

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ СІЛЬСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Рибалко Іван Миколайович

УДК 621.791.92:621.89

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ, ТЕОРЕТИЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
ЗМІЦНЕННЯ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКУЮЧИХ
ДОМІШОК**

05.02.01 – Матеріалознавство
(13 – Механічна інженерія)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Рибалко І.М.

Науковий консультант Скобло Тамара Семенівна, доктор технічних наук, професор,
Лауреат Державної премії України

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Рибалко І.М. Експериментальні, теоретичні і технологічні основи зміцнення виробів з використанням модифікуючих домішок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 – Механічна інженерія). Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка МОН України. Харків, 2021.

Представлена до захисту робота базувалася на теоретичних, експериментальних та технологічних дослідженнях з використанням нових, ефективних, менш витратних підходів до підвищення стійкості виробів різного призначення. Для цього використовували вторинну сировину – немагнітну детонаційну шихту від утилізації боєприпасів, та природнього походження – бентонітову глину. В роботі розглядалися насосно-компресорні труби, зібрані зі сталі Р-110 при діаметрі 73мм і товщині стінки 5,5мм та культиваторні лапи товщиною 6..6,5мм. Об'єднання в єдину роботу цих різних виробів пов'язано з використанням однакової детонаційної домішки для підвищення різних властивостей виробів при їх виробництві, але різних напрямів при обслуговуванні та експлуатації.

Метою представленої роботи є теоретичне, технологічне й експериментальне обґрунтування способів підвищення стійкості виробів різного призначення із застосуванням модифікуючих домішок.

Запропоновано методику оцінки розтягування насосно-компресорних труб (НКТ) в експлуатації, яка передбачає проведення експериментів щодо розриву на зразках різної довжини з урахуванням відносного звуження, яке залежить від їх довжини (не тільки стандартні випробування). Відповідно до принципу Сен-Венана, довжина ділянок руйнування повинна відповідати порядку декількох товщин стрижня.

Аналіз деградаційних явищ в металі труб оцінювали в зоні максимальної локалізації деформацій (верхньої частини колони, труби сталі Р110). Дослідження

проводили на основі комплексного підходу з використанням металографічного, електронного, оптико-математичного методів оцінки структурних змін, а також мікрорентгеноспектрального аналізу і термоелектронної емісії.

У сфері використання сільськогосподарської техніки запропоновано підхід до оцінки зносу й деградації металу в процесі експлуатації культиваторних лап. Виявлено, що вони зношуються нерівномірно, товщина у всіх зонах аналізу відрізняється, хоча розмірні характеристики нових лап однакові й симетричні з двох сторін. Після експлуатації вони суттєво відрізняються. Це свідчить про те, що лапи працюють в різних умовах (грунтах) і зношуються не рівномірно. Так само спостерігається перекіс при закріпленні їх на стійці культиватора. Деякі лапи мають видимі потертості (у зоні кріплення лапи) основного металу, що також може свідчити про їх великий наробіток і несвоєчасну заміну при технічному обслуговуванні або ремонті.

Показано, що в результаті значних деформацій в трубах колони інтенсифікуються формування пороутворення, дифузія вуглецю (за рахунок руйнування цементиту перлітної складової) і вуглекислотна корозія в металі не тільки на поверхні, але і по їх перетину. При цьому, анодами є як границі зерен, що містять вільний вуглець, так і карбідні фази, неметалеві включення, що відрізняються відмінним електрохімічним потенціалом і характеристиками міцності і пластичних властивостей. Такі деградаційні явища визначають поріг розтягувальних напружень, що ініціюють вуглекислотну корозію («корозія під напруженням»).

Для оцінки стану НКТ при їх обслуговуванні в експлуатації запропонований магнітний метод неруйнівного контролю по коерцитивній силі. Проведено статистичні дослідження, які дозволили встановити зв'язок: зміна коерцитивної сили – структурна пошкоджуваність металу. Показано, що характер і ступінь пошкоджуваності металу визначають не тільки рівень показань цієї характеристики, але величину розкиду. Отримання такої інформації дозволило діагностувати ступінь деградації металу НКТ і стан передруйнування.

У нових культиваторних лапах найбільш високий рівень показань коерцитивної сили характерний для крил та їх зниження відбувається у напрямку до носка, що

визначається якістю штампування таких деталей. Після експлуатації відзначали мінливість, що характеризується як підвищенням, так і зниженням показань коерцитивної сили. Це відображає рівень і характер напруженого стану, а також ступінь деградації металу. Виявлено, що в лівій частині культиваторних лап частіше відзначається підвищення коерцитивної сили в повздовжньому напрямку на 70,0%, а в правій – її зниження, не залежне від напряму вимірювання, досягає 25,0-30,0%. Спостережуване свідчить про деформацію правої частини культиваторної лапи й істотну деградацію металу – лівої.

Запропоновано підхід до розробки бракувальних норм для відновлення зношених культиваторних лап, який забезпечує задовільні показники для використання в практиці при експлуатації. Для відновлення можуть використовуватися культиваторні лапи, зони яких не повинні мати підвищений рівень коерцитивної сили $> 10,0 \%$. Не рекомендується також відновлювати ті, мінливість яких має більш низькі показники й малий їх розкид $< 5,0\%$. Це характеризує підвищений рівень стабільних структурних деградаційних змін у їх металі.

Особлива увага в дослідженнях приділена питанню моделювання процесів деградації металу при деформації. В результаті цього показано, що концентрація вуглецю в фериті на $\sim 10\%$ зростає в дефектах більше, ніж у перліті, що можна пояснити його виділенням на межі зерен, дислокаційних стінках, а також утворенням фулеренових компонентів. В результаті формується перенасичена фаза, яка є проміжною (перехідною) між феритом і цементитом і, в ряді випадків, за концентрацією вуглецю близька до аустеніту. Аналогічну картину можна локально спостерігати в початковому зразку і після прокатки.

Виявлено суттєві зміни структуроутворення і на поверхні зразків. Це зони екструзії з формуванням карбідних фаз, пор і тріщин, що є додатковими концентраторами напружень.

Запропоновано спосіб введення модифікуючої домішки у рідку ванну при наплавленні. Для цього використовували нанесення домішки на електрод Т-620 у вигляді обмазки. Дослідженнями встановлено, що введення модифікуючої домішки немагнітної частки детонаційної шихти в кількості 5-7% від електрода виключає

формування дефектів, які пов'язані зі зменшення температури рідкої ванни за рахунок не розчинної алмазної фракції, яка відіграє роль локальних мікроохолодувачів. При цьому структура металу подрібнюється. Карбідна фаза виділяється у вигляді зернистих включень, більш рівномірно розподілених у матриці.

Для детальних досліджень використовували також природний компонент – бентонітову глину. Домішку наносили на електрод у кількості оптимальної 6-8 % від його частки. Порівняльні металографічні дослідження показали, що введення такої домішки сприяє формуванню більш однорідної структури практично по всіх зонах покриття за рахунок подрібнення голчастих виділень карбідів і формування їх зернистими. В обох варіантах покриттів (з введенням модифікатора глини й без неї) кристалізується мартенситна структура відпуску матриці. Додаткове модифікування в три рази знижує перетин перехідної зони. Нанесення покриття на тонкостінну культиваторну лапу повністю проплавляють її, а при введенні бентонітової глини зберігає її основу до 50%.

В результаті проведених досліджень розроблений і запропонований новий спосіб зміцнення культиваторних лап. Спосіб полягає в нанесенні зміцнюючих смуг на носок з лицьового боку лапи і з тильної – на її крилах. Згідно аналізу процесів зношування, оптимальним є нанесення наплавленням зміцнюючих смуг на носок розміром 20 мм, а на крила – 12-15 мм з відстанню між ними не менше 10 мм, щоб запобігти перекриття зон термічного впливу.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- запропоновано виявляти дефекти НКТ та культиваторних лап комплексним підходом, який забезпечує контроль зміни показників фізико-механічних властивостей при використанні в експлуатації, зміцненні та відновленні досліджених виробів;

- встановлено, що підвищення коерцитивної сили відносно вихідного стану без модифікування наплавленням, свідчить про накопичення напруженого стану, а зниження (нижче вихідного рівня) відповідає початку деградації металу. Зміна цих показників дозволяє оцінити особливості у структуроутворенні виробів;

- комплексними дослідженнями встановлені оптимальні домішки для модифікування покриттів на культиваторні лапи, які забезпечують необхідний рівень якості, властивостей з урахуванням умов експлуатації;

- розроблено нову, доступну для використання технологію, де в якості модифікуючої домішки використовували речовину природного походження – бентонітову глину, що додатково включає компоненти, які сприяють підвищенню вмісту карбідної фази з одноразовим її подрібненням, і це впливає на підвищення зчеплення покриття з основним металом, а також зменшує рівень напружень та перехідну зону;

- розроблено спосіб зміцнення культиваторних лап на основі аналізу їх зношування та деформації при експлуатації, що дозволяє знизити схильність до зношування. Це може бути використано при виготовленні виробів та ремонті в процесі відновлення.

встановлена можливість використання глини різних родовищ України для модифікування зміцнюючих покриттів на культиваторні лапи.

Отримав подальший розвиток:

- процес формування кисневих захисних плівок в різьбових спряженнях додатковим введенням в пластичне мастило немагнітної частки детонаційної шихти, що сприяло зменшенню періоду приробітку спряжень та збільшенню часу їх зношування;

Удосконалено:

- комплексний підхід, який включає контроль якості по коерцитивній силі, мікротвердості і структуроутворенню, планується використовувати і для інших напрямів дослідження деталей сільськогосподарського призначення.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблені нові технологічні процеси відновлення деталей з використанням різних вуглецевмісних модифікуючих домішок та їх введення в покриття, які пройшли випробування в умовах стендових та промислових виробництв. Для їх використання надані рекомендації по параметрах технологічних процесів.

Для підвищення зносостійкості різьбових з'єднань рекомендовано

використовувати детонаційну шихту немагнітної фракції з алмазами додаванням в пластичне мастило.

