаної від утилізації певної номенклатури боєприпасів. В цих дослідженнях розглядається можливість використання магнітної частки шихти за багатошарової детонації для підвищення якості й експлуатаційних показників деталей. Склад одержаної шихти вивчали після магнітного оброблення та виділення дрібної фракції зерен конгломератів. Комплексними дослідженнями таких зерен встановлено, що магнітна складова вирізняється більшою часткою дисперсних алмазів, які покриті оксидними, недеформованими включеннями  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що захищають тверду фракцію від руйнування за багатошарової детонації та сприяють додатковій їхній щільності. Включення мають округлену форму, а гострі кути відсутні. В конгломератах шихти одноразово присутня і немагнітна складова. Виявлена різниця в складі магнітної шихти уможливорює використовувати її і для рішення інших завдань, ніж для вилучення з модифікуванням немагнітної частки. Додатково така шихта включає компоненти:  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Al}$ .

Виконано теоретичну оцінку оптико-математичним методом зерен конгломерату шихти та показано, що всі алмазні включення покриті оксидними плівками різного складу та з'єднаннями. Встановлено, що частка однієї фази (або компонента), оцінена згідно з кольором та його зміною, складає 11,26%, з'єднань двох — 80,9%, трьох — 6,19%, чотирьох не перевищує 1,65%, а більше — відповідає 0,81,

0,52, 0,23%. Максимальна частка належить плівкам сполук компонентів з Оксигеном. Вони відповідають лише 5 інтервалам змін складу 16 розглянутих варіантів. Частка діамантів фракції в зернах конгломерату локально змінюється від 7,04 до 24,27%.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. T. S. Skoblo, S. P. Romaniuk, A. I. Sidashenko, L. V. Omelchenko, and A. K. Oleynik, *Problems of Tribology*, 3: 51 (2017).
2. T. Skoblo, A. Nanka, Yu. Kuskov, A. Saychuk, V. Romanchenko, S. Romaniuk, I. Rybalko, A. Markov, Yu. Samsonov, and T. Maltsev, *Nano- sistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 19, Iss. 1: 23 (2021); <https://doi.org/10.15407/nnn.19.01.023>
3. T. S. Skoblo, O. O. Honcharenko, A. V. Markov, V. V. Teliatnikov, and S. V. Tupichenko, *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 6: 57 (2016).
4. T. S. Skoblo, L. V. Omelchenko, and S. P. Romaniuk, *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 183: 145 (2017).
5. A. A. Honcharenko, S. P. Romaniuk, A. S. Polyanskyi, L. V. Omelchenko, and V. V. Kolomiets, *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 10: 20 (2017).
6. A. V. Nanka, L. V. Omelchenko, and A. V. Markov, *Agricultural Technology and Energy Supply*, 1, 18: 16 (2018).
7. L. V. Omelchenko, *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 11: 301 (2018).
8. T. S. Skoblo, A. I. Sidashenko, S. P. Romaniuk, A. A. Honcharenko, L. V. Omelchenko, and V. A. Bantkovskiy, *Materials Science*, 55: 884 (2020); <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00383-4>

**ТЕМА 3**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ**  
**ДЕТАЛЕЙ МАШИНОБУДУВАННЯ**

**3.1. Нові технологічні процеси відновлення деталей наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною**

Виконавці: доц., д.т.н., доц. Рибалко І.М.,  
доц., к.т.н., доц. Тіхонов О.В., аспірант Захаров А.В.

**ВСТУП**

При взаємодії з ґрунтом робочих органів ґрунтообробних та посівних машин піддаються інтенсивному абразивного зношування. В процесі зношування робочих органів ріжучі кромки затупляються. На кромці лез і носка утворюється зворотна фаска, яка негативно впливає на стійкість ходу робочих органів по глибині, змінюється форма носка також форма і ширина леза лапи. Тупі лапи збільшують тяговий опір і тому знижують продуктивність, при цьому витрата палива зростає на 15 - 20%. Підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин вітчизняного виробництва, є актуальною проблемою для виробників і споживачів, тому що ресурс роботи багатьох елементів сільськогосподарської техніки нижчою за імпортні аналоги в 1,5 - 2 рази. В даний час для виготовлення робочих органів часто застосовують вуглецеву сталь марки 65Г, з подальшим зміцненням, що складається в термообробці. Така технологія надає деталям твердість 45...50 HRC і ударну в'язкість.

Відомі і використовувані до цього часу матеріали для підвищення зносостійкості робочих органів не задовольняють сучасним потребам фермерських господарств за своїми фізичними, механічними властивостями або за їх вартістю. Вихід слід шукати в створенні нових матеріалів або композитів, що відповідають вимогам роботи виробів на їх основі в заданих умовах середовища.

Для фермерського господарства будь-якої величини найкращий варіант відновлення і підвищення зносостійкості робочих органів сільгоспмашин в польових

умовах ручне дугове наплавлення. Серійні наплавочні електроди вітчизняного виробництва (наприклад, Т-620) не можуть забезпечити необхідної зносостійкості робочого органу сільгоспмашини, а імпортні наплавочні електроди (наприклад, Wearshield 70) надзвичайно дорогі (близько 72 гривні за електрод). Тому перспективою є розробка наплавочного електрода, що відповідає вимогам сучасного сільськогосподарського виробництва за фізико-механічними властивостями і за більш прийнятною ціною.

3.1.1. Аналіз методів відновлення і зміцнення ріжучих елементів робочих органів ґрунтообробних машин

Зносостійкість стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь доцільно збільшувати, використовуючи зміцнення їх ріжучих поверхонь. В даний час відомо велика кількість способів зміцнення робочих поверхонь різних деталей. Однак не всі вони доцільні для збільшення зносостійкості стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування при значних навантаженнях. Для зміцнення стрілочастих лап широко використовують термічну обробку (загартування), яка може проводитися як на всю глибину лапи, так і з використанням струмів високої частоти на твердість не менше 40 HRC на глибину загартовування 1...2 мм [1]. Однак істотного підвищення зносостійкості стрілочастих лап термічна обробка не забезпечує.

Широко поширеною технологією хіміко-термічної обробки (ХТО), яка застосовується для зміцнення ріжучих поверхонь стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь, є їх борирування. При використанні даної технології отримують дифузійні шари зміцнення глибиною до 300 ... 600 мкм, що мають високу твердість, а також значну абразивну зносостійкість [2]. Вченими Саратовського ДАУ розроблена технологія електролізного борирування стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь [3].

При електролізному борируванні зміцнюючу лапу розміщують у ванні з борним розчином (розплавом шлаку), що містить наступні основні компоненти: буру  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - 56%, борний ангідрид  $\text{B}_2\text{O}_3$  - 16%, карбонат калію (поташ)  $\text{K}_2\text{CO}_3$ - 16%,



метасиликат натрію  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  - 7%, фторцірконата калію  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$  - 5%. Процес борирування ведуть на наступних режимах: температура розплаву -  $850\text{...}950^\circ\text{C}$ , тривалість -  $1,5\text{...}2,5$  ч, щільність струму -  $0,1\text{...}0,3$  А/см<sup>2</sup>. Після борирування твердість зміцнених поверхонь становить  $58\text{...}62$  HRC. Однак низька продуктивність процесів ХТО (так, для борирування необхідно в середньому  $2 \dots 4$  год) стримує їх широке застосування в ремонтному виробництві. Відомий спосіб швидкісного електродугового зміцнення (ЕДЗ) ріжучих поверхонь стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь. Суть методу полягає в дифузійному насиченні зміцнюваної поверхні лапи вуглецем при горінні електричної дуги [4]. Спосіб ЕДЗ відрізняється високою продуктивністю і доступним обладнанням. Разом з тим, швидкісне ЕДЗ забезпечує твердість поверхні, що піддається зміцненню, не більше  $55 \dots 56$  HRC.

У роботах М.М. Литовченко і А.С. Юднікова збільшення ресурсу стрілочастих лап досягається за рахунок їх швидкісного електродугового зміцнення із застосуванням боронітроалітуючих паст [4]. Спосіб полягає в нанесенні на ріжучу кромку стрілочасті лапи паст, містить буру, карбід бору, кріоліт, фтористий натрій, нітрид натрію і в'язуча речовина. Зміцнення здійснюють після висихання паст непрямою дугою з використанням графітових електродів діаметром 10 мм на наступних режимах: сила струму -  $80\text{...}110$  А, напруга  $55\text{...}60$  В.

Внаслідок горіння електричної дуги відбувається термодиссоціація компонентів паст і термодифузійне насичення робочої поверхні лапи з утворенням боридних і карбонітридних включень. При цьому значно підвищується твердість зміцненої поверхні (до  $63\text{...}65$  HRC). Глибина зміцнення в середньому становить  $1,9\text{...}2,0$  мм. Зміцнення можливо і з використанням прямої дуги (одним електродом). Після зміцнення лапи піддають термообробці. Однак до недоліків даного способу можна віднести значну ціну компонентів, використовуваних для приготування паст.

Найбільш широко для зміцнення стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь використовують зносостійкі покриття, наносяться на їх ріжучі поверхні різними способами. Найбільш часто для цього використовують наплавочні технології. Так, наприклад, широко відома технологія індукційного наплавлення стрілочастих лап [5].

На зміцнювану поверхню наноситься присадний матеріал (шихта), який потім розплавляється під дією струмів високої частоти. Шихта складається з металевих порошків різного складу і флюсів. В якості порошків можуть використовуватися високолеговані чавуни, сплави на основі кобальту, вольфраму і нікелю, композитні матеріали ( псевдо сплави ) на основі карбідів вольфраму і хрому. В якості флюсів використовують склади, що містять 43...62% борної кислоти, 30...42% кристалічної бури і 5...15% силикокальція. Залежно від товщини наплавленого покриття в шихті повинно міститися 10...16% флюсу. склад флюсів підбирають з таким розрахунком, щоб розкислення рідкої ванни відбувалося протягом декількох секунд. Процес індукційного наплавлення стрілчастої лапи триває в середньому 15...20 с.

Розроблено технологію ручного дугового наплавлення стрілчастих лап ґрунтообробних знарядь порошковими електродами з композиційних СВС-матеріалів [6]. Отримання необхідної суміші для наплавлення відбувається в результаті механічного перемішування порошків ПР-Н70Х7С4Р4-3, вуглецю і титану. Потім отриману суміш механічно активують. Після цього йде СВС-реакція з утворенням керамічних компонентів (карбиду титану) і отриманням порошкового композиту  $TiC + ПР-Н70Х7С4Р4-3$ . Для виготовлення електрода СВС порошок засипають всередину сталевій трубки, після чого краю трубки щільно затискають і на електрод методом занурення наносять глину. Одержаний порошковий електрод піддають сушці в термо печі . Даний спосіб дозволяє збільшити ресурс стрілчастих лап ґрунтообробних знарядь в 2...4 рази. Однак велика кількість операцій, необхідних для виготовлення наплавочного композиту і електрода, істотно збільшує собівартість стрілчастих лап, зміцнених таким способом.

Розроблено технології лазерного наплавлення і зміцнення стрілчастих лап ґрунтообробних знарядь [7]. Лазерні технології дозволяють звести до мінімуму оплавлення поверхні матеріалу основи, тому властивості наплавленого шару визначаються властивостями порошкового матеріалу і режимами теплового впливу. Лазерне наплавлення робочих органів здійснюють з використанням порошкового сплаву ФБХ-6-2 з різними добавками, що містять тверді оксиди металів і м'яку спо-

лучну фазу [7]. перед наплавленням порошковий матеріал у вигляді обмазки наносить на зміцнювану поверхню, використовуючи в якості сполучного водний розчин оксиетилцелюлоза. Твердість наплавленого шару знаходиться в інтервалі 56...61 HRC. Також розроблені технології лазерного зміцнення з використанням в якості поглинає покриття кремнійорганічного матеріалу. Під дією високої температури і часу термічного циклу 0,5...1,5 с в поверхневому шарі відбувається формування нано частинок карбїду кремнію. Однак при використанні лазерних технологій зміцнення необхідне використання установок, які забезпечують просторове управління лазерним променем.

Проведені дослідження по зміцненню стрілчастих лап ґрунтообробних знарядь з використанням високочастотної плазми на установці Плазма-401. При реалізації даної технології в розрядній камері високочастотного плазматрона в плазмовий потік при атмосферному тиску вводиться пучок кварцових стрижнів, які в зоні високих температур випаровуються і плазмовим потоком транспортуються на поверхню стрілчастої лапи. На поверхні лапи відбувається конденсація парів напилюваного матеріалу товщиною 2...3 мм. Встановлено, що експериментальні стрілчасті лапи, зміцнені таким способом, мають в 1,5 рази більшою зносостійкістю і забезпечують значно краще самозагострювання, ніж серійні. До недоліків даної технології можна віднести високу вартість і складність обладнання, що застосовується, а також можливість його використання в основному в умовах великих підприємств.

Підвищити зносостійкість стрілчастих лап ґрунтообробних знарядь можливо за рахунок точкового зміцнення [8]. при його реалізації на ріжучу поверхню стрілчастої лапи з допомогою порошкового дроту ПП-Нп-80Х20Р3Т наплавляють зносостійкий матеріал у вигляді точок. Отримані в результаті цього твердосплавні елементи конусоподібної форми (точки) мають змінний перетин. Їх твердість також є змінною і зменшується до основного металу. Твердість основного і наплавленого металів змінюється в співвідношенні 1:1,5...1:3,0. Геометрію точок змінюють технологічними параметрами процесу - напругою, силою струму, часом наплавлення, вильотом електрода, полярністю, швидкістю подачі дроту. при експлуатації стрілчастих лап, зміцнених з використанням даної технології, зони основного металу

(меншою твердістю) зношуються більш значно, і на їх місці виходить западина. Ці западини чергуються з виступами наплавлених ділянок (зносостійких точок). В результаті створюється пилообразна ріжуча поверхня стрілкової лапи. Однак у даних лап мають місце викришування і відколи тендітних твердих включень, що викликає підвищений знос їх робочих поверхонь.

Металокерамічні матеріали (МКМ), які можуть використовуватися для підвищення зносостійкості ріжучих поверхонь стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь, експлуатованих в абразивній ґрунтовій масі, складаються з металевої сталевий основи (Матриці) з включеними до її складу надтвердими керамічними включеннями (оксидами, карбідами, нітридами і т.д.), тобто являють собою композиційний матеріал. Композиційний матеріал – це штучне поєднання різних за властивостями і формою двох або декількох матеріалів. При цьому дані матеріали мають чітку межу розділу між ними [9]. значною перевагою композиційних матеріалів є те, що вони об'єднують в собі позитивні властивості тих матеріалів, які входять до їх складу.

При зміцненні деталей знарядь МКМ найбільш часто наносяться на робочі поверхні у вигляді покриттів. Існує досить велика кількість способів, що дозволяють формувати дані покриття. Одним з сучасних перспективних способів отримання металокерамічних покриттів є карбовібродугове зміцнення (КВДУ) з використанням вугільного електрода і багатокомпонентних металокерамічних паст[10].

До комбінованих способів зміцнення стрілочастих [11] лап ґрунтообробних знарядь відносять ті технології, які поєднують в собі як термічну зміцнювану обробку, так і нанесення на ріжучу поверхню зносостійкого покриття. В цьому випадку можлива заміна цільноштампованих конструкцій стрілочастих лап на штампозварні. Це дозволяє значно знизити витрату дорогих марок легуваних сталей і, тим самим, собівартість зміцнених стрілочастих лап.