Результати досліджень та випробування пройшли апробацію на ДП «Завод імені В.О. Малишева», СТОВ «Мрія», які підтверджують їх ефективність.

Розробки, які досліджені в дисертаційній роботі, використовуються також в навчальному процесі: лекційних та практичних курсах для другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань «Механічна інженерія» (курси «Енерго- та матеріалозберігаючі технології та обладнання», «Нанотехнології та методологія наукових досліджень», «Основи трибології»).

Основні результати дисертаційної роботи та наукові положення одержані автором особисто та участь у публікаціях в співавторстві складає від 40 до 100%. Вони включають теоретичні, експериментальні дослідження та промислові випробування. Результати розглядалися, обговорювалися на Міжнародних науково-практичних конференціях в Україні та за кордоном.

Ключові слова: деградація, насосно-компресорні труби, культиваторна лапа, немагнітна детонаційна шихта, бентонітова глина, пластичне мастило, модифікування покриття наплавленням.

Список публікацій здобувача:

Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н. Напряжения и деградация структуры, формируемые в насосно-компрессорных трубах при эксплуатации: монография. Харьков: ООО «ПромАрт», 2018. 152с.

2. Технология восстановления изношенных культиваторных лап типа MARATHON SERIES фирмы OSMUNDSON / Т.С. Скобло, А.В. Тихонов, И.Н. Рыбалко, С.Г. Карташов, А.В. Сайчук, И.В. Холкина. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 188-197.

3. Рыбалко И.Н. Разработка методики оценки культиваторных лап и их состояния после эксплуатации. *Вісник Харківського національного технічного*

університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. 2016. Вип. 168. С. 46-51.

5. Рыбалко И.Н., Телятников В.В. Новая технология упрочнения при восстановлении деталей. *Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій*. 2016. С.189-200.

6. Анализ напряжённого состояния и технологические способы повышения ресурса стрелчатых лап культиваторов / И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, А.Д. Мартыненко, А.В. Сайчук. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2016. №6. С. 118-131.

7. Анализ характера растяжения насосно-компрессорных труб и определение степени, области их пластической деформации при эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2017. Вип. 183. С. 116-127.

8. Разработка методики оценки характера растяжения насосно-компрессорных труб в эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 69-79.

9. Влияние добавок углеродсодержащей шихты в пластичную смазку на особенности формирования поверхности трения соединений в насосно-компрессорных трубах / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко, А.К. Олейник. *Проблеми трибології*. 2017. №3. С. 16-24.

10. Расчёт напряжений в колонне разной длины при эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2017. №2 (43). С. 53-60.

11. Применение модифицирующих присадок для восстановления деталей машин / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков. *Конструювання*,

виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. 2017. Вип. 47, Ч.І. С. 229-240.

12. Определение толщины защитных оксидных пленок, формируемых при трении / И.Н. Рыбалко, А.С. Полянский, А.Ю. Марченко, В.В. Коломиец. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2017. №9 С. 28-33.

13. Оценка степени деградации металла изделий в процессе эксплуатации. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко, А.В. Тихонов. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2018. №11. С. 49-59.

14. Влияние добавки высокодисперсных алмазов на триботехнические характеристики пластичной графитной смазки. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, Е.А. Сатановский, А.К. Олейник. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2018. №12. С. 10-14.

15. 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*. 2019. №15. С. 60-85.

16. Рыбалко И.Н. Насосно-компрессорные трубы (НКТ), оценка их эксплуатационной стойкости и причины отказов. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Проблеми надійності машин*. 2019. Вип. 205. С.218-232.

17. Применение глины как модификатора в ремонтном производстве / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов А.В., И.Н. Рыбалко, Б.С. Сиряк. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2019. № 4 (25). С. 138-154.

18. 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*. 2019. 94 (4). P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-94-4-27-32>

19. Evaluation of the stress state of a cultivator blade in production and operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Tihonov, T. Maltsev. *Research in Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 66, Issue 2. P. 60-65. <https://doi.org/10.17221//2020-RAE>. (Scopus).

20. Применение модифицирующей присадки - глины при восстановительной

наплавке деталей / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов. *Сварочное производство*. 2020. №7. С. 41-49.

21. Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma. / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, A.K. Avtukhov, V.N. Romanchenko, A.V. Plugatarev, I.N. Rybalko. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2021. 31(1). P. 56-79. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.056-079>. (Web of Science).

22. A new way of getting the charge with diamond fraction / T.S. Skoblo, A.V. Nanka, I.N. Rybalko, et al. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. (Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii)*. 2021. Том 19, Вип. 1. С. 23-33. (Scopus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

23. Применение nanoалмазов для повышения качества восстанавливаемого слоя наплавкой / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков и др. *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Международной научно-практической конференции, 4-6 июня 2014 г. Минск, 2014. Ч. 1. С. 258-261.*

24. Оценка качества литых стальных изделий неразрушающим методом. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов, А.В. Сайчук, В.В. Телятников, И.Н. Рыбалко. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2014. №8|20|. С. 56-57.

25. Способ восстановления и повышения свойств рабочей поверхности деталей / В.В. Телятников, А.В. Марков, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко и др. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2014. №10|22|. С. 56-57.

26. Рыбалко И.Н. Новая технология упрочнения при восстановлении деталей. *Зварювання та споріднені технології: матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів, 20-22 травня 2015 р. Київ, 2015. С. 126.*

27. Рыбалко И.Н., Демченко Е.А. Метод оценки качества культиваторных лап. *Підвищення надійності машин і обладнання: Збірник тез доповідей X Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців, 20-22 квітня 2016 р. Кіровоград: КНТУ, 2016. С. 135-137.*

28. Влияние модифицирования углеродсодержащими порошковыми

присадками на износостойкость при нанесении покрытий. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков, А.К. Олейник. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал*. 2016. №10|47|. С. 54-58.

29. Aleksandr Saychuk, Ivan Rybalko Method of defects restoring in parts made from gray cast iron by hardfacing with recyclable materials modifying. *9th international conference of young scientists on welding and related technologies. Proceedings*. 23–26 May 2017 Kyiv. Ukraine – Kyiv, 2017. P. 156-159.

30. Rybalko I., Saychuk A. Modification of metal when welding cracks in body parts made of cast iron. *9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies*, 23-26 may. Kyiv, 2017. P. 202.

31. Рыбалко И.Н. Модифицирование вторичным сырьём пластичной смазки для резьбовых соединений. *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 27-28 октября 2017 г.* Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2017. С. 202-208.

32. Нанка О.В., Рыбалко І.М., Марков О.В. Модифікування відновлюваних шарів вуглецьвмісними домішками. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал*. 2018. № 1 (62). С. 53-58.

33. Розробка технології відновлення деталей наплавленням з використанням введення домішок / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рыбалко, О.В. Тіхонов. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал*. 2018. № 2 (63). С. 51-57.

34. Аналіз впливу структурно-механічних факторів на корозійну пошкоджуваність насосно-компресорних труб в умовах вуглекислотної свердловинної корозії / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рыбалко, О.Ю. Марченко. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал*. 2018. №5 (66). С. 55-58.

35. Оцінка пошкодження металу сталевих насосно-компресорних труб неруйнівним методом контролю якості / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рыбалко,

О.Ю. Марченко. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2018. №6 (67). С. 56-58.

36. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Ткаченко М.С. Влияние углеродсодержащей шихты на повышение стойкости пластичной смазки для резьбовых соединений. *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: международная научно-практическая конференция 24-25 октября 2019 г., в 2 ч. Ч. 2.* Минск: БГАТУ, 2019. С. 90-92.

37. Рыбалко І.М., Тіхонов О.В., Пасюта А.Г. Відновлення спрацьованих стрілчастих культиваторних лап. *Проблеми надійності машин: матеріали Міжнародної науково методичної конференції 12-13 листопада 2019р.* Харків, 2019. С. 41-42.

38. Скобло Т.С., Тіхонов О.В., Рыбалко І.М. Використання дисперсних домішок вторинної сировини при відновленні деталей машин. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2019. №12 (84). С. 55-57.

39. Рыбалко И.Н. Влияние пластической деформации на особенности структурных изменений в низкоуглеродистой стали. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №5 (88). С. 52-56.

40. Рыбалко И.Н. Анализ качества культиваторных лап производства Канады. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №7 (90). С. 53-57.

41. Применение коэрциметрии для оценки состояния металлов / Г.Я. Безлюдько, Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, В.Н. Романченко, А.В. Плугатарёв. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №9 (92). С. 55-57.

42. Склад детонаційної шихти з алмазною фракцією для модифікування покриттів / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, О.В. Сайчук, І.М. Рыбалко, А.В. Захаров, Л.В. Омельченко. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №11 (94). С. 54-56.

43. Рыбалко І.М., Захаров А.В. Розробка способу підвищення зносостійкості культиваторних стрілчастих лап. *Крамаровські читання: збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 114-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ,*

віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 25-26 лют. 2021 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2021. С. 68-71.

44. Rybalko I. Application of repair coatings with a charge with diamond fraction and natural materials. *Science and society, patterns and trends of development: Abstracts of XVI International Scientific and Practical Conference, Vienna, Austria, March 30 - April 02, 2021*. P. 248-250.

45. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Мартыненко А.Д. Исследование характера изнашивания культиваторных лап. *Applied and fundamental scientific research: Abstracts XIX International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, April 08-09, 2021*. P. 264-267.

46. Модифікування при відновленні виробів наплавленням із застосуванням детонаційної шихти / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.В. Сайчук, І.М.Рибалко, О.В. Марков. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал*. 2021. №3 (99). С. 53-56.

47. Упрочнение культиваторных лап наплавкой с модифицированием жидкой ванны вторичным сырьём / Т.С. Скобло, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, А.К. Олейник. *Interaction of society and science: prospects and problems: Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference, London, England, April 20-23, 2021*. P. 580-585.

48. Застосування модифікуючих домішок природного вуглецьвмісного компонента шунгіту і алмазів різних фракцій при відновленні деталей наплавленням / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.В. Сайчук, І.М.Рибалко, О.В. Марков. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал*. 2021. №4 (100). С. 54-56.

49. Methodology for determining the quality control of cultivator blades before and after operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Nanka, A. Saychuk, A. Tihonov. *About the problems of practice, science and ways to solve them: Abstracts of XXIV International Scientific and Practical Conference, Milan, Italy, May 04-07, 2021*. P. 309-317.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

50. Спосіб відновлення та підвищення властивостей робочого шару деталей: пат. 92472 Україна: МПК (2014.01) B23K 26/00. / Т.С. Скобло, І.М. Рибалко та інш.

№а2014 03324. заявл. 01.04.14.; опубл. 26.08.14., Бюл. № 16.

51. Спосіб оцінки якості виробів неруйнівним методом: пат. 95287 Україна: МПК G01N 27/82 (2006.01). / Т.С. Скобло, І.М. Рибалко та інш. №а2014 06020. заявл. 02.06.14.; опубл. 25.12.14., Бюл. № 24.

52. Спосіб оцінки ступеню деградації металу виробів в процесі експлуатації: пат. 99853 Україна: МПК G01B 7/24 (2006.01) G01N 3/08 (2006.01). / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, І.М. Рибалко та інш. №u2015 00292. заявл. 15.01.15.; опубл. 25.06.15., Бюл. № 12.

53. Спосіб відновлення спрацьованих стрілчатих культиваторних лап: пат. 100194 Україна: МПК (2015.01) B23P. / А.Г. Пасюта, О.В. Тіхонов, І.М. Рибалко та інш. №u2015 01510. заявл. 20.02.15.; опубл. 10.07.15., Бюл. № 13.

54. Спосіб визначення товщини захисних оксидних плівок, що формуються при терті: патент 107500 Україна: МПК G01B 21/8 (2006.01) / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. №u2015 12140. заявл. 07.12.15.; опубл. 10.06.16., Бюл. № 11.

55. Енергозберігаючий спосіб підвищення зносостійкості виробів модифікуванням мастила вторинною сировиною: пат. 108224 Україна: МПК (2016.01) C10M 101/00 / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. №u 2015 12910. заявл. 28.12.15.; опубл. 11.07.16., Бюл. № 13.

56. Спосіб підвищення властивостей покриттів модифікуванням при наплавленні: пат. 117615 Україна: МПК B22D 19/08 (2006.01) B22D 19/10 (2006.01) / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, С.П. Романюк, Л.В. Омельченко, І.М. Рибалко та інш. № u2017 01633. заявл. 20.02.2017; опубл. 26.06.17., Бюл. № 12.

57. Спосіб підвищення зносостійкості стрілчастої лапи культиватора: пат. 130824 Україна: МПК (2018.01) A01B 23/00, A01B 35/00 / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, О.К. Олейник. № u2018 06896. заявл. 19.06.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл.№ 24.

58. Метод визначення структурної неоднорідності: пат. 137100 Україна: МПК (2006) G01N 1/00, G01N 3/00, G01N 27/00, G01D 21/00. / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. № u2018 05708. заявл. 22.05.2018; опубл. 10.10.2019, Бюл.№ 19.

59. Методика разработки браковочных норм при оценке качества изделий из литых низкоуглеродистых сталей / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, В.В. Телятников. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 89-92.

60. О причинах трещинообразования в корпусных отливках сельскохозяйственных машин / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, В.В. Телятников. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2015. № 2 (6). С. 3-14.

61. Применение неразрушающего контроля для оценки качества отливок из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, В.В. Телятников, А.А. Радченко. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2015. № 4 (8). С. 15-25.

62. Анализ качества втулок цилиндров двигателей методом неразрушающего контроля / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, Е.В. Ровный, М.В. Марченко, И.Н. Рыбалко, А.В. Сайчук. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2015. № 5 (9). С. 26-32.

63. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2017. № 4 (17). С. 141-150.

64. Расчет экономической эффективности внедрения инструментов из ПСТМ в ремонтных предприятиях АПК / В.В. Коломиец, Р.В. Антощенко, Р.В. Ридный, И.Н. Рыбалко, А.А. Гончаренко. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. Вип. 199. С.229-231.

ABSTRACT

Rybalko I.M. Experimental, theoretical and technological basics of hardening products with the use of modifying agents. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.02.01 – Material Science. – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, 2021.

The dissertation presented for defence was based on theoretical, experimental and technological research involving new, effective and less expensive approaches to increase the durability of products intended for different purposes. With this in view, secondary raw materials were used – a nonmagnetic detonation charge obtained by recycling ammunition and bentonite clay extracted from natural deposits. The thesis considered tubing assembled of steel P-110 with a diameter of 73 mm and a wall thickness of 5.5 mm, and cultivator shares with a thickness of 6-6.5 mm. The incorporation of different products in one thesis stems from the fact of using the same detonation agent to improve different properties of products during their manufacture, though along different lines during their maintenance and operation.

The purpose of the study is the theoretical, technological and experimental substantiation of methods for increasing the durability of products intended for different purposes by using modifying agents.

A methodology is proposed for estimating the elongation of tubing during operation. It involves conducting fracture experiments on samples of different length with account of reduction that depends on the length (not only standard tests were conducted). According to the St. Venant principle, the length of fracture areas should correspond to an order of several rod thicknesses.

Analysis of degradation phenomena in the metal of the tubings was evaluated in the zone of maximal deformation localisation (the upper part of the tubing, with steel P110 pipes). The investigation was comprehensive and used metallographic, electron, and optical-mathematical methods for evaluating structural changes, with micro X-ray spectral and thermoelectron emission techniques also used.

In the agricultural machinery area, an approach was proposed to evaluate metal wear and degradation of used cultivator shares. It was found that they are subjected to wear unevenly, with the thickness in all analysis zones being different, though the dimensional characteristics of new shares are identical and symmetrical on both sides. After service, these characteristics differ significantly. This is indicative of that the shares operate in different conditions (soils) and are subject to wear unevenly. Furthermore, a skewness was found when the shares were fastened on the cultivator support arm. Some shares show visible base metal erosion (in the share fastening area). This can also be a proof of their long operation time and oddly timed share replacement during maintenance or repair.

Significant deformation in the tubing pipes was shown to intensify pore formation and carbon diffusion (due to disintegration of cementite of the perlite component), and carbon oxide corrosion in the metal not only on the surface, but also in the pipes' sections. Here, the anodes are both grain boundaries, which contain free carbon, and carbide phases and non-metallic inclusions that differ by their excellent electrochemical potential and strength characteristics, and plastic properties. Such degradation phenomena define the threshold of tensile stresses that initiate carbon oxide corrosion (so-called «stress corrosion»).

The magnetic non-destructive test method by the coercive force was proposed to evaluate the tubing state during its maintenance in operating conditions. Statistical studies were conducted, allowing to determine the following dependence: coercive force change – metal damage structure. The character and degree of metal damage was shown to determine not only the level of the values of this characteristic but also their dispersion. The obtaining of such information helped diagnose the degree of degradation of the tubing metal and the pre-failure state.

In new cultivator shares, the highest coercive force is native to the wings and it decreases in the direction of the tip as defined by the quality of stamping such parts. After usage, the variability parameter was found, which is characterised by both increasing and decreasing coercive forces. This represents the level and character of the stress state as well as the metal degradation degree. It was found that the left-hand side of the cultivator share more often demonstrates an increasing coercive force in the lengthwise direction by 70.0%,

whereas on the right-hand-side, the coercive force decreases, irrespective of the measurement direction, by 25.0-30.0%. This fact is indicative of deformation on the right-hand side of the cultivator share and of significant metal degradation on its left-hand side.

An approach was suggested to develop condemning limits for reconditioning worn cultivator shares, which would provide good indicators for practical use during operation. Reconditioning can be applied to cultivator shares whose zones should not have an increased coercive force by more than 10.0 %. Besides, it is not recommended to recondition those shares whose variability has lower indicators with a small dispersion of less than 5.0%. This characterises an increased level of steady structural degradation changes in their metal.

During research, special emphasis was placed on modelling metal degradation processes during strain. It showed that the carbon concentration in ferrite increases by about 10% more in defects than in perlite. This can be explained by its precipitation on the grain boundaries and dislocation walls, as well as by the formation of fullerene components. The result is the formation of an oversaturated phase, which is an intermediate (transitional) one between ferrite and cementite. In some cases, this phase, by its carbon concentration, is close to austenite. An identical pattern can be locally seen in the initial sample and after rolling.

The surfaces of the samples also demonstrated significant changes in structure formation. They are extrusion zones with formation of carbide phases, pores and cracks, which are additional surface-stress concentrators.

A method is proposed to introduce a modifying agent into the molten weld pool while building up cultivator shares. For this purpose, an additive agent in the form of a coating was applied onto electrode T-620. Investigations have found that, introducing a modifying agent of the nonmagnetic part of the detonation charge in an amount of 5-7% of the electrode, excludes the formation of defects related to a molten weld pool temperature drop. Such a drop is caused by the insoluble diamond fraction that plays the role of local micro coolers. In this case, the metal structure becomes finer. The carbide phase precipitates in the form of granular inclusions that are distributed more evenly in the matrix.

For in-depth research, a natural component was also used – bentonite clay. The additive was applied onto the electrode as optimal 6-8% of its part. Comparative metallographic studies showed that the introduction of such an additive facilitates the

formation of a more homogeneous structure practically in all surface coating zones due to the reduction of needle-like carbide precipitates that makes them granular. In both coating variants (with the introduction of the modifying clay and without it), the matrix tempering martensite structure crystallises. Additional modification reduces the transition zone section by a factor of three. Applying a surface coating onto a thin-wall cultivator share fully penetrates it, whereas introducing bentonite clay keeps the base metal up to 50%.

The research result was the development and proposal of a new method of hardening cultivator shares. The method consists in applying hardening strips onto the tip of the share face and onto its wings on the backside. According to analysis of wear processes, an optimal scheme is the building up of 20-mm hardening strips on the tip and 12-15-mm strips on the wings with a minimum 10-mm distance between them to prevent the overlap of thermal action zones.