3.1.2. Дослідження впливу кераміки на структуру і властивості зміцнюючих покриттів лап культиваторів

3.1.2.1. Технологія зміцнення культиваторних лап

Найбільш універсальною технологією для нанесення зносостійких покриттів

є дугове наплавлення твердими сплавами, доцільність застосування якої залежить від ступеня нагріву зміцнюваних деталей і витрат на тверді сплави. Для підвищення зносостійкості лемішів розроблена технологія переривчастого наплавлення окремими прямолінійними або дугоподібними валиками, ширина яких менше відстані між ними [12]. За зонами застою ґрунту менш зв'язкові частки активного шару ґрунту здійснюють змішане відносне переміщення, включаючи ковзання, кочення, обертання і перекочування абразивних частинок в напрямку переміщення, що зменшує швидкість зношування робочої поверхні деталі по її товщині.

Наплавлення прямолінійних і дугоподібних валиків, що мають кільцеву або овальну форму змінює інтенсивність розпушування контактного шару ґрунту в залежності від її стану і фізико-механічних властивостей. Нанесення твердого сплаву у вигляді кільцевих валиків збільшує площу застійних зон ґрунту всередині і зовні бічній поверхні наплавленого валика, що підвищує ступінь розпушування контактного шару ґрунту за рахунок його багаторазового деформування [13].

Вдале використання методу наплавлення валиків на лемішах обумовлює використання даної технології при зміцненні лап культиваторів [14, 26]. Приклад схеми розташування валиків представлені на рис. 3.1.

### 3.1.2.2. Обладнання для наплавлення

Для проведення досліджень використовували зношену універсальну культиваторну лапу, виготовлену з конструкційної ресорно-пружинної сталі марки 65Г.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики обладнання

Найменування параметру	Значення
1. Напруга, В	220
2. Робочий струм, А	20-250
3. Напруга холостого ходу, В	75
4. Максимальна потужність, кВт	6
5. Діаметр зварювального електрода, мм	1,6-5
6. Габаритні розміри, мм	265 x 110 x 170
7. Довжина дроту робочого струму, м	2
8. Вага, кг	2,9

Для виконання ручного дугового наплавлення використовували зварювальний інвертор GERRARD MMA-250 (рис. 3.2), який призначений для зварювання

постійним струмом за допомогою штучних зварювальних електродів, діаметром від 1.6 мм до 5 мм (табл. 3.1). набір інвертора GERRARD MMA-250 включає в себе зварювальний інвертор, кабель з тримачем електродів, кабель для заземлення «клема-земля», маска-щиток, а також молоточок з щіткою.

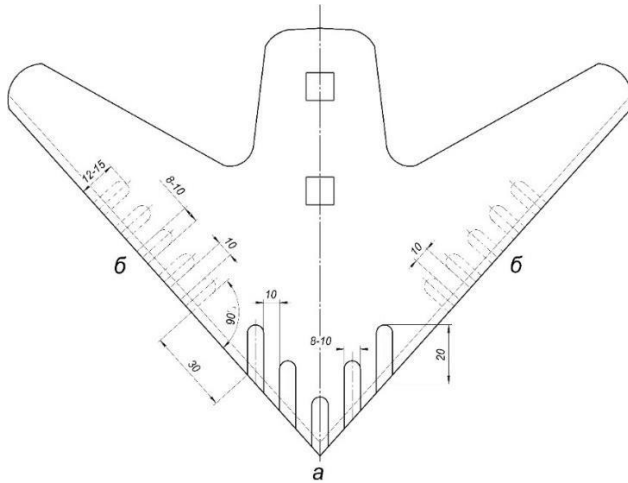


Рисунок 3.1 – Схема наплавлення зміцнюючих смуг на поверхню стрілкової лапи культиватора: а – носок; б – крила [26]



Рисунок.3.2 –Зварювальний інвертор GERRARD MMA-250

### 3.1.2.3. Вибір режимів наплавлення

Режим обумовлює характер протікання процесу зварювання і забезпечує одержання зварного шва заданої форми і розмірів. Усе визначається діаметром, типом і маркою електрода, коефіцієнтом наплавлення, родом, полярністю і силою струму, напругою дуги, швидкістю зварювання, кутом нахилу і руху електрода, масою наплавленого металу [15]. Діаметр електрода вибирається залежно від товщини металу, що зварюється. При зварюванні в нижньому положенні для вибору діаметра можна користуватися табл.3.2.

Таблиця 3.2 –Вибір діаметра стрижня електрода, що зварюється за товщиною металу

Товщина S металу, що зварюється, S мм	до 1,5	2	3	4-5	6-8	9-12	13-15	16-20	вище 20
Діаметр d стрижня електрода, мм	1-1,6	2	3	3-4	4-5	4-5	5	5-6	6-8

При зварюванні горизонтальних, вертикальних і стельових швів незалежно

від товщини металу, що зварюється, застосовують електроди діаметром  $d_e < 4$  мм.

Тип і марка електроду вибираються залежно від марки і механічних властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ , KCV) металу, що зварюється, призначення і умов роботи конструкції. Сила зварювального струму  $I$  вибирається залежно від діаметра стрижня електрода  $d_e$  й положення зварного шва в просторі. При зварюванні в нижньому положенні:

$$I = K \times d, \text{ (A)} \quad (3.1)$$

$$I = 40 \times 4 = 160 \text{ (A)}$$

де  $K$  - коефіцієнт пропорційності, який при зварюванні вуглецевих і низьколегованих сталей у нижньому положенні дорівнює 35-60 А/мм для товщини металу 5-30 мм (або дивись табл.3.3).

При зварюванні горизонтальних і вертикальних швів сила струму зменшується на 10-15%, а стельових - на 15-20%.

Таблиця 3.3 – Вибір коефіцієнта пропорційності залежно від діаметра електрода

$d_e$ , мм	1-2	3-4	5-6
$K$ , А/мм	25-30	30-45	45-60

Силу зварювального струму, розраховану по формулі, слід відкоригувати з урахуванням товщини елементів, що зварюються, типу з'єднання і положення шва в просторі. Рід струму і полярність вибираються залежно від марки металу, що зварюється, його товщини, марки електрода, призначення конструкції. Зварювання вуглецевих сталей звичайно виконують на змінному струмі.

Напруга для стійкого горіння дуги  $U_d$  визначається по формулах:

$$U_d = U_{ка} + E_c \times l \text{ або } U_d = 20 + 0,04I \quad (3.2)$$

$$U_d = 20 + 0,04 \times 160 = 26,4$$

де  $U_{ка} = 20-22$  - сумарне спадання напруги на катоді і аноді, В;  $E_c = 3,3-3,8$  - градієнт напруги (напруженість) у стовпі дуги. В/мм;  $l = (0,5-1,1) d$  - довжина дуги, мм;  $I$  - зварювальний струм. Маса наплавленого металу:

$$G_{осн} = \frac{S_{осн}}{1000} \times L_{осн} \times \rho, \text{ г} \quad (3.3)$$

де  $S_{осн}$  - площа поперечного перерізу основного шва, мм<sup>2</sup>;  $L_{осн}$  - сумарна довжина основних зварних швів, мм;  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup> - щільність наплавленого металу.

$$S_{осн} = (6-8) \cdot d \quad (3.4)$$

$$S_{\text{осн}}=8*4=32\text{мм}^2$$

$$G_{\text{осн}} = \frac{32}{1000} \times 400 \times 7,8 = 99,84 \quad (3.5)$$

Витрата електродівна виготовлення металевої ванни:

$$G_{\text{ел}} = k \cdot G_{\text{н}}, \text{ г} \quad (3.6)$$

$$G_{\text{ел}}=1,6*99,84=159,74 \text{ г}$$

де  $k = 1,6-1,8$  - коефіцієнт витрати електродів на 1кг наплавленого металу.

Коефіцієнт витрати  $k$  враховує:

- масу електродного покриття;
- втрати металу на вигар, розбризкування і недогарки.

Час зварювання, необхідний для виконання зварювальних робіт:

$$T_{\text{св}} = T_{\text{осн}} + T_{\text{огл}} + T_{\text{зач}} + T_{\text{під}} + T_{\text{відп}}, \quad (3.7)$$

де:  $T_{\text{осн}}$  - основний технологічний час, год;  $T_{\text{обсл}}$  - час, витрачений на обслуговування обладнання, год;  $T_{\text{під}}$  - підготовчий час на одержання електродів, інструмента й ін., год;  $T_{\text{відп}}$  - час, витрачений на відпочинок, ч.

Основний технологічний час розраховують, використовуючи формулу:

$$T_{\text{осн}}=L_{\text{осн}}/V, \text{ хв} \quad (3.8)$$

$$T_{\text{осн}}=40/6=6,6, \text{ хв}$$

Час огляду шва становить 35% від  $T_{\text{осн}}$ :

$$T_{\text{огл}}=0,35 \times T_{\text{осн}} \quad (3.9)$$

$$T_{\text{огл}}=0,35 \times 6,6=2,31, \text{ хв.}$$

Час на зачистку шва визначають за формулою:

$$T_{\text{зач}}=0,6 \times L_{\text{осн}}, \text{ хв} \quad (3.10)$$

$$T_{\text{зач}}=0,6 \times 0,40=0,24, \text{ хв.}$$

На підготовчий час виділяють 5% від основного часу:

$$T_{\text{підг}}=0,05 \times T_{\text{осн}}, \text{ хв.} \quad (3.11)$$

$$T_{\text{підг}}=0,05 \times 6,6=0,33, \text{ хв.}$$

На відпочинок після кожної роботи виділяють 10% від загальної кількості часу.

$$T_{\text{від}}=0,1 \times T_{\text{осн}}, \text{ хв.} \quad (3.12)$$

$$T_{\text{від}}=0,1 \times 6,6=0,66, \text{ хв.}$$



$$T_{\text{св}}=6,6+2,31+0,24+0,33+0,66=10,14 \text{ хв}$$

Продуктивність і швидкість зварювання:

$$G = K_{\text{н}} \times I_{\text{св}}, \text{ г/год} \quad (3.13)$$

Коефіцієнт наплавлення  $K_{\text{н}}$  (г/(А • ч)) - маса наплавленого на поверхню деталі металу в грамах за 1 годину, що припадає на силу струму в 1 ампер.

$$G = 30 \times 160 = 4800 \text{ ,г/год}$$

Швидкість зварювання при формуванні основного шву

$$V_{\text{св}}^{\text{осн}} = \frac{K_{\text{н}} \times I_{\text{св}}}{\rho \times S_{\text{осн}}}, \text{ м/год} \quad (3.14)$$

$$V_{\text{св}}^{\text{осн}} = \frac{30 \times 160}{7,8 \times 32} = 19,2 \text{ , м/год}$$

Витрату електроенергії розраховують, використовуючи формулу

$$Q = 0,001 \cdot U_{\text{д}} \cdot I_{\text{св}} \cdot T_{\text{осн}}, \quad (3.15)$$

де:  $U_{\text{д}}$  - робоча напруга дуги, В;  $I_{\text{св}}$  - сила зварювального струму, А;  $T_{\text{осн}}$  - основний технологічний час зварювання, ч.

$$Q = 0,001 \times 26,4 \times 160 \times 10,14 = 42,83, \text{Вт}$$

#### 3.1.2.4. Матеріал для наплавлення

Перед зміцненням культиваторної лапи були проведені експериментальні дослідження з вибору наплавочного матеріалу. Для цього обрано стандартно використовуються електроди для зміцнення ріжучого інструменту ґрунтообробних знарядь Т-620 (табл. 3.4 і рис. 3.3, а). Вони призначені для наплавлення деталей, що працюють в умовах переважно абразивного зношування з помірними ударними навантаженнями. Наплавлений метал має високу зносостійкість в умовах стирання абразивними матеріалами, зниженою опірністю ударам, схильний до утворення тріщин, які не знижують зазвичай експлуатаційну стійкість наплавлених деталей.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад наплавленого металу електродом Т-620

Хімічний склад наплавленого металу (типове значення),%							
С	Si	Mn	Cr	Ti	B	S	P
вуглець	кремній	Марганець	Хром	Титан	Бор	сірка	фосфор
3,00	2,20	1,20	22,50	0,70	0,80	0,030	0,030

Твердість HRC - 58-64 (в початковому стані). По таблиці наближених співвідношень між числами твердості HRC, HRA, HB і HV визначили, що твердість по Віккерсу при наплавленні електродом T-620- 655-789HV [16].

Для підвищення експлуатаційної стійкості виробів в процесі їх зміцнення і відновлення використовують наплавочні матеріали з легуючими компонентами.

В даний час новим перспективним способом зміцнення, що дозволяє значно підвищити твердість і зносостійкість різальних крайок лап культиваторів та інших робочих органів, є застосування металокерамічних матеріалів [17-19]. Кераміка - неорганічні полікристалічні матеріали, одержувані з сформованих мінеральних мас (глин і їх сумішей з мінеральними добавками) в процесі високотемпературного (1200 ... 1500 ° C) спікання [20]. У зв'язку з цим на електрод нанесли глину на клейовій основі (рис. 3.3, б). Було обрано хромистий електрод у зв'язку з тим, що тільки так можна було виявити різницю у хімічному складі при введенні глини.

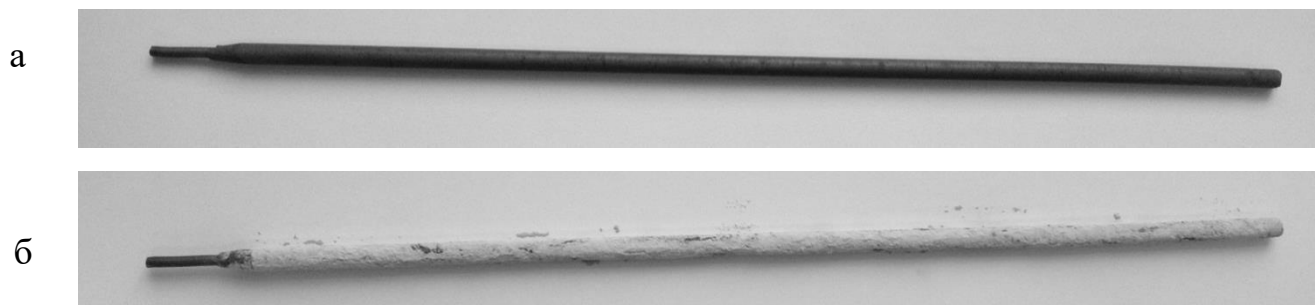


Рисунок 3.3 – Електроди для зміцнення культиваторних лап: а – електрод Т-620; б – з обмазкою глиною

#### 3.1.2.5. Дослідження структури покриттів

Неметалеві включення можуть мати розміри від дисперсних, нерозпізнаних при зазвичай застосовуваних збільшеннях мікроскопа, до великих, видимих неозброєним оком. Протяжність плівкових включень може досягати кілька десятків міліметрів. Розрізняють макровключення (розміром більше 1 мм) і мікровключення (розміром менше 1мм) [21-23].

Неметалеві включення не відносяться до числа дефектів відновлюваних шарів, але роблять помітний вплив на їх якість і властивості при експлуатації. Розглянули різні типи неметалевих включень, що зустрічаються в цій зоні.

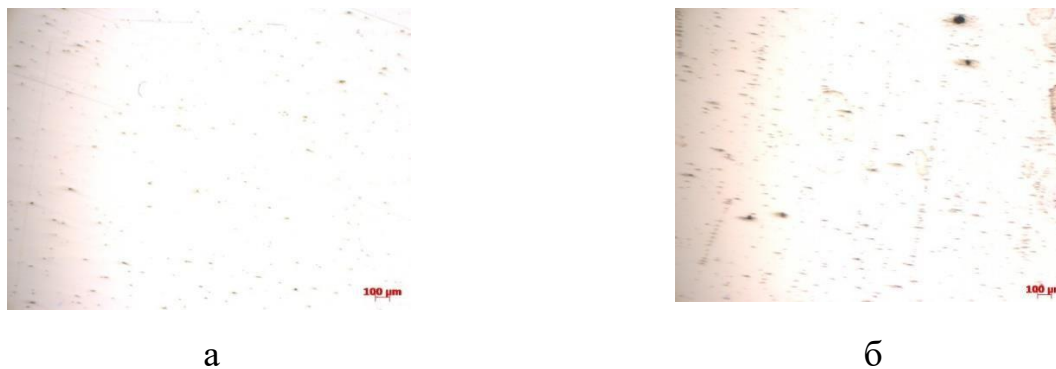


Рисунок 3.4 – Структура наплавленого шару електродом Т-620 (а)  
і основного металу (б)

Наплавлений метал в варіанті наплавлення електродом має меншу кількість неметалічних включень (рис. 3.4), ніж при обмазці глиною (рис.3.5).