The scientific novelty of research results

For the first time:

- it is proposed to detect defects in tubing and cultivator shares by using a comprehensive approach that would ensure the monitoring of changes in the physico-mechanical properties of the investigated products during their operation, hardening and reconditioning;

- it was found that an increasing coercive force with respect to the initial state without using building up modifying is indicative of a stress state build up, whereas a decreasing coercive force (below the initial level) corresponds to the onset of metal degradation. Changes in these indicators help evaluate the peculiarities in the structure formation of these products.

- comprehensive research has defined the optimal additives for modifying the coatings of cultivator shares, which would ensure an adequate quality level and properties with account of service conditions;

- a new practical technology was developed. It provides for using a substance of natural origin – bentonite clay as a modifying agent. It additionally includes components that facilitate an increasing carbide phase content with its one-time reduction. This increases the adhesion of the coating with the base metal and reduces the stress level and the transition

zone.

- a technique was developed for hardening cultivator shares. It is based on analysing their wear and deformation during operation, enabling to minimise their susceptibility to wear. This feature can be used while making products and repairing them during reconditioning.

- the possibility of using clay from different deposits in Ukraine was established. It can be used for modifying hardening coatings on cultivator shares.

The following was developed further:

- the process of forming oxygen protective films in threaded joints by adding the nonmagnetic part of a detonation charge to the lubricating grease. This helped reduce the break-in period of the joints and increase their wear resistance period.

Refined:

- the comprehensive approach, which includes quality control by the coercive force, micro hardness and structure formation, is intended to be used also in other areas of research in mechanical parts for agricultural purposes.

Practical significance of obtained results

New technological processes for reconditioning parts were developed. The processes use different carbon-containing modifying agents introduced to the coating. The agents were tested in test bench and industrial production conditions. To use them, recommendations for technological process parameters are given.

To increase the wear resistance of threaded joints, it is recommended to use the nonmagnetic part of a detonation charge with diamonds and add it to a lubricating grease.

The research results and the tests were appraised at the SE «Malysheva Plant» and ALLC «Mriya» and their effectiveness was confirmed.

The developments investigated in the thesis are also used in the educational process: lectures and practical courses for second-level (master's degree) education in «Mechanical Engineering» (the courses «Energy and material saving technologies and equipment», «Nano technologies and methodology of scientific research», and «Basics of Tribology»).

The author obtained the basic results of the thesis and advanced the scientific ideas personally, with coauthorship in publications being 40-100%. The results include theoretical

research and experimental investigations, as well as industrial tests. The results were deliberated and discussed at International Research-to-Practice Conferences in Ukraine and abroad.

Key words: degradation, tubing, cultivator share, nonmagnetic detonation charge, bentonite clay, lubricating grease, modifying a coating by building up.

Publications of the doctoral candidate.

Proceedings containing the main scientific results of the thesis:

1. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Rybalko I.N. Stresses and structural degradation formed in tubing during operation: monograph. Kharkiv: LLC "PromArt", 2018. 152 p.

2. Technology for the restoration of worn-out cultivator paws of the MARATHON SERIES type from OSMUNDSON / T.S. Skoblo, A.V. Tikhonov, I.N. Rybalko, S.G. Kartashov, A.V. Saychuk, I. V. Kholkina. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture: Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production*. 2015. No. 158. P. 188-197.

3. Rybalko I.N. Development of a methodology for assessing cultivator paws and their condition after operation. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture: Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production*. 2016. No. 168. P. 46-51.

5. Rybalko I.N., Telyatnikov V.V. New technology of hardening when restoring parts. *Modern problems of welding and related technologies*. 2016. P.189-200.

6. Analysis of the stress state and technological methods of increasing the resource of the lancet paws of cultivators / I.N. Rybalko, A.V. Tikhonov, A.D. Martynenko, A.V. Saychuk. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2016. №6. P. 118-131.

7. Analysis of the nature of stretching of tubing and determination of the degree, area of their plastic deformation during operation. Skoblo, A.I. Sidashenko, I.N. Rybalko, A.V. Tikhonov, E.L. Belkin, A. Yu. Marchenko. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture: Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production*. 2017. No. 183. P. 116-127.

8. Development of methods for assessing the nature of stretching of pump and

compressor pipes in operation / TS Skoblo, AI Сидашенко, И.Н. Рыбалко, Е.Л. Belkin, A.Yu. Marchenko. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2017. №8. P. 69-79.

9. Influence of carbon-containing charge additives in a grease on the features of the formation of the friction surface of joints in tubing / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, I.N. Rybalko, A.Yu. Marchenko, A.K. Oleinik. *Problems of tribology*. 2017. №3. P. 16-24.

10. Calculation of stresses in a column of different lengths during operation / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, I. N. Rybalko, A.Yu. Marchenko. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas: All-Ukrainian Scientific and Technical Journal*. 2017. №2 (43). P. 53-60.

11. The use of modifying additives for the restoration of machine parts. Skoblo, A.I. Sidashenko, I. N. Rybalko, A.V. Markov. *Design, manufacture and operation of agricultural machinery: National interagency scientific and technical collection*. 2017. No 47, Part I. P. 229-240.

12. Determination of the thickness of protective oxide films formed during friction / I.N. Rybalko, A.S. Polyansky, A. Yu. Marchenko, V.V. Kolomiets. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2017. №9. P. 28-33.

13. Assessment of the degree of metal degradation of products during operation. / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, I. N. Rybalko, A.Yu. Marchenko, A.V. Tikhonov. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2018. №11. P. 49-59.

14. Influence of the addition of highly dispersed diamonds on the tribotechnical characteristics of plastic graphite lubricant. / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, I. N. Rybalko, E.A. Satanovsky, A.K. Oleinik. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2018. №12. P. 10-14.

15. Analysis of methods of manufacturing, hardening and restoration of the lancet paws of the cultivator / T.S. Skoblo, I.N. Rybalko, A.V. Tikhonov, A.D. Martynenko. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 2019. №15. P. 60-85.

16. Rybalko I.N. Tubing, assessment of their operational durability and causes of failures. *Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko: Problems of machine reliability*. 2019. No. 205. P. 218-232.

17. The use of clay as a modifier in repair production / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.V. A.V. Tikhonov, I.N. Rybalko, B.S. Siryak. *Agrotechnics and energy supply: Scientific and practical journal*. 2019. № 4 (25). P. 138-154.

18. 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*. 2019. 94 (4). P. 27-31.

19. Evaluation of the stress state of a cultivator blade in production and operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Tihonov, T. Maltsev. *Research in Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 66, Issue 2. P. 60-65. (Scopus)

20. The use of a modifying additive - clay for restoration surfacing of parts / T.S. Skoblo, I.N. Rybalko, A.I. Sidashenko, A.V. Tikhonov. *Welding production*. 2020. №7. P. 41-49.

21. Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma. / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, A.K. Avtukhov, V.N. Romanchenko, A.V. Plugatarev, I.N. Rybalko. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2021. 31(1). P. 56-79. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.056-079> (WoS)

22. A new way of getting the charge with diamond fraction / T.S. Skoblo, A.V. Nanka, I.N. Rybalko, et al. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii*. 2021. T 19, Vyp. 1. P. 23-33. (Scopus).

Approbational proceedings:

23. Application of nanodiamonds to improve the quality of the restored layer by surfacing. Skoblo, I.N. Rybalko, A.V. Markov and al. Modern problems of mastering new equipment, technologies, organization of technical service in the agro-industrial complex: materials of the International Scientific and Practical Conference, June 4-6, 2014. Minsk, 2014. Part 1. P .258-261.

24. Evaluation of the quality of cast steel products by a non-destructive method. / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.V. Tikhonov, A.V. Saychuk, V.V. Telyatnikov, I.N. Rybalko. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal*. 2014. №8|20|. P. 56-57.

25. Method of restoring and improving the properties of the working surface of parts / V.V. Telyatnikov, A.V. Markov, A.V. Saychuk, I.N. Rybalko and et. *Industry in focus:*

Inf.-analyst. int. tech. journal. 2014. №10|22|. P. 56-57.

26. Rybalko I.N. New technology of hardening when restoring parts. *Welding and related technologies: materials of the VIII International Conference of Young Scientists and Specialists*, May 20-22, 2015 Kyiv, 2015. P. 126.

27. Rybalko I.N., Demchenko E.A. Method for assessing the quality of cultivator paws. *Improvement of machine requirements and possession: Collection of theses of the X All-Ukrainian Science and Practice Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*, April 20-22, 2016 Kirovohrad: KNTU, 2016. P. 135-137.

28. Influence of modification with carbon-containing powder additives on wear resistance during coating. / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.V. Saychuk, I.N. Rybalko, A.V. Markov, A.K. Oleinik. *Inf.-analyst. int. tech. journal: Industry in focus*. 2016. №10|47|. P. 54-58.

29. Aleksandr Saychuk, Ivan Rybalko Method of defects restoring in parts made from gray cast iron by hardfacing with recyclable materials modifying. *9th international conference of young scientists on welding and related technologies. Proceedings*. 23–26 May 2017 Kyiv. Ukraine – Kyiv, 2017. P. 156-159.

30. Rybalko I., Saychuk A. Modification of metal when welding cracks in body parts made of cast iron. *9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies*, 23-26 may. Kyiv, 2017. P. 202.

31. Rybalko I.N. Modification of grease for threaded connections with secondary raw materials. *Modern equipment and technologies: problems, state and prospects: materials of the VII All-Russian scientific-practical conference with international participation* October 27-28, 2017. Rubtsovsk: Rubtsovsk Industrial Institute, 2017. P. 202-208.

32. Nanka O.V., Rybalko I.M., Markov O.V. Modification of renewable layers with carbon-containing impurities. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal*. 2018. № 1 (62). P. 53-58.

33. Development of the technology for updating parts to weld-ons from the introduction of houses / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, I. M. Ribalko, O.V. Tikhonov. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal*. 2018. № 2 (63). P. 51-57.

34. Analysis of the influence of structural and mechanical factors on the corrosion

damage of pump-compressor pipes in the conditions of carbon dioxide downhole corrosion / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, I.M. Рибалко, O.Yu. Marchenko. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2018. №5 (66). P. 55-58.

35. Estimation of metal damage of steel pump-compressor pipes by non-destructive method of quality control / T.C. Skoblo, O.I. Sidashenko, I.M. Rybalko, O.Yu. Marchenko. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2018. №6 (67). P. 56-58.

36. Skoblo T.S., Rybalko I.N., Tkachenko M.S. Influence of a carbonaceous charge on increasing the durability of a grease for threaded connections. *Technical and staffing of innovative technologies in agriculture: an international scientific and practical conference on October 24-25, 2019, at 2 part, Part 2.* Minsk: BSATU, 2019. P. 90-92.

37. Rybalko I.M., Tikhonov O.V., Pasyuta A.G. Restoration of the worked arrow cultivator paws. *Problems of machine reliability: materials of the International scientific-methodical conference on November 12-13, 2019.* Kharkiv, 2019. P. 41-42.

38. Skoblo T.S., Tikhonov O.V., Rybalko I.M. The use of dispersed impurities of secondary raw materials in the restoration of machine parts. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2019. №12 (84). P. 55-57.

39. Rybalko I.N. The influence of plastic deformation on the features of structural changes in low-carbon steel. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2020. №5 (88). P. 52-56.

40. Rybalko I.N. Analysis of the quality of cultivating paws made in Canada. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2020. №7 (90). P. 53-57.

41. Application of coercimetry for assessing the state of metals / G.Ya. Bezlyudko, T.S. Skoblo, I.N. Rybalko, V.N. Romanchenko, A.V. Plugatarev. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2020. №9 (92). P. 55-57.

42. The composition of the detonation charge with a diamond fraction for modification of coatings / TS Skoblo, S.P. Romanyuk, O.V. Saychuk, I.M. Rybalko, A.B. Zakharov, L.V. Omelchenko. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal.* 2020. №11 (94). P. 54-56.

43. Rybalko I.M., Zakharov A.V. Development of a method to increase the wear resistance of cultivator arrow paws. *Kramarov readings: collection of abstracts of the VIII*

International Scientific and Technical Conference on the occasion of the 114th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of VASGNIL, Vice-President of UASGN Kramarov Vladimir Savovich (1906-1987) February 25-26. 2021, Kyiv / Ministry of Education and Science of Ukraine, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. K .: Publishing Center of NULES of Ukraine, 2021. P. 68-71.

44. Rybalko I. Application of repair coatings with a charge with diamond fraction and natural materials. *Science and society, patterns and trends of development: Abstracts of XVI International Scientific and Practical Conference, Vienna, Austria, March 30 - April 02, 2021. P. 248-250.*

45. Skoblo T.S., Rybalko I.N., Martynenko A.D. Investigation of the nature of wear of cultivator paws. *Applied and fundamental scientific research: Abstracts XIX International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, April 08-09, 2021. P. 264-267.*

46. Modification at the renewal of virobes in the build-up from the detonation charge / T.S. Skoblo, O.V. Nanka, O. V. Saychuk, I.M. Ribalko, O.V. Markov. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal. 2021. №3 (99). P. 53-56.*

47. Strengthening of cultivator paws by surfacing with modification of a liquid bath with secondary raw materials. Skoblo, A.V. Saychuk, I.N. Rybalko, A.K. Oleinik. *Interaction of society and science: prospects and problems: Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference, London, England, April 20-23, 2021. P. 580-585.*

48. The use of modifying impurities of the natural carbon-containing component of shungite and diamonds of different fractions in the restoration of parts by surfacing / TS Skoblo, OV Nanka, OV Saychuk, IM Rybalko, OV Markov. *Industry in focus: Inf.-analyst. int. tech. journal. 2021. №4 (100). P. 54-56.*

49. Methodology for determining the quality control of cultivator blades before and after operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Nanka, A. Saychuk, A. Tihonov. *About the problems of practice, science and ways to solve them: Abstracts of XXIV International Scientific and Practical Conference, Milan, Italy, May 04-07, 2021. P. 309-317.*

Proceedings in which the thesis scientific results are additionally reflected:

50. The method of restoring and improving the properties of the working layer of parts: US Pat. 92472 Ukraine: IPC (2014.01) B23K 26/00. / T.C. Skoblo, I.M. Rybalko et al. No. a2014 03324. dek. 04.01.14; publ. 26.08.14., Bull. № 16.

51. The method of assessing the quality of products by non-destructive method: US Pat. 95287 Ukraine: IPC G01N 27/82 (2006.01). / T.C. Skoblo, I.M. Rybalko et al. No. a2014 06020. dek. 02.06.14; publ. 12.25.14, Bull. № 24.

52. The method of assessing the degree of degradation of metal products during operation: US Pat. 99853 Ukraine: IPC G01B 7/24 (2006.01) G01N 3/08 (2006.01). / T.C. Skoblo, O.Yu. Marchenko, I.M. Rybalko et al. No. u2015 00292. dek. 15.01.15; publ. 25.06.15., Bull. № 12.

53. Method of restoring triggered cultivator legs: US Pat. 100194 Ukraine: IPC (2015.01) B23P. / A.G. Pasyuta, O.V. Tikhonov, I.M. Rybalko et al. No. u2015 01510. dek. 20.02.15; publ. 10.07.15., Bull. № 13.

54. Method for determining thickness of protective oxide films formed by friction: patent 107500 Ukraine: IPC G01B 21/8 (2006.01) / T.S. Skoblo, O.Yu. Marchenko, O.I. Sidashenko, I.M. Rybalko et al. No. u2015 12140. dek. 12.07.15; publ. 10.06.16., Bull. № 11.

55. Energy-saving method of increasing the wear resistance of products by modifying the oil with secondary raw materials: US Pat. 108224 Ukraine: the IPC (2016.01) 101/00 C10M / T.S. Skoblo, O.Yu. Marchenko, O.I. Sidashenko, I.M. Rybalko et al. No. u201512910. dek. 28.12.15 .; publ. 07.11.16, Bull. № 13.

56. The method of improving the properties of coatings by modification during surfacing: US Pat. 117615 Україна: МПК B22D 19/08 (2006.01) B22D 19/10 (2006.01) / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, S.P. Romanyuk, L.V. Omelchenko, I.M. Rybalko et al. No. u2017 01633. dek. 20.02.2017; publ. 26.06.17., Bull. № 12.

57. The method of increasing the wear resistance of the arrow paw of the cultivator: US Pat. 130824 Ukraine: IPC (2018.01) A01B 23/00, A01B 35/00 / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, I.M. Rybalko, O.B. Tikhonov, O.K. Oiliynyk. No. u2018 06896. dek. 06.19.2018; publ. 12.26.2018, Bull.№ 24.

58. The method of determining structural heterogeneity: Pat. 137100 Ukraine: IPC (2006) G01N 1/00, G01N 3/00, G01N 27/00, G01D 21/00. / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, I.M. Rybalko et al. No u2018 05708. dek. 22.05.2018; publ. 10.10.2019, Bull. № 19.

59. Methodology for the development of rejection standards in assessing the quality of products from cast low-carbon steels / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, I. N. Rybalko, A.V. Tikhonov, V.V. Telyatnikov. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture: Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production*. 2015. No. 158. P. 89-92.

60. On the causes of cracking in hull castings of agricultural machines / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.V. Saychuk, I.N. Rybalko, V.V. Telyatnikov. *Agrotechnics and energy supply: Scientific and practical journal*. 2015. № 2 (6). P. 3-14.

61. Application of non-destructive testing to assess the quality of castings from gray cast iron / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, A.V. Saychuk, I.N. Rybalko, V.V. Telyatnikov, A.A. Radchenko. *Agrotechnics and energy supply: Scientific and practical journal*. 2015. № 4 (8). P. 15-25.

62. Analysis of the quality of engine cylinder liners by non-destructive testing / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, E.V. Rovny, M.V. Marchenko, I.N. Rybalko, A.V. Saychuk. *Agrotechnics and energy supply: Scientific and practical journal*. 2015. № 5 (9). P. 26-32.

63. Assessment of local structural heterogeneity in castings from gray cast iron / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, O. Yu. Klochko, A.V. Saychuk, I.N. Rybalko. *Agrotechnics and energy supply: Scientific and practical journal*. 2017. № 4 (17). P. 141-150.

64. Calculation of the economic efficiency of the introduction of tools from PSTM in the repair enterprises of the agro-industrial complex. Kolomiets, R.V. Antoshchenkov, R.V. Ridny, I.N. Rybalko, A.A. Goncharenko. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture: Mechanization of agricultural production*. 2019. No. 199. P. 229-231.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ	32
РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МОДИФІКУЮЧИХ ДОМІШОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВИРОБІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	40
1.1 Аналіз нормативно-технічної документації на виробництво насосно-компресорних труб (НКТ), причини відмов і методи підвищення їх експлуатаційної стійкості	40
1.2 Аналіз способів виготовлення, зміцнення й відновлення робочих органів сільськогосподарської техніки	57
1.3 Застосування алмазовмісної шихти для модифікування поверхонь	73
1.4 Мета і завдання досліджень	79
ВИСНОВКИ	80
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	83
2.1 Методологія досліджень	83
2.2 Матеріали, використовувані для модифікування при виготовленні, ремонті й експлуатації виробів різного призначення	83
2.3 Методи досліджень, використані в роботі	92
2.4 Розробка методики оцінки розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації	95
2.5 Нові методи оцінки структури наплавлених покриттів методом математичного аналізу металографічного зображення	98
ВИСНОВКИ	100
РОЗДІЛ 3 ДЕГРАДАЦІЯ МЕТАЛУ Й ПІДХОДИ ДО ЇЇ ОЦІНКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	103
3.1 Аналіз впливу структурно-механічних факторів на корозійну пошкоджуваність насосно-компресорних труб в умовах вуглекислотної свердловинної корозії	103
3.2 Обґрунтування параметрів оцінки пошкоджуваності металу труб	