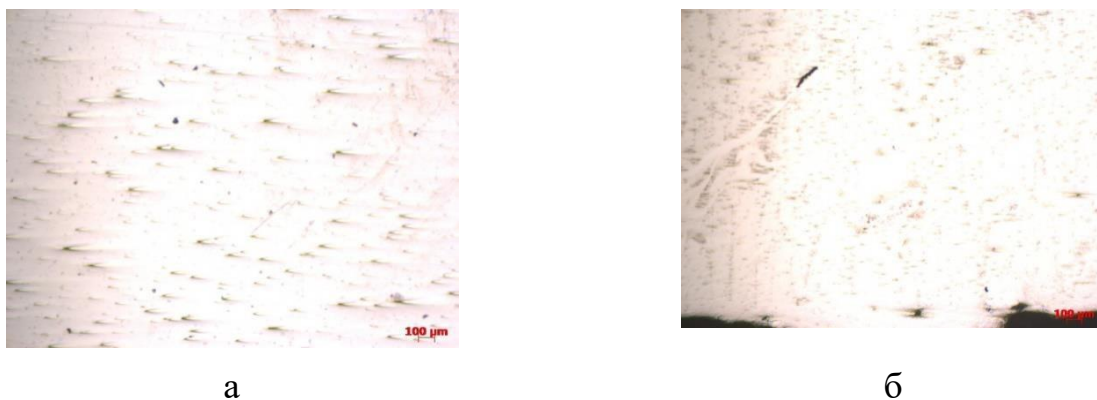


Рисунок 3.5 – Структура наплавленого шару електродом  
Т-620 з обмазкою глиною (а) і основного металу (б)

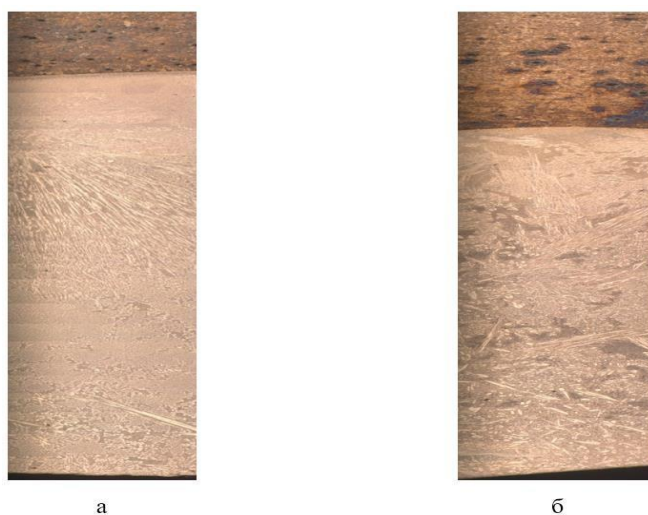


Рисунок 3.6 – Панорама мікроструктури наплавлення зразків: а - наплавка електродом Т-620; б - наплавлення електродом Т-620 з обмазкою глиною, х200

Досліджували панораму мікроструктури при наплавленні (рис.3.6). При введенні глини в рідку ванну структура змінюється, стає грубішою. Це пов'язано зі зміною температури при наплавленні. В обох варіантах формується структура мартенсит відпуску.

### 3.1.2.6. Дослідження мікротвердості нанесених покриттів

Для визначення однорідності властивостей, що формується структури в різних зонах стаціонарним твердоміром по Мікро-Вікерсом, модель UIT-NVmicro1 з'явно оцінили мікротвердість досліджуваних зразків (табл. 3.5-3.7, рис. 3.7-3.9).

Таблиця 3.5 - Мікротвердість поверхні наплавлення електродом

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D <sub>1</sub> 11,19	780,8
	D <sub>2</sub> 11,25	
2	D <sub>1</sub> 8,81	1283,3
	D <sub>2</sub> 8,19	
3	D <sub>1</sub> 12,19	686,1
	D <sub>2</sub> 11,13	
4	D <sub>1</sub> 11,50	724,5
	D <sub>2</sub> 11,19	
5	D <sub>1</sub> 10,19	882,5
	D <sub>2</sub> 10,31	

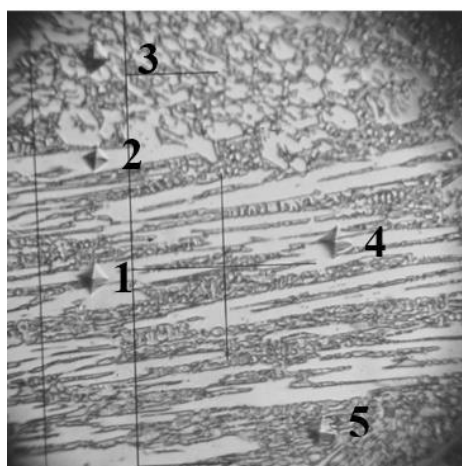


Рисунок 3.7 – Зони вимірювання мікротвердості поверхні наплавлення електродом

Мікротвердість поверхні наплавлення електродом має найменше значення 686,1 HV, а найбільше 1283,3 HV. Мікротвердість середньої частини наплавлення

електродом має найменше значення 490,6 HV та найбільше 802,3 HV. Мікротвердість перехідного шару наплавлення електродом має найменше значення 379,6 HV та найбільше 1098,4 HV.

Таблиця 3.6 – Мікротвердість середній частині наплавлення електродом

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D <sub>1</sub> 10,31	802,3
	D <sub>2</sub> 11,19	
2	D <sub>1</sub> 10,88	671,6
	D <sub>2</sub> 12,63	
3	D <sub>1</sub> 10,94	793,1
	D <sub>2</sub> 10,75	
4	D <sub>1</sub> 14,44	460,6
	D <sub>2</sub> 14,00	
5	D <sub>1</sub> 10,94	678,8
	D <sub>2</sub> 12,50	

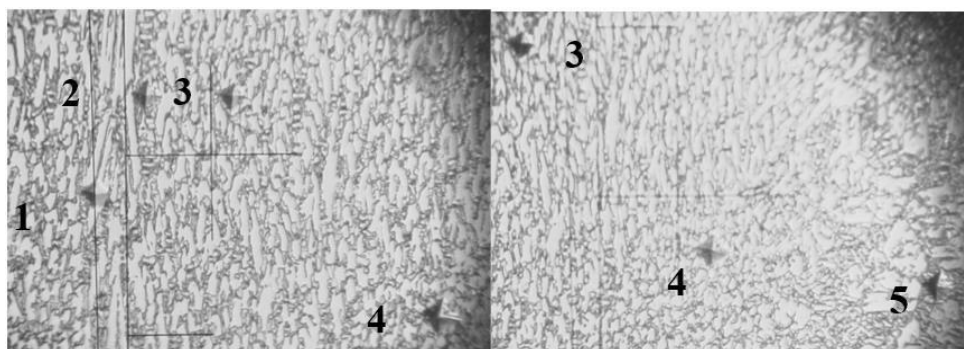


Рисунок 3.8 – Зони вимірювання мікротвердості у середній частині наплавлення електродом

Таблиця 3.7 – Мікротвердість перехідної зони наплавлення електродом

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D <sub>1</sub> 15,94	379,6
	D <sub>2</sub> 15,31	
2	D <sub>1</sub> 11,25	708,8
	D <sub>2</sub> 11,63	
3	D <sub>1</sub> 10,63	915,7
	D <sub>2</sub> 9,56	
4	D <sub>1</sub> 10,25	988,0
	D <sub>2</sub> 9,13	
5	D <sub>1</sub> 9,56	1098,4
	D <sub>2</sub> 8,81	

Аналогічні зони аналізували і для наплавлення електродом Т-620 з обмазкою глиною (табл. 2.8-2.10, рис. 2.10-2.12).

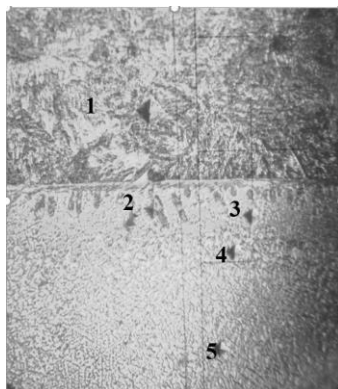


Рисунок. 3.9 – Зони вимірювання мікротвердості перехідного шару наплавлення електродом

Таблиця 3.8 – Мікротвердість поверхні наплавлення електродом з обмазкою глиною

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D <sub>1</sub> 9,69	1144,7
	D <sub>2</sub> 8,38	
2	D <sub>1</sub> 8,00	1160,7
	D <sub>2</sub> 9,88	
3	D <sub>1</sub> 10,38	841,0
	D <sub>2</sub> 10,63	
4	D <sub>1</sub> 12,13	757,6
	D <sub>2</sub> 11,94	
5	D <sub>1</sub> 9,63	1144,7
	D <sub>2</sub> 8,44	



Рисунок. 3.10 – Зони вимірювання мікротвердості поверхні наплавлення електродом з обмазкою глиною

Мікротвердість поверхні наплавлення електродом з обмазкою глиною має найменше значення 757,6 HV та найбільше 1160,7 HV. Мікротвердість середньої

частини поверхні наплавлення електродом із обмазкою глиною має найменше значення 605,5 HV та найбільше 1193,9HV.

Таблиця 3.9 – Мікротвердість середній частині поверхні наплавлення електродом з обмазкою глиною

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D <sub>1</sub> 9,88	811,7
	D <sub>2</sub> 11,50	
2	D <sub>1</sub> 9,13	962,9
	D <sub>2</sub> 10,50	
3	D <sub>1</sub> 9,50	975,3
	D <sub>2</sub> 10,06	
4	D <sub>1</sub> 11,95	605,5
	D <sub>2</sub> 12,88	
5	D <sub>1</sub> 8,38	1193,9
	D <sub>2</sub> 9,31	

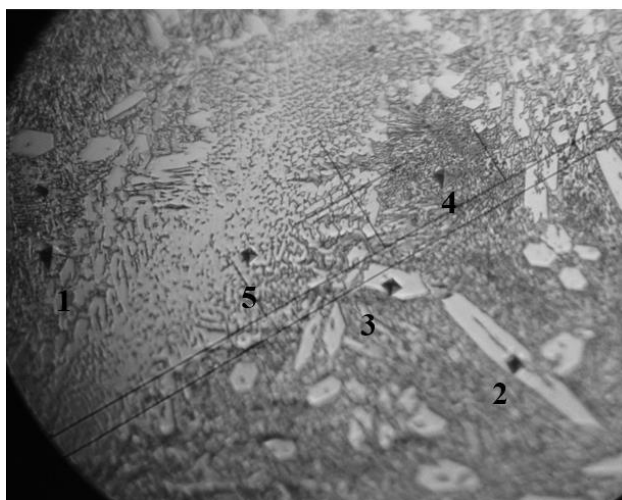


Рисунок. 3.11 – Зони вимірювання мікротвердості середній частині поверхні наплавлення електродом із обмазкою глиною

Таблиця 3.10 – Мікротвердість перехідної зони наплавлення електродом з обмазкою глиною

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D <sub>1</sub> 10,81	831,1
	D <sub>2</sub> 10,38	
2	D <sub>1</sub> 12,44	671,6
	D <sub>2</sub> 12,50	
3	D <sub>1</sub> 15,63	338,0
	D <sub>2</sub> 17,56	
4	D <sub>1</sub> 11,25	559,3
	D <sub>2</sub> 14,56	
5	D <sub>1</sub> 10,06	766,3
	D <sub>2</sub> 12,0	

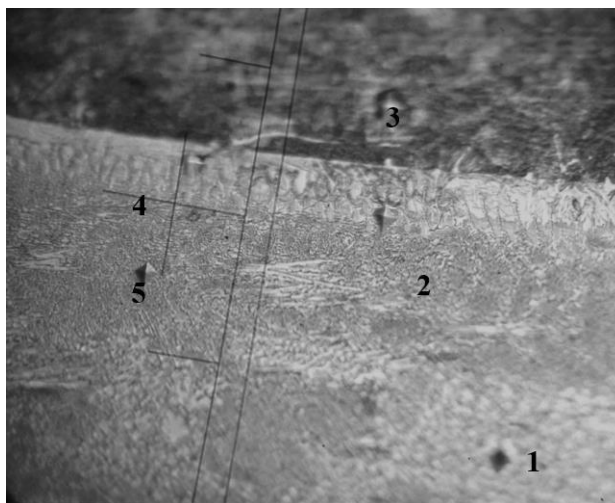


Рисунок. 3.12 – Зони вимірювання мікротвердості перехідного шару наплав-  
лення електродом з обмазкою глиною

Мікротвердість перехідного шару наплавлення електродом з обмазкою гли-  
ною має найменше значення 338,0 HV та найбільше 831,1 HV.

### 3.1.2.7 Дослідження розподілу компонентів в покритті і перехідній зоні

Таблиця 3.11 – Аналіз розподілу хімічних елементів в наплавленому шарі при на-  
плавленні електродом Т-620

#### Поверхня наплавлення

Спектр	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo	Підсумок
1	8.71	3.15	0.51	1.69	22.24	5.38	55.47	0.34	2.50	100.00
2	8.91	2.78	0.19	1.48	24.05	4.96	54.61	0.86	2.15	100.00
3	10.51			0.05	42.71	5.49	39.47		1.77	100.00
4	7.71	2.52	0.17	1.60	23.35	5.34	56.83	0.84	1.64	100.00
Макс.	10.51	3.15	0.51	1.69	42.71	5.49	56.83	0.86	2.50	
Мін.	7.71	2.52	0.17	0.05	22.24	4.96	39.47	0.34	1.64	

#### Середина наплавлення

Спектр	C	O	Al	Si	Ca	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo	Підсумок
1	8.05	2.42	0.23	1.53	0.18	24.24	5.75	54.81	0.81	1.98	100.00
2	7.60	2.37	0.29	1.60		22.85	5.55	57.03	0.36	2.37	100.00
3	7.69	1.60	0.29	1.55	0.09	24.04	5.53	56.86	0.34	2.02	100.00
4	9.43					42.95	5.19	41.00		1.43	100.00
Макс.	9.43	2.42	0.29	1.60	0.18	42.95	5.75	57.03	0.81	2.37	
Мін.	7.60	1.60	0.23	1.53	0.09	22.85	5.19	41.00	0.34	1.43	

#### Перехідна зона

Спектр	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo	Підсумок
1	7.14		0.26	1.60	21.96	5.35	61.26	0.29	2.14	100.00
2	7.01	2.30		1.27	13.91	3.90	70.29		1.32	100.00
3	6.65	3.39	0.17	0.19	0.28	0.99	88.32			100.00
4	5.55	2.11		0.17		0.92	91.24			100.00
Макс.	7.14	3.39	0.26	1.60	21.96	5.35	91.24	0.29	2.14	
Мін.	5.55	2.11	0.17	0.17	0.28	0.92	61.26	0.29	1.32	