	30
неруйнівним методом контролю якості	114
3.3 Особливості зношування й деградації металу в процесі експлуатації культиваторних лап сільськогосподарської техніки	122
3.4 Оцінка напруженого стану культиваторних лап	129
ВИСНОВКИ	141
РОЗДІЛ 4 СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВИРОБІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ЇХ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ	144
4.1 Узагальнення відомих технологій і обґрунтування розробки нової для підвищення стійкості різьбових з'єднань насосно-компресорних труб	144
4.1.1 Вплив домішки алмазовмісної шихти на підвищення стійкості пластичного мастила різьбових з'єднань насосно-компресорних труб при експлуатації	147
4.1.2 Визначення товщини захисних оксидних плівок, сформованих при терті для прогнозування й корегування кількості використовуваної модифікуючої домішки при обслуговуванні й ремонті устаткування	155
4.2 Експериментальні дослідження покриттів з використанням нано- і дисперсної алмазовмісної шихти й природної сировини - глини	159
4.2.1 Застосування нано- і дисперсної алмазовмісної шихти при наплавленні відновлювальних і зміцнюючих покриттів	159
4.2.2 Застосування природної сировини – глини для модифікування покриттів	169
4.2.3 Дослідження властивостей нових покриттів	175
ВИСНОВКИ	179
РОЗДІЛ 5 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У ВИРОБАХ З РІЗНИМИ УМОВАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	182

5.1	Теоретичне моделювання й експериментальне підтвердження процесів деформації при деградації структури металу в умовах експлуатації НКТ	182
5.1.1	Розрахунки напружень у колоні різної довжини при експлуатації	183
5.1.2	Аналіз структури вихідного стану труб і її зміни при деформації	195
5.2	Математичне моделювання структуроутворення при наплавленні відновлювальних покриттів з використанням модифікуючої домішки бентонітової глини	212
	ВИСНОВКИ	223
	РОЗДІЛ 6 ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ АНАЛІЗУЄМИХ ВИРОБІВ	228
6.1	Вплив алмазовмісної немагнітної частини шихти на стабільність в експлуатації сполучень	228
6.2	Підвищення експлуатаційної стійкості культиваторних лап сільськогосподарської техніки	230
6.2.1	Розробка технологічного процесу відновлення і зміцнення стрілчастих лап культиваторів вібраційним методом	231
6.2.2	Спосіб зміцнення культиваторних лап наплавленням зміцнюючими смугами	234
6.3	Польові випробування зміцнених культиваторних лап	241
6.4	Оцінка економічної ефективності розробок	247
	ВИСНОВКИ	251
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	254
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	259
	ДОДАТКИ	292

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В роботі розглядається три напрями використання модифікуючих домішок для підвищення експлуатаційної стійкості деталей. Це такі, які вносяться у рідку ванну для зміцнення покриттів, та у спряження різьбових з'єднань для насосно-компресорних труб (НКТ). При цьому, домішку модифікатора вносили в пластичне мастило у спряження, які знаходяться в верхній частині колони НКТ, що схильна до пошкодження корозією, та може бути при необхідності додатково відремонтована. Найбільш поширенішими факторами, що впливають на технічний стан і термін служби НКТ, є корозійно-агресивний вплив свердловинного середовища та циклічні навантаження, які вони зазнають в процесі експлуатації.

За даними промислової статистики кількість аварій з НКТ від загального числа свердловинного обладнання в ряді випадків досягає 80. За даними Американського нафтового інституту (API) через руйнування різьбових з'єднань кількість аварій НКТ становить стабільно до 55%. Це свідчить про актуальність проблеми підвищення корозійної стійкості різьби НКТ. Було встановлено, що довговічність їх визначається і герметичністю. Це можливо передбачити введенням стабільно працюючого пластичного мастила. Все це свідчить про актуальність завдання підвищення корозійної стійкості та довговічності різьбових з'єднань з використанням пластичних мастил з введенням модифікуючих домішок.

На теперішній час також найбільш гостро стоїть проблема підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Це обумовлено високою складністю механізму взаємодії почворіжучих деталей з ґрунтом, абразивним середовищем, що має значні показники твердості. Значний вплив на зносостійкість лемішів, культиваторних лап та інших деталей роблять зовнішні параметри їх експлуатації: швидкість відносного переміщення абразивної маси, конструктивне розташування поверхонь, наявність та врахування ґрунтової вологи. Шляхи підвищення зносостійкості культиваторних лап зводяться до нанесення зміцнюючих покриттів у різному вигляді та суцільного наплавлення твердими матеріалами, металокерамікою. При наплавленні застосовують різні модифікуючі домішки.

У зв'язку з цим, пошук технологічних рішень щодо підвищення зносостійкості культиваторних лап зміцнюючим наплавленням з модифікуванням рідкої ванни домішками є теж актуальним.

Об'єднання в єдину роботу цих різних виробів пов'язано з використанням однакової вторинної сировини – детонаційної домішки від утилізації боєприпасів для підвищення різних властивостей і технологіях їх виробництва, обслуговування та експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до держбюджетної та госпдоговірної тематики ХНТУСГ, договорів про співпрацю з підприємствами та згідно діючих програм:

- Договір №191дп від 04.04.2016 р. про науково-технічне співробітництво між ДП «Завод імені В.О. Малишева» і Харківським національним технічним університетом сільського господарства імені Петра Василенка;

- «Теоретичне та експериментальне обґрунтування нових технологій виробництва та відновлення деталей з використанням зміцнення модифікуванням» (ДР 0116U005802) у період 2015-2017 р.р.;

- «Отримання і застосування детонаційної шихти для підвищення експлуатаційної стійкості деталей» (ДР 0117U004157) у період 2014-2017 р.р.;

- «Нові технологічні процеси відновлення деталей наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною» (ДР 0120U002209) у період 2020-2021 р.р.;

- «Проведення експериментальних досліджень для промислових випробувань нової технології зміцнення культиваторних стрілочастих лап» (ДР 0121U111046, госпдоговір 4/4-2021) у період 2021-2022 р.р.;

«Дослідження властивостей матеріалу нових культиваторних лап вітчизняного та закордонного виробництва» (ДР 0121U111165, госпдоговір 7/4-2021) у період 2021-2022 р.р.

Мета та завдання досліджень. Метою представленої роботи є теоретичне, експериментальне й технологічне обґрунтування способів підвищення стійкості

виробів різного призначення із застосуванням модифікуючих домішок та їх впровадження у виробництво.

Для виконання поставленої мети необхідно було розв'язати ряд завдань:

- визначити напруження в зонах труб бурильної колони;
- оцінити локалізацію й характер деформацій для прогнозування стійкості НКТ при експлуатації;
- дослідити характер пошкоджуваності при експлуатації НКТ в умовах вуглекислотного впливу середовища;
- встановити деградаційні явища, що мають місце при впливі напруженого стану при взаємодії з вуглекислотним середовищем і одержати ефективне пластичне мастило з вторинною сировиною для зменшення пошкоджуваності різьбових з'єднань;
- визначити особливості напруженого стану, зношування й деградації металу робочого шару в процесі експлуатації культиваторних лап та розробити методологію оцінки їх напруженого стану;
- розробити процес внесення модифікуючих домішок в рідку ванну наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною з алмазною фракцією і природною речовиною – глиною для підвищення властивостей, експлуатаційної стійкості робочих органів сільськогосподарських машин;
- теоретично оптико-математичним аналізом виявити зміни структури при введенні модифікуючої домішки бентонітової глини для зміцнюючого покриття наплавленням культиваторних лап сільськогосподарської техніки;
- провести експериментальні та технологічні дослідження з вибору модифікуючих домішок природнього походження для зміцнюючих покриттів наплавленням;
- оцінити експлуатаційну стійкість деталей, згідно нових розроблених технологічних процесів модифікування;
- оцінити економічну ефективність технологічних процесів на споживчі властивості виробів.

Об'єкт дослідження – процес підвищення якості виробів різного призначення

корегуванням складу модифікуючих домішок та їх вплив на структуроутворення при зміцненні культиваторних лап наплавленням і герметизації різьбових з'єднань у спряженнях.

Предмет дослідження – експериментальні, теоретичні і технологічні основи зміцнення виробів з використанням модифікуючих домішок.

Методи дослідження. Розглянуті варіанти модифікування вивчали експериментально та теоретично: оптичною, електронною мікроскопією, термоелектронною емісією, локальним розподілом компонентів на ступінь однорідності їх засвоєння у покритті. Для цього використовували оптичний мікроскоп та електронний YSM-820 Link «YEOL» з системою рентгенівського мікроаналізу. Мікротвердість оцінювали по мікро-Вікерсу приладом UIT HVmicro-1 і навантаженні 50г та при навантаженнях 20 і 50г на приладі ПМТ-3. Зміни вивчали і рентгенівським методом на апараті ДРОН-3 в $K\alpha$ -Cu випромінюванні. Для оцінки зношування проводили стендові випробування з введенням пластичного мастила у спряження, в абразивному середовищі – піску на машині тертя СМТ-1. Оцінку міцності зчеплення покриття з основою виконували згідно методики Гулаєва-Гудцова. Здійснення контролю якості проводили з використанням магнітного методу коерцитиметром КРМ-Ц-К2М та ІКС-104-ІНТЕКС згідно попередньо розроблених бракувальних норм.

Розроблено методику оцінки розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації.

Для виявлення змін у структуроутворенні при нанесенні покриттів наплавленням з використанням модифікуючих домішок використовували оптико-математичний аналіз електронних зображень і новий комплексний теоретичний підхід до оцінювання якісного та кількісного фазового складу, а також взаємозв'язок різних фаз в зонах наплавлення і перехідної з основою. Метод детально розглянутий у відповідних розділах роботи.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- запропоновано виявляти дефекти НКТ та культиваторних лап комплексним

підходом, який забезпечує контроль зміни показників фізико-механічних властивостей при використанні в експлуатації, зміцненні та відновленні досліджених виробів;

- встановлено, що підвищення коерцитивної сили відносно вихідного стану без модифікування наплавленням, свідчить про накопичення напруженого стану, а зниження (нижче вихідного рівня) відповідає початку деградації металу. Зміна цих показників дозволяє оцінити особливості у структуроутворенні виробів;

- комплексними дослідженнями встановлені оптимальні домішки для модифікування покриттів на культиваторні лапи, які забезпечують необхідний рівень якості, властивостей з урахуванням умов експлуатації;

- розроблено нову, доступну для використання технологію, де в якості модифікуючої домішки використовували речовину природного походження – бентонітову глину, що додатково включає компоненти, які сприяють підвищенню вмісту карбідної фази з одноразовим її подрібненням, і це впливає на підвищення зчеплення покриття з основним металом, а також зменшує рівень напружень та перехідну зону;

- розроблено спосіб зміцнення культиваторних лап на основі аналізу їх зношування та деформації при експлуатації, що дозволяє знизити схильність до зношування. Це може бути використано при виготовленні виробів та ремонті в процесі відновлення.

встановлена можливість використання глини різних родовищ України для модифікування зміцнюючих покриттів на культиваторні лапи.

Отримав подальший розвиток:

- процес формування кисневих захисних плівок в різьбових спряженнях додатковим введенням в пластичне мастило немагнітної частки детонаційної шихти, що сприяло зменшенню періоду приробітку спряжень та збільшенню часу їх зношування;

Удосконалено:

- комплексний підхід, який включає контроль якості по коерцитивній силі, мікротвердості і структуроутворенню, планується використовувати і для інших

напрямів дослідження деталей сільськогосподарського призначення.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблені нові технологічні процеси відновлення деталей з використанням різних вуглецевмісних модифікуючих домішок та їх введення в покриття, які пройшли випробування в умовах стендових та промислових виробництв. Для їх використання надані рекомендації по параметрах технологічних процесів.

Для підвищення зносостійкості різьбових з'єднань рекомендовано використовувати детонаційну шихту немагнітної фракції з алмазами додаванням в пластичне мастило.

Результати досліджень та випробування пройшли апробацію на ДП «Завод імені В.О. Малишева», СТОВ «Мрія», які підтверджують їх ефективність.

Розробки, які досліджені в дисертаційній роботі, використовуються також в навчальному процесі: лекційних та практичних курсах для другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань «Механічна інженерія» (курси «Енерго- та матеріалозберігаючі технології та обладнання», «Нанотехнології та методологія наукових досліджень», «Основи трібології»).

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, одержані автором самостійно та викладені у роботах [1-64]. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особливий внесок полягає в наступному: аналіз характеру розтягування насосно-компресорних труб [7, 8, 10]; оцінка пошкодження металу сталевих насосно-компресорних труб неруйнівним методом контролю якості [13, 24, 35, 52] та культиваторних лап [41, 51, 58]; аналіз впливу структурно-механічних факторів на корозійну пошкоджуваність насосно-компресорних труб в умовах вуглекислотної свердловинної корозії [34]; визначення товщини захисних оксидних плівок, формуємих при терті [12, 54]; вплив вуглецевмісної шихти на підвищення стійкості пластичного мастила для різьбових з'єднань [9, 14, 36, 55]; розробка технології дозованого введення наноалмазів при наплавленні вуглецевим дротом [5, 11, 23, 25, 32, 33]; аналіз властивостей робочого шару деталей при наплавленні та введенні вуглецевмісних домішок [28, 38, 42, 46, 48, 50, 56]; дослідження характеру зношування культиваторних лап [2, 27]; аналіз

способів виготовлення, зміцнення та відновлення лап [15]; аналіз параметрів вібраційного зміцнення культиваторних лап [37, 53]; аналіз напруженого стану стрілчастих лап культиваторів [6, 27] та розробка бракувальних норм [19]; застосування детонаційної шихти для модифікування покриттів [22, 47] та глини [17, 20] для підвищення стійкості відновлювальних покриттів робочих органів ґрунтообробних машин; технологія зміцнення лап наплавленням спеціальними смугами [43, 57]; результати експериментів по електронній мікроскопії і вивчення змін на поверхні тертя [21]; розробка технології модифікування рідкого розчину при відновленні виробів з чавунів вторинною сировиною [29, 30]; застосування неруйнівного методу контролю [59, 61, 62]; дослідження структури відливок [60, 63]; вихідні дані та розрахунки економічної ефективності [64]; участь у підготовці монографії [1], проводив теоретичні та експериментальні, промислові дослідження [18-22, 53-58].

Апробація результатів досліджень. Основні положення і результати дисертаційної роботи розглядалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на багатьох міжнародних науково-технічних та практичних конференціях у період 2014-2021 р.р.: Міжнародна наукова сесія «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (Харків: ХНТУСГ, березень 2015-2017 р.р.); Інформаційно-аналітичний міжнародний технічний журнал «Промисловість в фокусі» (м. Харків, 2014-2021р.р.); Міжнародна науково-практична конференція «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК» (Мінськ: БГАТУ, 4-6 червня 2014 р.); VIII Міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 20-22 травня 2015 р.); X Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кіровоград: КНТУ, 20-22 квітня 2016 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарської техніки» (Харків: ХНТУСГ, 11-12 травня 2017 р.); 9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies (Kyiv: PWI NASU, 23-26 May 2017); VII Всеросійська науково-практична Міжнародна

конференція «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (Рубцовськ: РІІ, 27-28 жовтня 2017 р.); Всеукраїнська науково-практична конференція «Оптимізація технічних та технологічних систем агровиробництва» (Харків: ХНТУСГ, 18-19 квітня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Мінськ: БГАТУ, 24-25 жовтня 2019 р.); Міжнародна науково-методична конференція «Проблеми надійності машин» (Харків: ХНТУСГ, 12-13 листопада 2019 р.); VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Крамаровські читання» з нагоди 114-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (Київ: НУБіП, 20-21 лютого 2021 р.); XVI International Scientific and Practical Conference «Science and society, patterns and trends of development» (Vienna, Austria, March 30-April 02, 2021); XIX International Scientific and Practical Conference «Applied and fundamental scientific research» (Brussels, Belgium, April 08- 09, 2021); XXII International Scientific and Practical Conference «Interaction of society and science: prospects and problems» (London, England, April 20-23, 2021.); XXIV International Scientific and Practical Conference «About the problems of practice, science and ways to solve them» (Milan, Italy, May 04-07, 2021).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 64 наукових працях, в тому числі: 17 статей в спеціалізованих наукових виданнях України і 9 – у закордонних виданнях (з них включені до міжнародних наукометричних баз: SCOPUS [19, 22], Web of Science [21]); 29 – в інших виданнях закордонних та України (з яких 1 монографія); отримано 9 патентів України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи викладено на 348 сторінках, у тому числі 10 додатках на 56 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 258 сторінок, має 111 рисунків і 52 таблиці. Список використаних джерел нараховує 309 найменувань на 34 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МОДИФІКУЮЧИХ ДОМІШОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВИРОБІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі розглянуто два методи використання модифікуючих домішок для підвищення експлуатаційних властивостей різьбових з'єднань і зміцнення деталей сільськогосподарської техніки відновлюючими покриттями.

1.1 Аналіз нормативно-технічної документації на виробництво насосно-компресорних труб (НКТ), причини відмов і методи підвищення їх експлуатаційної стійкості

Зі зростанням світового попиту на енергоносії перед компаніями нафтогазової галузі відкривається широкий спектр можливостей і, у той же час ризиків, у сегментах розвідки й видобутку нафти й газу, переробки, транспортування й збуту продукції. Основною складовою будь-якого добувального устаткування для нафтових свердловин, газопроводів, а також для здійснення ремонтних і спуско-піднімальних робіт є насосно-компресорні труби (рис. 1.1).

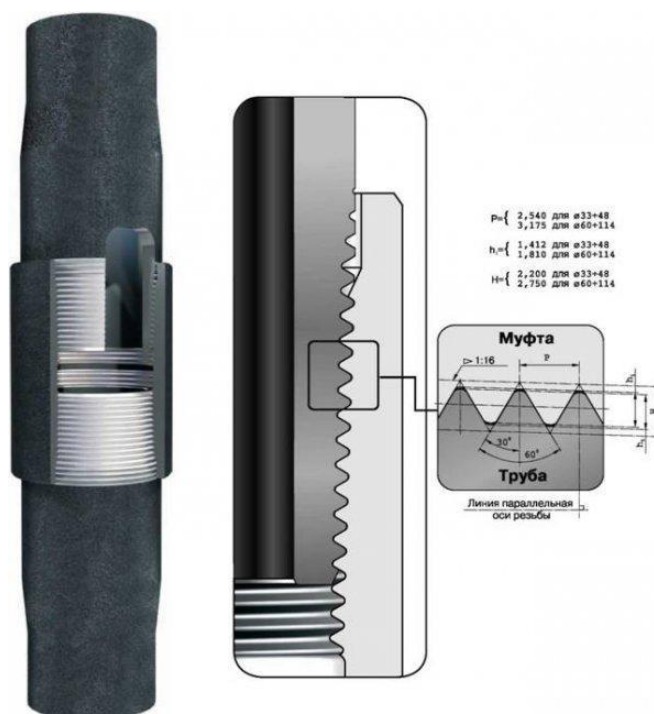


Рисунок 1.1 – Різьбове з'єднання насосно-компресорних труб (НКТ)

У цей час експлуатаційні служби нафтових і газових родовищ усе більше уваги приділяють ремонту трубопроводів. Це пов'язане, насамперед, з їхньою недостатньою стійкістю. Тому, виходячи з економічних причин, важливим є не придбання й транспортування нових труб, що збільшує собівартість видобутку, а розробка методів підвищення їх стійкості в експлуатації.

Виконаний аналіз нормативно-технічної документації по використанню НКТ із різних марок сталей.

У вітчизняному виробництві це ГОСТ 633 «Труби насосно-компресорні й муфти до них. Технічні умови» і РД 39-014714-86 «Інструкція з експлуатації насосно-компресорних труб» [1-4].