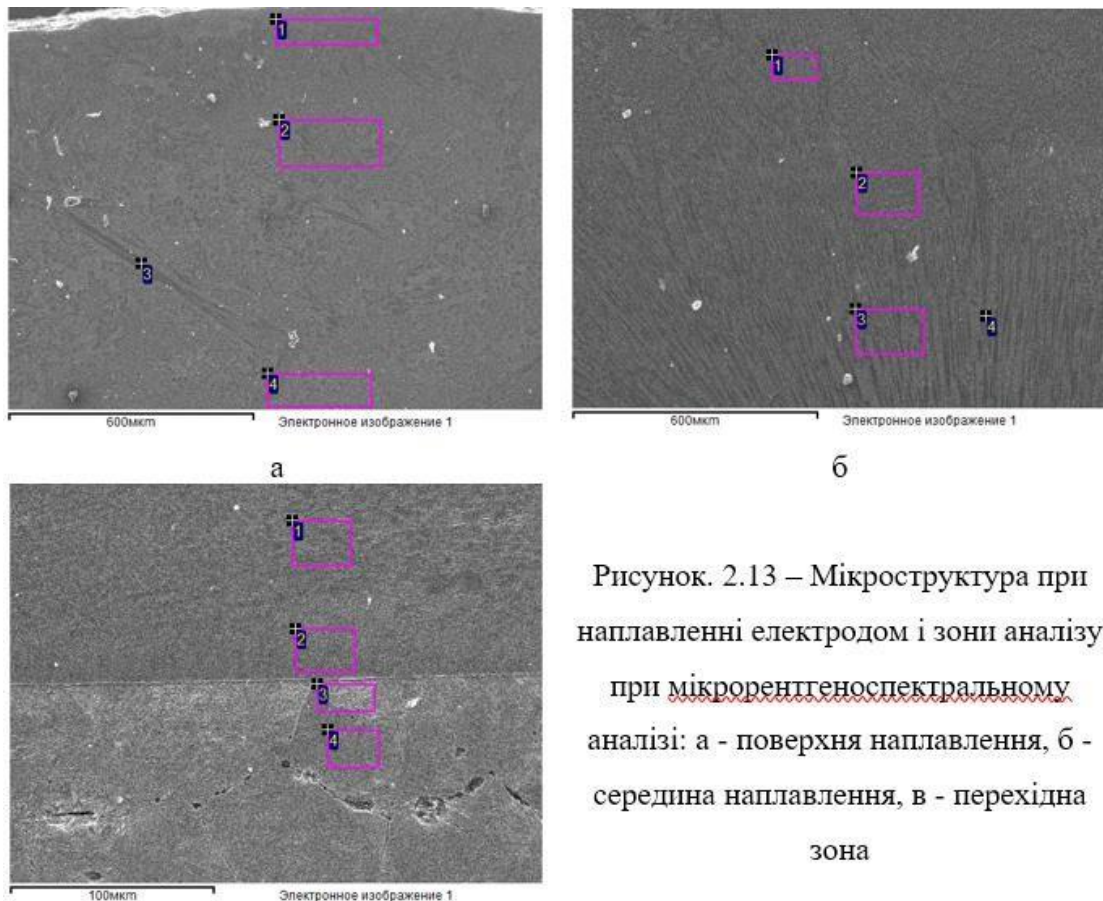


Рисунок. 2.13 – Мікроструктура при наплавленні електродом і зони аналізу при мікрорентгеноспектральному аналізі: а - поверхня наплавлення, б - середина наплавлення, в - перехідна зона

Для з'ясування більш точної картини впливу введення глини і однорідності розподілу компонентів, проведений мікрорентгеноспектральний аналіз наплавлених зразків по різних варіантах (табл. 3.11-2.12, рис. 3.13-3.14).

Для встановлення характеру розподілу компонентів виконана термоелектронна емісія зразка, наплавленого електродом з обмазкою глиною. Розподіл С, О, Al, Si є однорідним. Хром в пластинчастих виділеннях, в яких немає заліза, кремнію, алюмінію і вуглецю. Марганець розподілений однорідно. За винятком включень і окремих кордонів зерен. Включення складні Cr + Mn + Ca + O. У матриці залізо і мінімум хрому (відсутній), тобто матриця феритної.

Основа матриці - крем'янисті залізо. Включення хрому дисперсні і голчасті. Виділення заліза по межах їх зерен. Аналіз квазігомогенного зерна: наявність вуглецю, розташований в зерні не є однорідним, кисень - однородно, крім кордону, дуже дрібні і окремі великі включення алюмінію разом з кремнієм, Al ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ) андалузит і силікати Al. Молібдену мінімум в цих зонах. Марганець на межі зерен від 10 до 20 мкм (Mn-Cr-O).

Таблиця 3.12 – Аналіз розподілу хімічних елементів в наплавленому шарі при наплавленні електродом Т-620 з обмазкою глиною.

**Поверхня наплавлення**

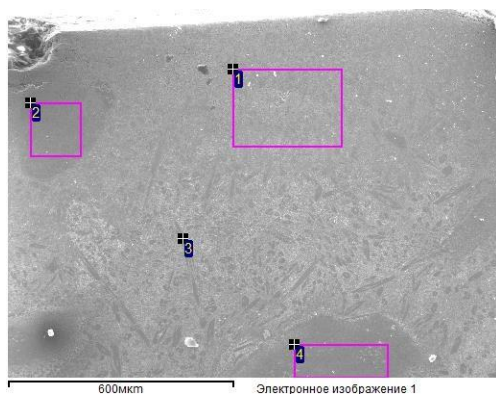
спектр	C	O	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo	підсумок
1	7.88	1.88	0.19	1.36	0.06	0.08	19.08	4.80	62.82	0.31	1.54	100.00
2	7.95	1.07	0.60	0.53	0.07	0.14	84.60	1.11	3.94			100.00
3	8.27	2.01	0.16	0.86			21.60	5.47	59.49		2.13	100.00
4	7.53		0.63	3.27		0.23	57.86	10.02	14.67	1.64	4.16	100.00
Макс.	8.27	2.01	0.63	3.27	0.07	0.23	84.60	10.02	62.82	1.64	4.16	
Мін.	7.53	1.07	0.16	0.53	0.06	0.08	19.08	1.11	3.94	0.31	1.54	

**Середина наплавлення**

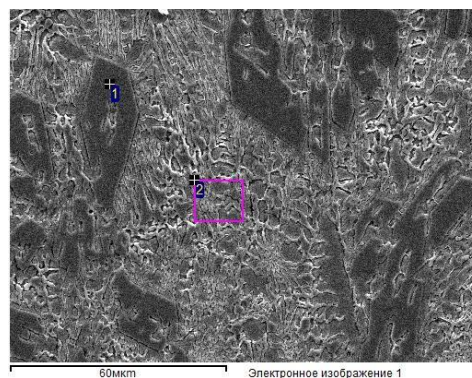
спектр	C	Al	Si	Ca	Cr	Mn	Fe	Mo	підсумок
1	9.50				41.36	4.87	43.01	1.26	100.00
2	6.08	0.22	1.77	0.09	16.43	4.96	69.08	1.38	100.00
Макс.	9.50	0.22	1.77	0.09	41.36	4.96	69.08	1.38	
Мін.	6.08	0.22	1.77	0.09	16.43	4.87	43.01	1.26	

**Перехідна зона**

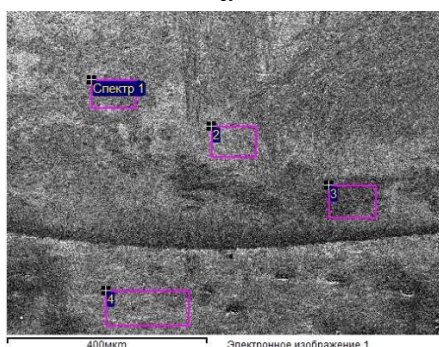
спектр	C	Al	Si	Ca	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo	підсумок
спектр 1	5.81	0.14	1.41		17.72	4.61	68.77		1.54	100.00
2	6.54	0.21	1.27	0.13	19.46	4.77	66.10		1.52	100.00
3	5.50	0.24	1.34		19.25	4.68	67.12	0.44	1.44	100.00
4	5.44		0.20			0.95	93.41			100.00
Макс.	6.54	0.24	1.41	0.13	19.46	4.77	93.41	0.44	1.54	
Мін.	5.44	0.14	0.20	0.13	17.72	0.95	66.10	0.44	1.44	



а



б



в

Рисунок 3.14 – Мікроструктура при наплавленні електродом з обмазкою глиною і зони аналізу при мікрорентгеноспектральному аналізі:

а - поверхня наплавлення, б - середина наплавлення, в - перехідна зона

Хромисті виділення (Mn + Mo), дрібні включення  $TiO_2$  в матриці і дрібні сферичні включення, що містять кремній, кисень і залізо.

Зона термічного впливу однорідна і містить залізо (основа) і трохи більше вуглецю, ніж в наплавленні. Спостерігаються дендрити заліза, що ростуть від підкладки. Хромисті виділення - голчасті. У матриці дрібні включення, що містять кремній і залізо. Наплавлення виконувалася на зношену деформовану зону.

### 3.1.2.8. Стендові випробування на зношування

Для оцінки впливу модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів провели їх випробування на зношування [27] проводили на машині тертя СМТ-1 на підприємстві ДП «Завод ім. В.А. Малишева ». Відносну зносостійкість різних способів відновлення і зміцнення поверхні деталей проводили за п'ятьма варіантами: 1 – згідно вихідного стану матеріалу культиваторної лапи - сталь 65Г, 2 - нанесенням покриття електродом Т-620 з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти шляхом обмазки електрода; 3 - наплавленням електродом Т-620 з використанням розплавленням шлікерного покриття немагнітної фракції детонаційної шихти; 4 - нанесенням покриття електродом Т-620; 5 – наплавленням електродом Т-620 з його обмазкою глиною. Випробування проводили за схемою «диск-колодка». Схема випробувань і розмір зразків наведені на рис. 3.15.

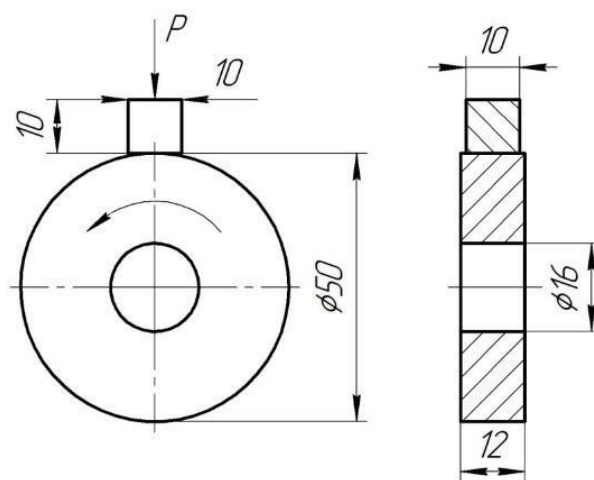


Рисунок 3.15 - Схема випробувань і розміри зразків при стендових випробуваннях на зношування

Випробування зразків здійснювали в абразивному середовищі кварцового піску без змащення і проводили за схемою Бринеля. Випробуванню піддавали зразки розміром 10x10мм, вирізані з зон без та з покриттями. В якості контртіла використовували фторопласт (ПТФЕ-4). В даному випробуванні фторопласт використовували як тіло для утримання абразиву в зоні тертя. Абразивом обрано пісок Старовірівського родовища (Україна) фракцією 0,25-0,4мм. Перед випробуванням підготовлені зразки (колодки, диски) промивали, маркували, зважували на вагах WA-200. Результати попередніх випробувань наведені в табл. 3.15. Шлях тертя склав 100м. В результаті аналізу показано, що найкращі показники при випробуванні на знос показали зразки з додатковим введенням глини і не магнітної складової детонаційної шихти з алмазною фракцією. Наплавлення по шлікерному покриттю істотних змін не вносить і за коефіцієнтом тертя знаходиться на рівні зі звичайним наплавленням електродом.

Таблиця 3.15 – Випробування на зношування в умовах абразивного середовища

№з/п	Варіант зміцнення	Коефіцієнт зносу, %
1	Вихідний матеріал культиваторною лапи сталь 65Г	1,0
2	Наплавлення обмазкою електродом Т-620 з введенням немагнітної фракції детонаційної шихти	0,30
3	Наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти	0,63
4	Наплавлення електродом Т-620	0,62
5	Наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням глини	0,45

При введенні глини або шихти у відновлювальне покриття, зносостійкість підвищується в 1,3-2 рази по відношенню до нанесення його електродом без модифікування і в 2-3 рази - до звичайного матеріалу культиваторною лапи.

Для подальшого аналізу провели додатково порівняльні випробування на знос при різних умовах тертя (сухе, сухе з подачею кварцового піску фракцією 0,25-0,40мм; з подачею кварцового піску і води) і оцінили мінливість коефіцієнтів тертя (табл. 3.16 і рис. 3.16). При таких випробуваннях також використовували деталь

для сполучення «диск» з фторопласту Ø50мм, швидкість ковзання при цьому становила 0,78 м/с. Деяке зниження коефіцієнта тертя при випробуванні наплавлених варіантів культиваторних лап без модифікування (див. рис. 3.16, б варіант №4) пов'язано з процесом схоплювання, що знижує період випробувань.

З отриманих даних виходить, що найбільш низький коефіцієнт характерний для -сухого, а також - гідроабразивного в зразках з додатковим модифікуванням глиною та детонаційною шихтою. При подачі абразиву у зону тертя коефіцієнт знижується в зразках з наплавленням покриття електродом з модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти.

Таблиця 3.16 – Випробування на зношування покриттів

№ варіанту	Значення $f_{тр}$ при умовах випробувань		
	P=50Н*	P=50Н**	P=200Н***
1. Вихідний матеріал культиваторною лапи сталь 65Г	0,48-0,52	0,64-0,70	0,38-0,42
2. Наплавлення обмазкою електродом Т-620 з введенням немагнітної фракції детонаційної шихти	0,40-0,50	0,68-0,74	0,38-0,42
3. Наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти	0,40-0,43	0,72-0,74	0,34-0,38
4. Наплавлення електродом Т-620	0,40-0,49	0,60-0,64	0,32-0,34
5. Наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням глини	0,44-0,46	0,72-0,83	0,34-0,36

Умови випробувань: \* сухе тертя; \*\* сухе з подачею кварцового піску фракцією 0,25-0,40мм; \*\*\* з подачею кварцового піску і води.

Виходячи з одержаних результатів випробувань для підвищення стійкості культиваторних лап в експлуатації рекомендується при нанесенні відновлювальних покриттів використовувати вторинну сировину для модифікування відновлювальних покриттів та природні матеріали, які не тільки підвищують стійкість робочого інструменту машин, а й зменшують їх схильність до пошкоджуваності, завдяки мінімальному проплавленню тонкостінного виробу культиваторної лапи, зниження перетину перехідного шару та рівня напружень.

Дослідженнями показано, що коефіцієнт тертя нижчий при гідроабразивному режимі тертя і складає для вихідного матеріалу культиваторної лапи сталь

65Г-0,38-0,42, наплавлення електродом Т-620 з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти-0,38-0,42, електроду Т-620 по шлікерному покритті не магнітної фракції детонаційної шихти - 0,34-0,38, електроду Т-620- 0,32-0,34, електроду Т-620 з додатковим введенням глини- 0,34-0,36.

Нова технологія відновлення деталей з використанням складу детонаційної шихти від утилізації боєприпасів захищено патентом України [26, 27].

Для зміцнення вибираємо композицію електрод Т-620 з обмазкою глиною, так як після наплавлення електродом Т-620 утворюються тріщини на поверхні наплавленого шару (рис. 3.17). Це пов'язано з великою температурою наплавлення та малою товщиною деталі. Як показали дослідження, введення глини зменшує температуру наплавлення і тим самим підвищує якість наплавленого шару металу.

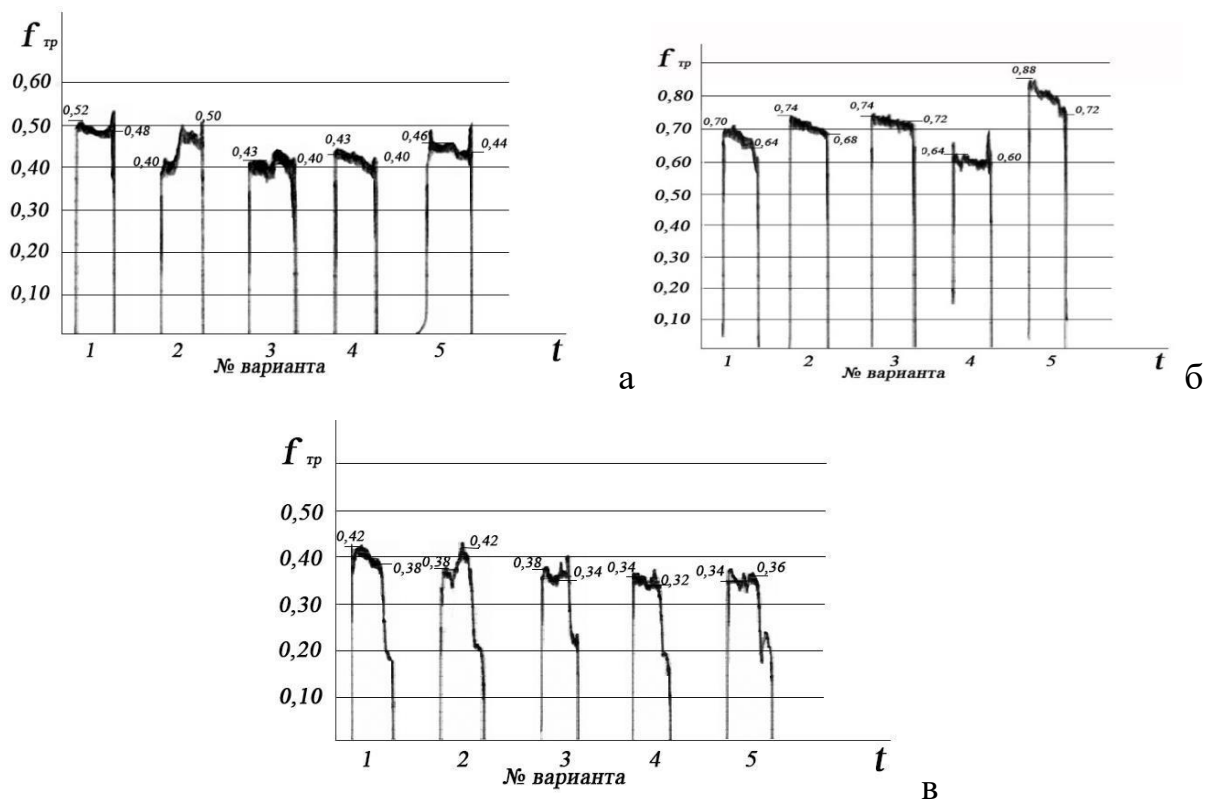


Рисунок 3.16 - Діаграми випробувань на зношування покриттів в режимі сухого тертя (а), з подачею кварцового піску фракції 0,25-0,40мм (б) і в гідроабразивному середовищі (в): 1 - вихідний матеріал культиваторної лапи сталь 65Г; 2 - наплавлення електродом Т-620 з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти; 3 -електрод Т-620 по шлікерному покритті не магнітної фрак-

ції детонаційної шихти; 4 - електрод Т-620; 5 - електрод Т-620 з додатковим введенням глини



Рисунок. 3.17– Тріщини на поверхні при наплавленні електродом

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз використання робочих органів культиваторів показав, що найбільшого розповсюдження здобули стрілчасті лапи. Однак, серійні стрілчасті лапи мають невисоку зносостійкість, тому дослідження методів зміцнень їх поверхонь має своє місце. Аналізуючи методи зміцнень культиваторних лап було звернено увагу, що більшість ефективних способів відновлення мають велику ціну, за рахунок великої вартості матеріалів, тому, задалися метою розробити ефективний та дешевий спосіб відновлення робочих органів культиваторів.

2. Для зміцнення лап вітчизняного виробництва запропоновано технологію нанесення дугоподібних валиків ручним дуговим наплавленням. Матеріал для зміцнення вибирався експериментальним способом дослідженням структури, хімічного складу, мікротвердості та абразивного зносу наплавлених поверхонь електродом Т-620 та електродом Т-620 з обмазкою глиною. В результаті досліджень було виявлено що, наплавлений шар електродом Т-620 утворює тріщини у структурі металу, а в свою чергу наплавлений шар електродом Т-620 з обмазкою глиною має якісний шар наплавленого металу, за рахунок зменшення температури плавлення металу. Результати досліджень на абразивний знос вказують, що зміцнені поверхні лап, мають менше значення, а ніж нові лапи. Величина зносу вихідного матеріалу становить 0,0145 г, величина зносу зміцненого зразка електродом Т-620 становить 0,0044 г, а величина зносу зразка зміцненого електродом Т-620 з обмазкою глиною

становить 0,0066 г. Для зміцнення культиваторних лап вибрано електрод Т-620 з обмазкою глиною.

3. В результаті експлуатаційних випробувань було визначено, що швидкість зношування леза і носка лап, зміцнених наплавленням електродом Т-620 з обмазкою глиною в 1,4 рази менше, ніж у нових лап, виготовлених зі сталі марки 65Г. Ціна зміцнення культиваторної лапи становить  $C_{п} = 58,09$  грн. Орієнтована розрахункова економічна ефективність впровадження розробленої технології ручного дугового наплавлення дугоподібними валиками електродом Т-620 з обмазкою глиною становить  $E_3 = 1560$  грн.

4. Виконаними дослідженнями показана можливість використання для модифікування природного продукту - глини і вторинної сировини - немагнітної фракції детонаційної шихти з алмазами від утилізації певного набору боєприпасів.

5. При введенні глини або шихти в покриття методом наплавлення, зносостійкість підвищується в 1,3 і 2 рази по відношенню до покриття, виконаному тільки електродом, а також по відношенню до вихідного матеріалу культиваторної лапи в 2 і 3 рази відповідно.

6. Для підвищення терміну служби культиваторних лап в експлуатації рекомендується їх відновлювати з нанесенням покриття наплавленням на електрод, що забезпечує зменшення тепловкладення в зношений шар культиваторної лапи, забезпечує формування мінімальної перехідної зони та термічного впливу, рівень виникаючих напружень.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткачов В.М. Знос та підвищення довговічності деталей сільськогосподарських машин / В.М. Ткачев. – М.: Машинобудування, 1971. – 264 с.
2. Бєлий А.В. Структура та методи формування зносостійких поверхневих шарів / О.В. Бєлий, Г.Д. Карпенка, К.М. Мишкін. - М.: Машинобудування, 1991. – 257 с.
3. Люляков І.В. Хіміко-енергетичне обґрунтування електролізного борювання сталевих деталей під час ремонту / І.В. Люляков// Вісник СДАУ. – 2007. – № 5. – С. 46-51.



4. Литовченко, Н.М. Електродугове зміцнення деталей нанесенням метало-керамічних покриттів / Н.М. Литовченко, В.М. Куликов // Машинно-технологічна станція. – 2011. - №4. – С. 50-51.
5. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило, Г.Ф. Бетенья, Л.А. Маринич и др. – Минск: БГАТУ, 2010. – 319 с.
6. Лузан С. А. СВС-процессы в технологиях упрочнения и восстановления деталей машин наплавкой и газотермическими способами напыления покрытий (обзор) / С.А. Лузан, А.И. Сидашенко, А.С. Лузан // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів – Харків, 2016. – № 6. – С. 152-162.
7. Бірюков В.П. Підвищення зносостійкості при лазерній обробці ґрунтообробних знарядь / В.П. Бірюков // Праці ГОСНІТІ. – 2011, Т.107. Ч. 2. - С. 105-106.
8. Балан В.П. Точкове зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин / В.П. Балан, В.М. Ключенко, В.І. Олісенко // Механізація та електрифікація сільського господарства. - 1991. - № 2. - С. 44-45.
9. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения. Справочник / Под ред. И.М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985, 745 с.
10. Дослідження технологічних можливостей карбовібродугового методу зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин / О.В. Коломейченко, Н.В. Тітов, Н.А. Кондрахін та ін. // Техніка та обладнання для села. - 2015. - №2. - С. 24-26.
11. Матеріалознавство: підручник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Х. : ХНАДУ, 2007. – 440 с.
12. Ожегов Н.М. Методи зниження зношує здатності ґрунту при терті деталей ґрунтообробних машин / Н.М. Ожегов, Д.А. Капошко, С.І. Будко// Известия СПГАУ. - 2009. - № 13. - С. 132-133.
13. Ожегов Н.М. Підвищення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин на основі вдосконалення наплавних технологій / Н.М. Ожегов, В.А. Руж'єв, Д.А. Капошко // Праці ГОСНІТІ. – 2015. – С. 191-197.
14. Evaluation of the wear of the duckfoot sweep cultivator blades and the technology of their hardening / T.S. Skoblo, I.M. Rybalko, O.V. Nanka, O.V. Saychuk //

Problems of Tribology – 2021. - V. 26, No 2/100. – P. 6-18. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-6-18>

15. . Практикум з ремонту машин / О.І. Сідашенко, Т.С. Скобло та ін.; За ред. О.І. Сідашенка та О.В. Тіхонова. – Х.: ХНТУСГ, 2007. – 415с.
16. Анализ способов изготовления, упрочнения и восстановления стрелчатых лап культиватора / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, А.Д. Мартыненко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харьков: ХНТУСХ, 2019. - №15. – С. 60-85.
17. Тітов Н. В. Метод вібродугового наплавлення металокераміки деталей техніки, що працює в умовах абразивного зносу / Н. В. Тітов, Н. Н. Литовченко, В. Н. Коротков // Праці ГОСНІТІ. –2013. – Т.111. Ч.2. – С. 219-222.
18. Литовченко Н. Н. Електровібродугове зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин металокерамічними матеріалами / Н.М. Литовченко, Н.В. Тітов, А.В. Коломейченко // Трактори та сільгоспмашини. – 2013. – №2 – С. 49-50.
19. Тітов Н.В. До питання застосування металокерамічних матеріалів для зміцнення лап культиваторів / Н.В. Тітов, А.В. Коломейченко, Н.М. Литовченко, В.В. Виноградов // Праці ГОСНІТІ. – 2013. – Т.113. – С. 364-367.
20. Афтандіянц Є.Г. Матеріалознавство: Підручник./ Є.Г. Афтандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько – К.: Вища освіта, 2012. –548 с.
21. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. / Под ред. акад. Б.Е. Патона. – М., Машиностроение, 1974. – 768 с.
22. Виноград М.И. Включения в стали и ее свойства. / М.И. Виноград. – М.: Металлургиздат, 1963. – 252 с.
23. Кислинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали. / Р. Кислинг, Н. Ланге. –М.: Металлургия, 1968. – 124 с.
24. Рибалко І.М. Використання глини в якості модифікатора при наплавленні сірого чавуну / О.В. Тіхонов, І.М. Рибалко, Н.В. Каплієнко // ІХ Міжнародної науково-технічної онлайн конференції «Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-

президента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (1906 - 1987) та 90-річчя кафедри надійності техніки НУБіП України – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2022. – С. 329-331.

25. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Захаров А.В. Застосування глини в ремонтному виробництві// Scientific research in the modern world. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2023. Pp. 237-247.

26. Патент України №130824 МПК (2018.01) А01В 23/00, А01В 35/00 Спосіб підвищення зносостійкості стрілкової лапи культиватора / Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Олейник О.К.; заявник та патентоутримувач Т.С. Скобло. u 2018 06896. заявл. 19.06.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл.№ 24.

27. Improving the wear resistance of hoe blades by modifying of restoration coatings / T.S. Skoblo, I.N. Rybalko, A.V. Tihonov, T.V. Maltsev // Problems of Tribology. – Khmelnytskyi: KNU, 2019. - 94 (4). – P. 27-32.

28. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап / І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, А.В. Захаров, О.О. Гончаренко// Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2022. – № 4(83). – С. 37-42.

29. Дослідження зношуючої здатності ґрунтів та її вплив на довговічність робочих органів ґрунтообробних машин / А.В. Захаров, І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, О.В. Сайчук // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання – Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13, том 1. – С. 106-117.

30. Застосування наноалмазів для підвищення якості відновленого шару наплавленням / І. Рибалко, О. Тіхонов, М. Полунін // Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем. Матеріали четвертої всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції. НУВГП, Рівне, 26-27 квітня 2023 р. С. 55-57.

31. Підвищення властивостей та експлуатаційної стійкості зміцнення та відновлення деталей модифікуванням із нано та дисперсними діамантами / І.М. Рибалко, С.П. Романюк, Л.В. Омельченко, О.В. Марков / Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii. 2023, т. 21, No 2. С. 363–378.

### **3.2. Вдосконалення технології відновлення деталей шляхом нанесення покриттів газополуменевим напилюванням з використанням механічної обробки**

Виконавець: доц., к.т.н., доц. Дерябкіна Є.С.

#### **ВСТУП**

Одним з перспективних способів відновлення є нанесення газополуменевих покриттів, до переваг якого слід віднести простоту та дешевизну устаткування, що застосовується, достатньо високу продуктивність процесу при відносно невеликій трудомісткості; незначне нагрівання деталей, яке не впливає на структуру матеріалу основи і не знижує втомну міцність деталей; низький рівень шуму і світлових випромінювань, що дозволяє працювати оператору без додаткових засобів захисту. На сьогоднішній день газополуменеве напилювання задовольняє запити багатьох ремонтних виробництв різного масштабу [1]. Однак якість цих покриттів не завжди задовольняє підвищені вимоги до експлуатаційних характеристик деталей машин, що працюють в умовах інтенсивних виробничих процесів, в першу чергу це визначається низькою міцністю зчеплення напилених покриттів з поверхнею деталі [2]. Тому встає необхідність пошуку нових прийомів, що забезпечать підвищення якості відновлювальних зміцнюючих покриттів.

Основним параметром, що визначає якість напиленого покриття, є міцність зчеплення з основою, що забезпечується на 90% адгезією і приблизно на 10% частковою дифузією. Адгезія покриттів до металу основи пов'язана із контактною активністю останніх. Прикріплення покриття, що напилюють, до основного матеріалу здійснюється, насамперед, за допомогою зв'язку від взаємної передачі валентних електронів, а також за допомогою локального дифузійного і металургійного зв'язку[3]. Для створення необхідного прикріплення покриття його частка повинна подолати певну енергію потенційного поля кристалічних ґрат (яку можна знизити шляхом механічної підготовки поверхні).

Підвищення міцності зчеплення досягається за рахунок збільшення площі взаємодії часток з основою і анкерного зачеплення розплавлених частинок з мікронерівностями поверхні деталі шляхом штучного формування шорсткості на поверхні основи. Підготовка поверхні перед напилюванням забезпечує її очищення і виводить

її зі стану термодинамічної рівноваги, звільняючи міжатомні зв'язки поверхневих атомів, тобто хімічно активує підкладку. Проте активність підкладки швидко знижується через хімічну адсорбцію газів і окислення, тому час між операціями підготовки поверхонь та нанесенням покриттів необхідно максимально скорочувати.

### 3.2.1. Постановка завдання досліджень

Найбільш ефективним і перспективним способом поверхневої обробки, що відноситься до механічних, є застосування обертових металевих щіток [4]. Підвищити якість покриттів можливо за рахунок очищення і активації поверхні деталей безпосередньо перед нанесенням покриття, забезпечення необхідної шорсткості голкофрезеруванням щітковим інструментом. Використання такої технології нанесення покриттів відкриває можливість отримання захисних покриттів з підвищеною міцністю зчеплення та зносостійкістю. Вирішення цього завдання на основі аналізу та дослідження основних закономірностей формування поверхні деталей під нанесення покриттів дозволить ефективно керувати якістю зміцнених деталей.

Разом з тим у наявних на сьогодні роботах відсутня науково-технічна інформація по вибору оптимальних режимів щіткової обробки підготовки поверхні під газополуменеве напилювання для практичного застосування і вплив пропонованої технології на міцність зчеплення покриття з основою, що робить завдання досліджень важливим і актуальним.

### 3.2.2. Активація поверхні металу обробкою щітковим інструментом

Активізації поверхні металу механічною обробкою металевими щітками підтверджується теоретичними дослідженнями про дислокаційні процеси при різанні металів. Авторами роботи [5] встановлено, що в енергетичному балансі процесу різання більше 90% приходить на пластичну деформацію матеріалу оброблюваної деталі. Тому прийнято вважати процес різання процесом превалюючого пластичного деформування з високою швидкістю ( $10^3$ - $10^6$  м·с<sup>-1</sup>) і великими тисками на поверхню металу, що обробляється (до 2ГПа), високою температурою, градієнтом напруг і деформацій [5]. Механізм деформаційного зміцнення і характер проті-

кання пластичної деформації впливають на точність, шорсткість та якість поверхневого шару основи. Дислокації починають рухатися під дією зовнішніх сил, першими рухаються дислокації системи ковзання, в яких дотичні напруги максимальні. Пластичний перебіг відбувається, коли дотичні напруги досягають критичної зсувної напруги, близької до межі плинності [6]. Найбільшої величини навантаження, що діють, досягається на поверхнях металевих деталей у місцях контакту з ріжучим інструментом. Тоді можна висунути припущення, що дислокації почнуть утворюватися з поверхневих джерел типу Франка - Ріда або Фішера, оскільки дислокації на поверхневих джерелах зароджуються набагато легше, ніж на джерелах, що розміщені в об'ємі матеріалу, що деформується .

Розподіл енергії пластичної деформації у зоні обробки ворсинками металеві щітки можна представити так:

$$Q = Q_n + Q_n, \quad (3.16)$$

де  $Q_n$  - енергія, що витрачається на пластичну деформацію поверхневого шару під обробленою поверхнею,  $Q_n$  - енергія, що витрачається на утворення та видалення наросту.

Енергія пластичної деформації поверхневого шару визначається по формулі:

$$Q_n = (U_c + U_d) \cdot S, \quad (3.17)$$

де  $U_c$  - прихована енергія деформування одиниці площі обробленої поверхні;  $U_d$  – енергія руху дислокацій, віднесена до одиниці площі обробленої поверхні;  $S$  – площа обробленої поверхні.

Прихована енергія деформації пов'язана з дислокаційним механізмом зародження дислокацій. З кожною дислокацією пов'язана енергія пружних спотворень, що відповідає роботі, витраченої на її утворення. В свою чергу енергія, що витрачається на утворення наросту, визначається по формулі:

$$Q_n = (\tilde{U}_c + \tilde{U}_d) \cdot \tilde{S}, \quad (3.18)$$

де  $\tilde{U}_c$  - прихована енергія деформування наросту, що утворюється, віднесена до одиниці площі обробленої поверхні;  $\tilde{U}_d$  – енергія руху дислокацій, віднесена до одиниці площі утвореного наросту;  $\tilde{S}$  - площа основи наросту.

Поточне значення прихованої енергії деформування у процесі обробки завжди перевищує її значення після припинення дії. Це пояснюється тим, що частина дислокацій і вакансій анігілює, а енергія дислокацій, що залишилися, може істотно зменшитися в результаті дисипації її при русі. Енергія, що звільняється, виділяється у вигляді тепла.

При пластичній деформації металу підвищується його температура, оскільки більшість роботи деформації перетворюється на тепло. Фізична природа нагріву при пластичній деформації пов'язана з розсіюванням пружної енергії коливань дислокаціями при їх русі в полі внутрішніх напруг, утворених іншими дислокаціями, а також різними перешкодами [6]. Рухаючись у металі, дислокація долає область високої внутрішньої напруги і потрапляє в область її мінімуму, вона може швидко коливатися, зміщуючись вперед і назад під дією зовнішніх і внутрішніх напруг. В результаті кінетична енергія дислокації, що коливається, буде розсіюватися в околиці площини ковзання, що призводить до збільшення амплітуди коливань решітки і відповідно до підвищення температури. Отже, енергія руху дислокацій повністю перетворюється на тепло. Частина енергії, що витрачається у процесі деформації на зародження нових дислокацій, внаслідок анігіляції при зіткненні дислокацій протилежних знаків та перерозподілу у стійкі конфігурації також виділяється у вигляді тепла. На основі вищенаведених теоретичних можна побудувати дислокаційно – енергетичну модель розподілу енергії, що передається металу у процесі обробки металевою щіткою (рис. 3.18).

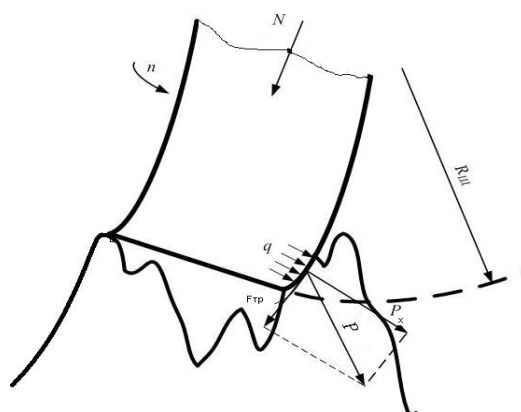
Таким чином, щіткова обробка виводить поверхню, що обробляється, зі стану термодинамічної рівноваги з середовищем, звільняючи міжатомні зв'язки поверхневих атомів, підвищує сумарну площу приварювання за рахунок створення необхідної шорсткості, що сприяє здійсненню контактних процесів, створенню наклепу. Процес мікрорізання здійснюється різальними інструментами – голками металевої щітки (рис.3.19).

Проведені теоретичні дослідження є обґрунтуванням застосування механічної обробки щітковим інструментом для активації поверхні металу замість традиційної абразиво - струменевої обробки, до того ж вартісні витрати на обладнання

на яку приблизно становлять  $\frac{1}{4}$  частина від витрат на обладнання для абразивно-струйної обробки [7]. Режимми щіткової обробки різко відрізняються від режимів абразивної обробки - швидкість обертання в 5-10 разів менша, зусилля притискання та різання більші.



Рисунок 3.18 - Схема дислокаційно-енергетичної моделі розподілу енергії, що передається металу в процесі обробки металевою щіткою.



$N$  – навантаження притискання голки;  $R_{щ}$  – радіус щітки;  $n$  – обороти обертання щітки;  $q$  - питоме навантаження, що передається голкою поверхні металу;  $F_{тр}$  - сила тертя голки о мікровиступ;  $P_x$  - напруга, що сколює.

Рисунок 3.19 - Схема і параметри процесу деформації поверхні металу.



### 3.2.3. Вплив щіткової обробки на шорсткість і міцність зчеплення газополуменевого покриття з основою

На підставі попередньо проведеної серії експериментів [8] визначено параметри щітки, що забезпечили необхідну шорсткість: діаметр щітки 150 мм, ширина робочої поверхні 26 мм, діаметр голок 0,8 мм, вільна довжина голок 40 мм, щільність набивання голок 32 шт/см<sup>2</sup>. Обробку поверхні проводили при натягу N - від 1 до 4 (з кроком 0,5) мм і швидкості обертання щітки n від 60 до 200 (з кроком 20) об/хв.

Такий вибір параметрів пояснюється тим, що за попередніми експериментами шорсткість поверхні основи та міцність зчеплення збільшуються зі збільшенням діаметра голок та швидкості обертання щітки діаметр голок менше 0,35 мм не забезпечує необхідний рівень шорсткості та міцність зчеплення покриття з основою зі сталі 45. Діаметр голок вибирається в залежності від необхідної шорсткості поверхні, причому встановлено, що щітки з меншим діаметром голок забезпечують меншу шорсткість поверхні, але є більш продуктивними. Рівень натягу N забезпечували горизонтальним переміщенням щітки 3 до зразку 7 за схемою зустрічної обробки щіткою. На рис. 3.20 представлені результати дослідження міцності зчеплення газополуменевого покриття від швидкості обертання щітки. Зі збільшенням швидкості обертання щітки (рис.3.20) міцність зчеплення збільшується, причому в інтервалі оборотів від 100 до 200 об/хв більш інтенсивно, а при оборотах 160-210 об/хв - досягає максимуму, після чого починає трохи знижуватися. Можливо припустити, що це пояснюється тим, що при оборотах більше 210 об/хв відбувається зализування шарів металу при загинанні голок [9,10].

В результаті апроксимації експериментальної залежності отримана поліномінальна функція (3.18):

$$y = - 4 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,0181x + 5,4298, \quad (3.18)$$

при коефіцієнті кореляції  $R^2=0,9792$ .

Отримана залежність (3.18) може бути рівнянням прогнозування міцності зчеплення напиленого покриття з основою в залежності від швидкості обертання щітки.

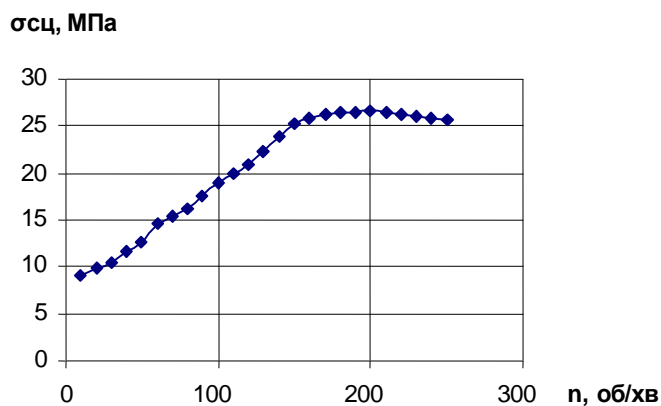


Рисунок 2.20 - Залежність міцності зчеплення газополуменевого покриття ПГ-10Н-01 з основою сталі 45 від швидкості обертання щітки.

У свою чергу шорсткість поверхні, що напилюється, також залежить від швидкості обертання щітки. Технологічні можливості процесу щіткової обробки дозволили отримати необхідну шорсткість поверхні  $Ra=9-12$  при швидкості обертання щітки 100-200 об/хв (лінійна швидкість 47-94 м/хв), час підготовки поверхні деталі становить 5-6 хв (згідно з даними експерименту). Результати експериментальних досліджень подано на рис. 3.21.

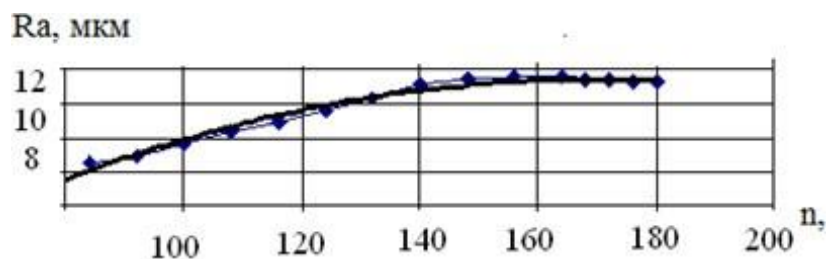


Рисунок 3.21 - Залежність шорсткості поверхні від швидкості обертання щітки.

З аналізу експериментальної кривої (рис.3.21) видно, що зі збільшенням числа оборотів шорсткість оброблюваної поверхні збільшується аж до насичення при оборотах 150+10 об/хв і потім дещо знижується, що можна пояснити зменшенням глибини проникнення голок в поверхню, що обробляється. Апроксимуючи експериментальну криву, отримуємо рівняння 2-го ступеня:

$$y = -1 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0,0051x + 1,6059, \quad (3.19)$$

при коефіцієнті кореляції  $R^2 = 0,9791$ .

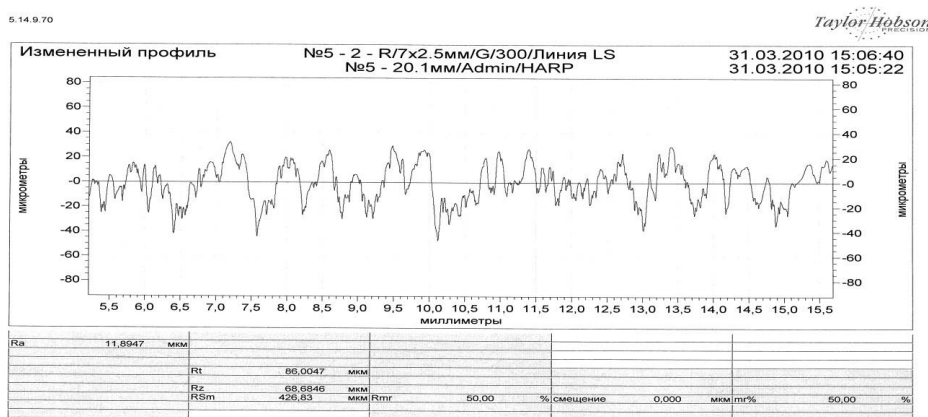
Враховуючи характер апроксимуючих кривих (рис. 3.22), які є поліноміальними функціями 2-го ступеня, що мають максимальні значення, були проведені дослідження, спрямовані на оптимізацію основних параметрів щіткової обробки поверхні під напилення. Для оцінки мікротопографії поверхні і визначення оптимальних параметрів щіткової обробки для отримання регламентованої шорсткості поверхні проводилися на основі порівняльних досліджень по двох межевим режимам (табл. 3.17) [11].

Таблиця 3.17 - Режими щіткової обробки для отримання шорсткості поверхні

Режим	$d_n, \text{мм}$	$N, \text{мм}$	$R, \text{мм}$	$L_n, \text{м}$ м	$n_{щ},$ об/хв	$P,$ шт/см <sup>2</sup>	$V_{под},$ м/с
"М'який"	0,35	0,5	150	60	60	20	1
"Жорсткий"	0,8	3,00	150	30	150	40	1

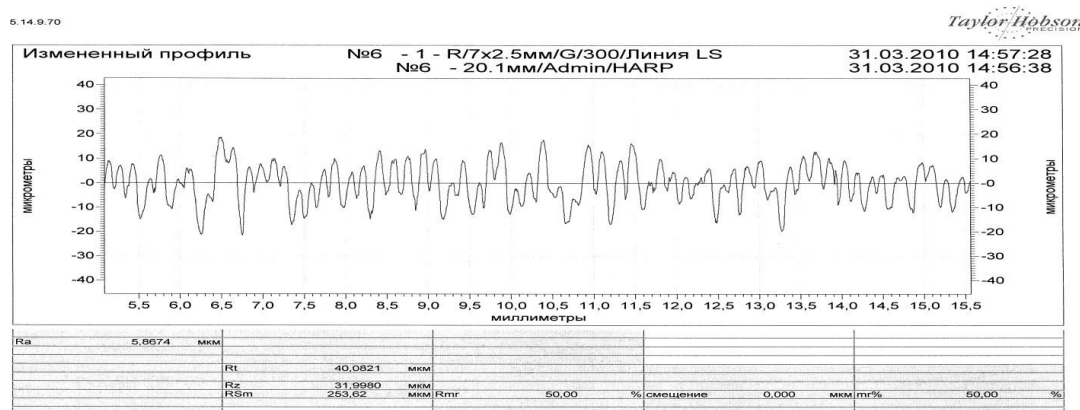
Обробка за «м'якому» режимом забезпечила отримання шорсткості з мінімальним рівнем, обробка за «жорстким» режимом – максимальну шорсткість (рис. 3.22, 3.23).

Оцінку шорсткості поверхні оцінювали наступними параметрами  $R_a, R_t, R_{S_m}, R_z, R_{mr}$  (згідно ISO 9000-1997). Параметри визначалися на профілографі - профілометрі "Taylor/Hobson. Вимірювання проводили по поверхні відносної опорної довжини ( $L$ ) – 20 мм, базова довжина – 0,8 мм. При застосуванні «жорсткою» обробки відмічено збільшення висотних параметрів  $R_a, R_t, R_z$ , а похилі параметри  $Q_a$  - середнє арифметичне значення кута нахилу профілю і  $Q_q$  - середнє квадратичне значення кута нахилу профілю залишаються незмінними. Значення  $S_m$  вказують на те, що при постійних  $Q_a, Q_q$  нерівності стають більшими і протяжнішими, спостерігається фіксація ефекту відтискання матеріалу під час жорсткої обробки. Цей ефект характеризується зростанням параметрів  $R_a, R_t, R_z$  у зоні контакту у напрямку руху щітки. Результати даного дослідження можна використовувати для розробки технології отримання регламентованої мікротопографії поверхні деталей.



Висотні параметри:  $R_a = 11,89$ ;  $R_z = 68,7$ ;  $R_t = 86,0$ мкм; крокові параметри:  $S_m = 426,83$ мкм; змішані:  $R_{mr} = 50\%$ .

Рисунок 3.22 - Профілографа обробленої поверхні при "жорсткій" обробці щітковим інструментом.



Висотні параметри, мкм:  $R_a = 5,9$ ;  $R_z = 31,0$ ;  $R_t = 40,1$ ; крокові, мкм:  $S_m = 253,6$ ; змішані:  $R_{mr} = 50\%$ .

Рисунок 3.23 - Профілограма обробленої поверхні при "м'якій" обробці щітковим інструментом.

Встановлено, що збільшення  $d_i$  (при  $l_i = \text{const}$ ) призводить до зростання шорсткості поверхні, що обробляється, проте зі збільшенням натягу шорсткість поверхонь, оброблених інструментами з різним діаметром голок, зменшується (рис. 3.24). Це пояснюється зростанням пластичних деформацій. Вибір вільної довжини голок впливає вибір натягу. Зі збільшенням натягу при збільшенні довжини голок знижується ефективність обробки поверхні, так як призводить до зростання напруг

вигину в голках.

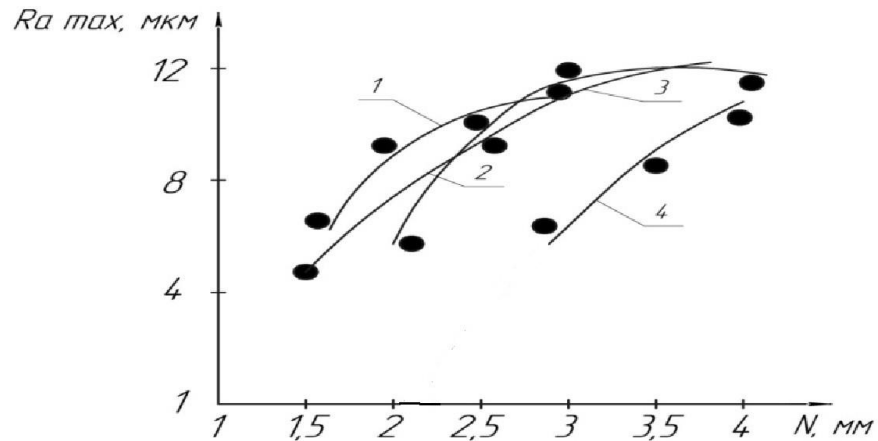


Рисунок 3.24 - Вплив натягу на висоту мікронерівностей  $Ra$  при різних  $d_i$  і  $l_i$  голок ( $n=150$  об/мин,  $S=1$  мм): 1-  $d_i=0,5$  мм;  $l_i=20$  мм;  $p=20$  шт/см<sup>2</sup>; 2-  $d_i=0,5$  мм;  $l_i=40$  мм;  $p=20$  шт/см<sup>2</sup>; 3-  $d_i=0,8$  мм;  $l_i=40$  мм;  $p=30$  шт/см<sup>2</sup>; 4 -  $d_i=0,8$  мм;  $l_i=60$  мм;  $p=30$  шт/см<sup>2</sup>.

Поряд з цим, при рівних натягах (рис. 3.24, криві 1 і 2) щітка з більшою довжиною голок забезпечує отримання меншої шорсткості поверхні, що пояснюється збільшенням мікровигладжуванням в загальному процесі різання та зменшенням глибини проникнення в результаті зростання величини притискання голок. Мінімум шорсткості спостерігається при  $n=200$  об/хв. Зазначений характер залежності  $Ra=f(n)$  пояснюється тим, що зі зростанням швидкості обробки, внаслідок віджимання голок зменшується впровадження в оброблювану поверхню. Це призводить до зниження шорсткості, а подальше незначне зростання шорсткості, що пояснюється збільшенням пластичних деформацій на окремих ділянках металевої основи. Зі збільшенням щільності розташування голок шорсткість спочатку зростає, а потім трохи знижується.

Можна пояснити це тим, що зі збільшенням натягу зменшується кількість голок, які контактують з одиницею площі. Зі збільшенням натягу шорсткість поверхні зростає внаслідок збільшення глибини проникнення голок. Збільшення натягу понад оптимальні значення призводить до зменшення глибини проникнення голок. Аналіз отриманих профілограм показав, що максимальна величина -  $Rz=48$  мкм отримана при швидкості обертання щітки 160 об/хв, а мінімальна величина  $Rz=23,4$

мкм отримана при швидкості обертання щітки 220 об/хв. Враховуючи те, що характер мікрорельєфу, отриманий щітковою обробкою, залишається тим самим при зміні параметрів процесу, можна вважати, що якісно картина формування шорсткості поверхні відображена правильно.

На рис. 3.25 представлена залежність міцності зчеплення напиленого покриття від шорсткості поверхні основи, причому зі збільшенням шорсткості поверхні, міцність зчеплення покриття з основою збільшується, так як збільшується площа взаємодії і росте механічна взаємодія матеріалів покриття і основи. Можна припустити, що максимальна міцність зчеплення обмежується величиною когезійної міцності покриття.

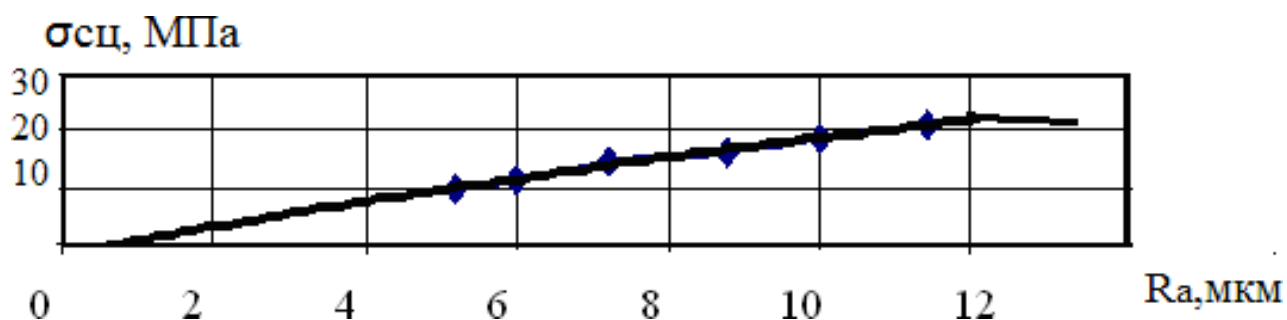


Рисунок 3.25 - Залежність міцності зчеплення напиленого покриття з основою від шорсткості.

Уравнение аппроксимирующей кривой:

$$y = -0,1447x^2 + 4,8219x - 1,5813, \quad (3.20)$$

при коефіцієнті кореляції  $R^2 = 0,9953$ .

Порівняння значень адгезії покриттів, нанесених газополумєневим напилюванням на поверхні, що підготовлені абразивоструйним методом (17-20 МПа) і щітковою обробкою (26-28 МПа), доказує переваги використання механічної обробки щітковим інструментом для попередньої підготовки поверхні під напилювання з отриманням регламентованої шорсткості поверхні. Цей метод може знайти широке застосування не тільки на великих підприємствах так і на ремонтних польових базах в сільськогосподарському машинобудуванні.

## ВИСНОВКИ

1. На основі порівняльного аналізу для відновлення та зміцнення поверхонь деталей вибрано газополуменеве напилювання, як найменш вартісне і найпростіше для реалізації в умовах різних виробництв.

2. З метою підвищення міцності зчеплення покриття з основою для попередньої обробки поверхні під напилювання вибрана механічна обробка щітковим інструментом, як найбільш технологічний спосіб. Щіткова обробка забезпечує попереднє очищення поверхні, її активацію і створення необхідної шорсткості, зробити процес обробки більш керованим.

3. Обґрунтовано, що активація поверхні металу щітковою обробкою підтверджується дислокаційними уявленнями про різання металів. Розроблено модель розподілу енергії, що передається металу у процесі обробки поверхні металеву щіткою, що дозволило скласти енергетичний баланс пластичної деформації у зоні обробки.

4. Застосування щіткової обробки для попередньої підготовки поверхні основи дозволило отримати регламентовану шорсткість у межах  $Ra=9-12\mu\text{m}$  (при абразивоструйній  $8-9\mu\text{m}$ ). Обґрунтовано методику дослідження мікротопографії поверхні. Визначено оптимальні значення параметрів щіткової обробки (швидкість обертання щітки 160 об/хв; діаметр 0,8мм та довжина голок 40мм при щільності розташування голок -  $32 \text{ шт/см}^2$ ). Встановлено, що застосування щіткової обробки при газополуменевому напилюванні дозволяє в середньому на 22% збільшити міцність зчеплення.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черновол М.И. Повышение качества восстановления деталей машин / М.И. Черновол, С.Е. Поединок, Н.Е. Степанов.- Киев.: Техніка, 1989.-168с.
2. Какуевицкий В.А. Применение газотермических покрытий при изготовлении и ремонте машин / В.А. Кукуевский. - Киев: Техника, 1989. - 174 с.
3. Петров С.В. Повышение качества плазменных покрытий / С.В. Петров // Сварочное производство. – 2005.- №5. - с.48-53.

4. Полянский А.С. Обоснование возможности подготовки поверхности металлическими щетками для газотермического напыления покрытий / А.С. Полянский, С.А. Лузан С.А., Е.С. Дерябкина // Праці / Таврійський державний агротехнологічний університет.- Вип.11.Т.1.- Мелітополь: ТДАТУ,2011.- с.34-42.
5. Грицай І. Є., Кукляк М. Л. Різання металів. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. 132 с.
6. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазур— 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.

Опубліковано за темою.

7. Дерябкина Є.С. Дослідження роботи і підвищення несучої здатності монорельсового шляху при змінному навантаженні / Є.С., Дерябкина, М.К. Резніченко, О.М.Резніченко //«Наука і техніка сьогодні» (Серія «Техніка»). Вип. № 9(9), Київ.- 2022.- с. 72-82 DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-9\(9\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-9(9)).
8. Дерябкина Є. С., Потапенко С. І., Іванілов Є. К., Метод оцінки якості відновного покриття // Міжнародна науково-технічна конференція нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні. - Одеса, 2022. – С. 201-202.
9. Дерябкина Є.С. Голкофрезерування як спосіб підготовки поверхні під нанесення покриттів / Дерябкина Є.С., Нефьодов А.О. Матеріали ХІХ міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті", ДБТУ, Харків.,2023р.- С.133.
10. Дерябкина Є.С. Аналіз експлуатаційної стійкості відновлених плунжерних пар паливної апаратури тракторних та комбайнових дизелів /Є.С.Дерябкина, С.І. Потапенко // Міжнародна науково- практична конференція «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв». ДБТУ, Харків, 2022.- С.328-330.
11. Дерябкина Є.С. Аналіз впливу механічної обробки на залишкові напруження у газотермічних відновлюючих покриттях // Всеукраїнська науково-практична конференція «Технічний прогрес в АПВ» , ДБТУ, м. Харків, 2023р.- С.267-268.
12. Дослідження шорсткості поверхні деталей при нанесенні корозійностійких покриттів / Є.С.Дерябкина, Н.О. Збіняков// Матеріали міжн. наук.-практ. конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» ДБТУ, м. Харків, 2023р.- С.467-468.



### 3.3. Підвищення довговічності довгомірних деталей шляхом нанесення покриттів методом електроіскрової обробки

Виконавець: доц., к.т.н., доц. Мартиненко О.Д.

#### ВСТУП

*Мета роботи* - вибір ефективних матеріалів для відновлення зношеної поверхні довгомірних деталей машин і агрегатів та розробка параметрів нанесення покриття методом електроіскрової обробки, що забезпечать підвищення його якості та споживчих властивостей.

*Об'єкт дослідження*: нанесення відновлювальних покриттів та зміцнення зношених деталей, виготовлених з різних матеріалів нів.

*Предмет дослідження*: підвищення довговічності довгомірних деталей шляхом нанесення покриттів методом електроіскрової обробки

#### 3.3.1. Матеріали і методи досліджень

під час проведення досліджень та вирішення поставлених задач необхідно дослідити вплив хімічного складу матеріалу електрода (анода) на властивості та якість деталі (катода) при нанесенні покриттів методом електроіскрової обробки.

При вирішенні окремих завдань використовувався комплекс обчислювальних методів теорії надійності, статистичний аналіз, сучасні методи інженерного аналізу і використані пакети програм «SolidWorks», та ін. Застосування існуючих і розроблених експериментальних методик.

Найбільш доступним, з точки зору обладнання і вартості обробки, є електроіскровий метод, який дозволяє проводити нарощування зношеного шару деталі та не вимагає особливого екологічного захисту. Цей метод найбільш ефективний для довгомірних деталей (відношення довжини до їх діаметра  $l/d \geq 5$ ) – штоків турбін та гідроциліндрів сільськогосподарської техніки, оскільки не призводить до їх короблення при обробці і при цьому повністю зберігає якість металу серцевини, що пройшла попередню термічну обробку.

### 3.3.2. Результати дослідження

Для досліджень структури, суцільності покриття, твердості, міцності зчеплення, жаро- та зносостійкості використовували оптичну та електронну мікроскопію, рентгеноструктурний і спектральний аналізи, а також обладнання для оцінки механічних та спеціальних властивостей. Використані методи досліджень в процесі проведення ЕЮ дозволили оцінити характер розподілу хімічних елементів по глибині шару та його периметру, шорсткість поверхні, її стан, суцільність і властивості покриття. 7 Проводили нанесення покриттів методом ЕЮ на деталі машин і обладнання, виготовлених з різних матеріалів (табл. 3.18). Як модельні для вивчення перенесення електродного матеріалу процесів при нанесенні покриттів методом ЕЮ використовували сталь 45 та Ст3, в яких відсутні легувальні елементи.

Таблиця 3.18 - Вміст хімічних елементів у досліджуваних сплавах

№ з/п	Матеріал	Хімічний склад, %								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	B
1.	Сталь 45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,50-0,80	до 0,25	до 0,25				
2.	Сталь 40X	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	до 0,3				
3.	Сталь 45X	0,41-0,49	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	до 0,3				
4.	Заевтектійна сталь ШХ15	0,95-1,05	0,15-0,35	0,20-0,40	1,30-1,65	до 0,3	-	-	-	-
5.	Чавун (сірий)	3,5-3,7	2,0-3,0	0,5-0,7	-	-	-	-	-	-
6.	Чавун (легований)	2,8-3,2	0,9-1,2	0,8-1,0	1,0-2,0	0,8-1,5	0,1-0,5	-	-	-
7.	Сталь 20X1M1Ф1TP	0,17-0,34	0,31-0,35	0,41-0,50	0,9-1,4	0,45-0,50	0,8-1,1	0,7-1,0	0,005-0,12	≤ 0,005

В дослідженнях використано метод емісійного спектрального аналізу для вивчення і контролю процесу ЕЮ. В експерименті оцінювали порівняльну кількість кожного елемента, що надходить в зону розряду, по почорнінням спектральних ліній. Кінетику зміни елементного складу в залежності від часу процесу і кількості проходів вивчали фотографуванням спектрів, які утворюються при розряді між електродом і поверхнею деталі, через рівні проміжки часу (1-2хв). Критерієм оцінки ефективності метода ЕЮ деталей були товщина, суцільність нанесеного шару і його якість, яку оцінювали по: твердості поверхневого шару; характеру структури, що сформувалася при нанесенні покриття; міцністю зчеплення покриття з основою і результатам випробувань на зносостійкість, жаростійкість, корозійну

стійкість. Міцність зчеплення нанесеного шару з основою, у випадку якщо вона після ЕІО за три проходи не перевищувала 1мм, оцінювали за методикою Гуляєва – Гудцова. При величині покриття більш ніж 2мм - по загальноприйнятій методиці.

До основних показників, які визначають якість покриття, відносяться: його товщина, яка залежить від числа дотиків; середня висота мікронерівностей та параметри одиначної лунки; коефіцієнт суцільності покриття; наявність дефектів (пори, раковини, тріщини тощо) та їх кількість на  $1\text{см}^2$ ; рівень мікротвердості, міцність зчеплення. Характеристикою процесу формування покриття є питомий приріст маси деталі  $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$  (катоду). Технологічні параметри, які впливають на цей показник, це: енергія імпульсу; кількість проходів електродом; час обробки та частота слідування імпульсів. Збільшення енергії імпульсів приводить до зростання товщини покриття, висоти мікронерівностей, його суцільності при незначному зниженні твердості цього шару.

Співвідношення числа дотиків  $P_{од}$  і технологічних параметрів при нарощуванні покриття на деталі типу тіл обертання оцінювали за залежністю:

$$P_{од} = \frac{100 * Z * n_i}{\pi * D * n_d * S} \quad (3.21)$$

де  $Z$  - число електродотримачів в інструменті для обробки, одиниць;

$n_i$  - швидкість обертання інструменту,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$D$  - діаметр деталі, що оброблюється, мм;

$n_d$  - швидкість обертання деталі,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$S$  - подача, мм/об.

Продуктивність процесу обробки (площа обробленої поверхні за одиницю часу при одному проході електродом)  $N$  визначали за залежністю 3.22:

$$N = \frac{50d^2}{k * k_1} \quad (3.22)$$

де  $d$  – діаметр одиначної лунки, мм;

$k$  – коефіцієнт суцільності покриття по перерізу деталі;

$k_1$  - – коефіцієнт суцільності покриття по довжині деталі.

Коефіцієнт суцільності покриття оцінювали за залежністю 3.23:

$$k = 1 - \left( 1 - \frac{S_0}{100} \right)^n \quad (3.23)$$

де  $S_0$  - суцільність покриття за один прохід електродом, визначали теоретично, виходячи з кінематичних параметрів обладнання,  $S_0=0,55(55\%)$ ;

$n$  - число проходів електродом.

Виходячи з площі обробки, визначали необхідну кількість електродів:

$$z = \frac{S_{обр}}{P * t_{обр}} \quad (3.24)$$

де  $S_{обр}$  - площа деталі, що обробляється,  $см^2$  ;

$t_{обр}$  - заданий час обробки  $1см^2$ , хв.

Виходячи з цього – суцільність покриття при двох проходах електродом складає 0,8 (тобто 80%), після трьох – 91%, після чотирьох – 96%. Починаючи з трьох проходів забезпечується достатньо висока продуктивність процесу відновлення. Товщина електродів та крок обробки також впливають на суцільність покриття. При визначенні електричних параметрів виходили з того, що діаметр одиничної лунки залежить від величини струму іскрового розряду (табл. 3.19).

Таблиця 3.19 - Вплив струму іскрового розряду на діаметр одиничної лунки

Струм іскрового розряду, А	15	50	80
Діаметр одиничної лунки, мм	0,3	1,0	1,4

До стану поверхні деталей, що підлягають відновленню методом ЕЮ, розроблено технічні вимоги їх підготовки. В залежності від величини зносу деталі - 0,05-0,40мм - вихідна висота мікронерівностей поверхні, яка підлягає відновленню, повинна бути не вище 25-160мкм відповідно. Знос не повинен перевищувати максимальну товщину шару. При цьому забезпечується оптимальна шорсткість після обробки, яка дорівнює 0,63мкм. Поверхня деталей, що підлягає обробці, не повинна мати забруднень, іржі, тощо.

Найбільш дешевим і доступним матеріалом для підвищення зносостійкості є хром та електродні матеріали на основі хрому, тому він і був вибраний, як легува-

льний елемент. Випробування на зношування показали, що зносостійкість підвищується зі збільшенням кількості вуглецю в матеріалі анода. Однак в цих сплавах концентрація вуглецю не повинна бути вище ніж 2,5%, тому що виділяється значна кількість карбідної фази, що підвищує схильність до графітизації і веде до неоднорідного зношування та викришування.

При відновленні деталей з чавуну важливим фактором є графітизація. Лабораторним моделюванням показано, що введення хрому в високовуглецевий сплав знижує (в 1,1-2,0рази) схильність до графітизації навіть при роботі в умовах високих температур і пластичної деформації. Наявність в покритті інших карбідоутворюючих елементів не так значна.

На якість покриття впливає і енергія імпульсу, найбільш якісний хоча і найменший за величиною шар при ЕІО формується при обробці з більш низькою енергією імпульсу. При цьому більша суцільність покриття досягається меншим діаметром одиничної лунки, а більша густина нанесеного шару – зменшенням його пористості. На товщину покриття як було показано вище, впливають такі фактори, як  $E_i$ ,  $n$  та хімічний склад матеріалу анода. Дослідженнями впливу хімічного складу сплаву анода і параметрів обробки отримана математична залежність, яка дозволила оцінити доважок катоду:

$$Y=0,84-0,38X_1-0,18X_2+0,83X_3+0,73X_4-0,48X_1X_3-0,33X_2X_3+0,32X_4X_3-0,12X_1X_4-0,12X_2X_4+0,62X_1X_2X_3+0,52X_1X_2X_4-0,48X_1X_3X_4-0,28X_2X_3X_4+0,28X_1X_2X_3X_4 \quad (3.25)$$

Максимальний приріст додатку катода досягається при впливі кожного фактору в окремоті: енергія імпульсу –  $E_i=3,4$ Дж ( $X_3$ ); число проходів електродом –  $n=6$  ( $X_4$ ); концентрація хрому – 10% ( $X_2$ ) і вуглецю – 0,5% ( $X_1$ ). Вміст вуглецю і хрому в аноді спільно не справляють впливу на доважок катода, однак їхня роль виявляється в поєднанні з технологічними факторами.

В залежності від кількості С і Сг в аноді структура нанесеного шару може бути феритною (для матеріалу анода сталь 20Х1М1Ф1ТР), аустенітною (сталь 10Х13, 30Х13) з включенням карбідних фаз, а також мартенситною (ШХ15) завдяки високим швидкостям охолодження при кристалізації. Характер структури

буде визначати твердість та інші характеристики нанесеного покриття. В роботі встановлено, що значний вплив на твердість нанесеного покриття має явище насичення його азотом (до 0,11%), який надходить з повітря міжелектродного зазору. Це забезпечує досягнення твердості Н-50-550-570 навіть в шарі з феритною структурою. Зміна концентрації основних елементів по периметру нанесеного покриття залежить від матеріалу використаного електрода.

Для анода, який містить у собі хром, розкид концентрації основних компонентів в поверхневому шарі не перевищує 5%. Для матеріалів анода, які містять карбіди елементів (сплав Т15К6), розкид досить значний (досягає 28%). Тому використання таких електродів вважається небажаним, незважаючи на високу твердість покриття. Якість нанесеного шару покриття обумовлюється не тільки його товщиною. Як встановлено методами емісійного спектрального і рентгенівського фазового аналізу, при використанні для обробки числа проходів електрода менше трьох в нарощеному шарі формується дисперсна структура на базі хімічних елементів, які входять до катода і анода завдяки перемішуванню металу.

При збільшенні числа проходів хімічні елементи катода в шарі будуть відсутні. З другого боку при підвищенні  $n$  збільшується частка оксидних і відособлених карбідних включень та мікропор, що погіршує якість покриття. Крім того, збільшення  $n$  викликає нагрів металу на більшу глибину, що призводить до знеміцнення перехідної зони. Таким чином, оптимальним слід вважати  $n=3-4$ .

## ВИСНОВКИ

Встановлені кількісні параметри масопереносу при ЕІО в залежності від матеріалу анода та режимів обробки та досліджені фізичні процеси, що обумовлюють формування структури покриття та його якість; - на основі комплексних досліджень різних матеріалів анода встановлено, що найбільш ефективними для забезпечення довговічності відновлених деталей є матеріали леговані хромом (10Х13, 30Х13, ферохром), які забезпечують високе зчеплення нанесеного шару з основою, однорідність властивостей по перерізу та периметру покриття; - встановлено взає-

мозв'язок між хімічним складом матеріалу анода, параметрами обробки і кінетикою формування покриття, його товщиною, коефіцієнтом суцільності і шорсткістю. Перспективи подальшого використання отриманих результатів, або подальшого розвитку – планується впровадження отриманих результатів дослідження в навчальний процес ДБТУ та у виробництво, а також розробка інноваційної технології відновлення деталей сільськогосподарської техніки методом електроіскрової обробки.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- наукових публікацій у матеріалах наукових конференцій;

1. Мартиненко О. Д. Відновлення валу ротора турбокомпресора методом електроіскрового нанесення покриттів. Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 24-25 лютого 2022 р., м. Київ. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2022. С. 87-90.

2. ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ПРОХОДІВ ЕЛЕКТРОДІНСТРУМЕНТОМ ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБЦІ НА ЯКІСТЬ НАНЕСЕНОГО ПОКРИТТЯ / О.Д. МАРТИНЕНКО, С.В. ЛИСЕНКО, Є.СІРЕНКО, О.СІРЕНКО, / ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (1906-1987), «КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ» 23-24 лютого 2023 року м. Київ», К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023 с.111-112.

3. Сіренко О. В., Сіренко Є. В., Тимошенко М. Л. Вплив кількості проходів електродом на глибину зони термічного впливу при електроіскровій обробці. Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХІХ Міжнар. форуму молоді, 6-7 квіт. 2023 р.; наук. кер. канд.техн. наук, доцент Мартиненко О. Д., Харків: ДБТУ,

2023. С. 142

4. Сіренко О. В., Сіренко Є. В., Жорник Є. М. Використання лазерних технологій для зміцнення та відновлення гільз циліндрів. Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XIX Міжнар. форуму молоді, 6-7 квіт. 2023 р.; наук. кер. канд.техн. наук, доцент Мартиненко О. Д., Харків: ДБТУ, 2023. С. 143.

5. Автухов А. К., Рибалко І. М., Мартиненко О. Д., Тіхонов О. В., Лисенко С. В. Зміцнення та відновлення гільз циліндрів з використанням енергії лазера. Технічний прогрес в АПВ: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 9-10 травня 2023 р. Харків: ДБТУ, 2023. С. 277-279.

6. Непочатов С. В., Дегтярьов В. М., Мартиненко В. О. Вивчення впливу енергії імпульсу на формування шару нанесеного при електроіскровій обробці. Матеріали I Всеукраїнської інтернет-конференції "Сучасна інженерія та нові матеріали в машинобудуванні" 10-11 лютого 2022 року; наук. кер. Мартиненко О. Д. Харків: ДБТУ, 2022. С. 44-46.

7. Непочатов С. В., Долбіна Г. О., Мартиненко В. О. Відновлення роторів турбокомпресорів, переваги і недоліки методів. Матеріали I Всеукраїнської інтернет-конференції "Сучасна інженерія та нові матеріали в машинобудуванні" 10-11 лютого 2022 року; наук. кер. Мартиненко О. Д. Харків: ДБТУ, 2022. С. 40-44.

8. Непочатов С. В., Долбіна Г. О., Мартиненко В. О. Причини несправної роботи турбін. Матеріали I Всеукраїнської інтернет-конференції "Сучасна інженерія та нові матеріали в машинобудуванні" 10-11 лютого 2022 року; наук. кер. Мартиненко О. Д. Харків: ДБТУ, 2022. С. 37-40.

9. Мартиненко О. Д., Іллюшин В., Дегтярьов В. Підвищення надійності та зносостійкості робочих органів сільськогосподарської техніки лазерним термозміцненням. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв»; Харків: ДБТУ, 2022. С. 330-332.

10. Дегтярьов В. М., Долбіна Г. О., Непочатов С. В. Оцінка економічної ефективності відновлення валу ротора турбокомпресорів. Матеріали I Всеукраїнської інтернет-конференції "Сучасна інженерія та нові матеріали в машинобудуванні" 10-11 лютого 2022 року; наук. кер. Мартиненко О. Д. Харків: ДБТУ, 2022.



С. 21-23.

11. Тимошенко М. Л., Новіков Р. В., Бурзак Д. Є. Зміцнення гільз циліндрів лазерною обробкою. Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХІХ Міжнар. форуму молоді, 6-7 квіт. 2023 р.; наук. кер. канд.техн. наук, доцент Мартиненко О. Д., Харків: ДБТУ, 2023. С. 147

12. Тимошенко М. Л., Новіков Р. В. Методи відновлення гільз циліндрів ДВЗ. Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХІХ Міжнар. форуму молоді, 6-7 квіт. 2023 р.; наук. кер. канд.техн. наук, доцент Мартиненко О. Д., Харків: ДБТУ, 2023. С. 149

13. Новіков Р. В., Тимошенко М. Л., Бурзак Д. Є. Дослідження зміни мікротвердості покриттів нанесених методом ЕІО. Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХІХ Міжнар. форуму молоді, 6-7 квіт. 2023 р.; наук. кер. канд.техн. наук, доцент Мартиненко О. Д., Харків: ДБТУ, 2023. С. 135

14. Тимошенко М. Л., Бурзак Д. Є. Способи захисту обладнання від корозії. Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХІХ Міжнар. форуму молоді, 6-7 квіт. 2023 р.; наук. кер. канд.техн. наук, доцент Мартиненко О. Д., Харків: ДБТУ, 2023. С. 148

15. ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДИСКОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ЛАЗЕРНИМ ТЕРМОЗМІЦНЕННЯМ / О.Д. МАРТИНЕНКО, А.К. АВТУХОВ; С.В. ЛИСЕНКО; М.Л. ТИМОШЕНКО, Р.В. НОВІКОВ. / ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ Х Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (1906-1987) «КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ 23-24 лютого 2023 року м. Київ», К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023 с.111. с.24-26.

Участь у наукових конференціях за темою НДР – результати виконаної НДР було оприлюднено на наступних наукових конференціях:

16. Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» ДБТУ, 24 – 25 листопада, Харків – 2022.

17. Міжнародному форумі молоді. «Молодь і сільськогосподарська техніка

в ХХІ столітті» ХНТУСГ. 2022.

18. I Всеукраїнській інтернет - конференції «Сервісна інженерія та нові матеріали в машинобудуванні», ДБТУ, 10-11 лютого 2022, Харків.

19. Всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ» 9–10 травня 2023 року Харків.

20. X Міжнародній науково-технічній конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (1906-1987) «КРАМАРОВСЬКІ ЧИТАННЯ» 23-24 лютого 2023 року м. Київ.

21. XIX Міжнародному форумі молоді- «Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті»: 6-7 квіт. 2023р. Харків, ДБТУ