Також виявлено більш 30 нормативних документів на виробництво продукції для компонування НКТ різними фірмами. Труби, які використовують в Україні, мають близький хімічний склад (табл. 1.1 – 1.4 і 1.5 – 1.8).

Особливістю труб закордонного виробництва є обмеження ряду компонентів і, у першу чергу Р і S, а також підвищений вміст хрому й молібдену (марка L80).

Таблиця 1.1 – Сортамент насосно-компресорних труб у відповідності з ГОСТ 633 [1]

Діаметр труби, мм	Товщина стілки, мм	Тип труби			
		гладка	с висадженими назовні кінцями - В	гладка високо- герметична - НКМ	безмуфтова з висадженими назовні кінцями - НКБ
27	3,0	-	ДКЕ	-	-
33	3,5	ДКЕ	ДКЕ	-	-
42	3,5	ДКЕ	ДКЕ	-	-
48	4,0	ДКЕ	ДКЕ	-	-
60	5,0	ДКЕ	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР
73	5,5	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР
	7,0	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР
89	6,5	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР
	8,0	-	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР
102	6,5	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР
114	7,0	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР	ДКЕЛМР

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталей для виготовлення НКТ відповідно до ГОСТ 633 [1]

Механічні властивості	Група міцності сталі						
	Д		К	Е	Л	М	Р
	виконання						
	А	Б					
Границя міцності на розрив σ_B , МПа, не менше	655	638	687	689	758	823	1000
Границя плинності σ_T , МПа, не менше не більше	379	373	491	552	654	724	930
	552	-	-	758	862	921	1137
Відносне подовження δ_5 , %, не менше	14,3	16,0	12,0	13,0	12,3	11,3	9,5

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сталей, згідно вимог РД 39-014714-217-86 [2]

Марка сталі	Вміст компонентів, %										Термообробка
	С	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si	Cr+Ni+Cu	
Н-40	0,27-0,37	0,7-1,0	-	-	-	-	0,04	0,06	-	-	-
J-55	0,37-0,47	0,8-1,0	-	-	-	-	0,04	0,06	-	-	-
С-75-1	0,50	1,90	0,15-0,40	-	-	-	0,04	0,06	0,45	До 0,50	Нормалізація й відпуск
С-75-2	0,43	1,50	-	-	-	-	0,04	0,06	0,45	-	Загартування й відпуск
С-75-3	0,38-0,48	0,75-1,0	0,15-0,25	0,8-1,1	-	-	0,04	0,04	-	-	Нормалізація й відпуск
L-80	0,43	1,90	-	-	0,25	0,35	0,04	0,06	0,45	-	Загартування й відпуск
N-80	0,37-0,48	1,4-1,7	0,15	-	-	-	-	-	-	-	Нормалізація
С-95	0,45	1,90	-	-	-	-	0,04	0,06	0,45	-	Загартування й відпуск
P-105	0,37-0,45	0,6-0,8	0,25	0,80	1,80	-	-	-	-	-	Нормалізація й відпуск

У роботах [5-7] запропонований матеріал і технологія виробництва насосно-компресорних і обсадних труб з низько- і середньовуглецевих сталей, легованих марганцем і мікролегованих ніобієм або ванадієм (48Г2БМ або 48Г2ФМ відповідно). Для підвищення експлуатаційних властивостей автори розробок рекомендують використання контрольованої прокатки зі спеціальним охолодженням труб у багатоклітьовому стані, а також термомеханічну їх обробку [8-10]. У результаті

досліджень запропонована сталь для труб групи міцності Д, яка містить у якості основних компонентів 0,43-0,46% С, 0,74-0,76 Мп. Товстостінні труби (13мм) групи міцності Е діаметром 101,6мм рекомендується виготовляти зі сталей марок 37ХГФМ і 37ХГФБМ, оскільки сталь 48Г2БМ має підвищену схильність до зниження пластичності через появу в структурі бейнітної складової.

Таблиця 1.4 – Механічні властивості сталей, що наведені в РД 39-014714-217-86 [2]

Показники	Марки сталі						
	H-40	J-55	N-80	P-105	C-75	L-80	C-95
Границя плинності, МПа не менше	275	379	552	723	516	552	654
не більше	-	552	758	930	620	654	758
Границя міцності на розрив, МПа не менше	413	516	689	827	654	654	723

Показано, що рекомендовані марки сталей у процесі виробництва труб слід піддавати прискореному (спрейерному) охолодженню у валках редуційного стану шляхом уповільненої швидкості їх обертання [5-7].

Отримані результати досліджень базувалися на закономірностях взаємозв'язку параметрів структури металу: морфології феритних зерен, оцінки частки структурних складових (фериту, перліту, карбідів, бейніту), а також мінливості щільності дислокацій і механічних властивостей.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад сталей N -80 у НКТ, виготовлених фірмою

«Voestalpine Tubulars gmbh&Co KG H»

№	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
1	0,3060	0,1980	1,3450	0,0127	0,0129	0,2770	0,0450	0,0700
2	0,3003	0,1840	1,3070	0,0152	0,0141	0,2460	0,0410	0,0107
3	0,2986	0,1910	1,3300	0,0101	0,0119	0,2510	0,0340	0,0113
4	0,2990	0,1910	1,3000	0,0060	0,0130	0,2500	0,0700	0,0240
5	0,2894	0,1910	1,3120	0,0062	0,0099	0,2670	0,0230	0,0084
6	0,3025	0,1910	1,3150	0,0124	0,0107	0,2540	0,0360	0,0081
7	0,3015	0,2060	1,3300	0,0110	0,0103	0,2490	0,0350	0,0285
8	0,3027	0,1940	1,3490	0,0108	0,0078	0,3230	0,0390	0,0352

Продовження таблиці 1.5

№	V	Cu	Ti	Al	Sn	Nb	B
1	0,0020	0,0890	0,0021	0,0292	0,0055	0,0036	0,0003
2	0,0016	0,0830	0,0016	0,0210	0,0058	0,0023	0,0003
3	0,0012	0,0740	0,0022	0,0256	0,0046	0,0016	0,0004
4	0,0010	0,0400	0,0015	0,0173	0,0030	0,0010	0,0005
5	0,0010	0,0210	0,0015	0,0272	0,0020	0,0012	0,0005
6	0,0013	0,0620	0,0017	0,0218	0,0039	0,0014	0,0005
7	0,0014	0,0640	0,0022	0,0301	0,0042	0,0022	0,0005
8	0,0017	0,0520	0,0019	0,0199	0,0040	0,0021	0,0005

Таблиця 1.6 – Хімічний склад сталей для виготовлення НКТ у відповідності зі стандартом API Spec 5CT [3]

Марка	Тип	Зміст компонентів, %												
		C		Mn		Mo		Cr		Ni max	Cu max	P max	S max	Si max
		min	max	min	max	min	max	min	max					
N80	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,030	0,030	-
N80	Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,030	0,030	-
M65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,030	0,030	-
L80	1	-	0,43	-	1,90	-	-	-	-	0,25	0,35	0,030	0,030	0,45
L80	9Cr	-	0,15	0,30	0,60	0,90	1,10	8,00	10,0	0,50	0,25	0,020	0,010	1,00
L80	13Cr	0,15-	0,22	0,25	1,00	-	-	12,0	14,0	0,50	0,25	0,020	0,010	1,00
P110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,030	0,003	-

Таблиця 1.7 – Механічні властивості сталей для виготовлення НКТ у відповідності зі стандартом API Spec 5CT [3]

Марка	Тип	Відносне подовження, %	Границя плинності, МПа		Границя міцності на розрив, МПа	Максимальна твердість		Товщина стінки, мм	Припустимі відхилення твердості
			min	max		HRC	HBW/HBS		
N80	1	0,5	552	758	689	-	-	не застережене	не застережене
N80	Q	0,5	552	758	689	-	-	-	-
M65	-	0,5	448	586	586	22	235	-	-
L80	1	0,5	552	655	655	23	241	-	-
L80	9Cr	0,5	552	655	655	23	241	-	-
L80	13Cr	0,5	552	655	655	23	241	-	-
P110	-	0,6	758	965	862	-	-	-	-

Таблиця 1.8 – Сортамент НКТ у відповідності зі стандартом API Spec 5CT [3]

Зовнішній діаметр D, мм	Номинальна погонна маса			Товщина стінки t, мм	Тип виготовлення труби						
	Без вигладження T&C, кг/м	Із зовнішнім вигладженням T&C, кг/м	Замок, кг/м		H40	J55	L80	N80 Тип 1, Q	C90	T95	P110
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
26,67	1,70	1,79	–	2,87	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	–
26,67	12,20	2,29	–	3,91	PU	PU	PU	PU	PU	PU	PU
33,40	2,53	2,68	2,56	3,38	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	–
33,40	3,26	3,33	–	4,55	PU	PU	PU	PU	PU	PU	PU
42,16	–	–	3,13	3,18	PI	PI	–	–	–	–	–
42,16	3,42	3,57	3,47	3,56	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	–
42,16	4,51	4,57	–	4,85	PU	PU	PU	PU	PU	PU	PU
48,26	–	–	3,57	3,18	PI	PI	–	–	–	–	–
48,26	4,09	4,32	4,11	3,68	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	–
48,26	5,43	5,55	–	5,06	PU	PU	PU	PU	PU	PU	PU
48,26	6,58	–	–	6,35	–	–	P	–	P	P	–
48,26	7,66	–	–	7,62	–	–	P	–	P	P	–
52,40	–	–	4,84	3,96	PI	PI	PI	PI	PI	PI	–
52,40	–	–	–	5,72	P	P	P	P	P	P	P
60,32	5,95	–	–	4,224	PN	PN	PN	PN	PN	PN	–
60,32	6,85	6,99	–	4,83	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
60,32	8,63	8,85	–	6,45	–	–	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
60,32	9,82	–	–	7,49	–	–	P	–	P	P	–
60,32	10,94	11,09	–	8,53	–	–	PU	–	PU	PU	–
73,02	9,52	9,67	–	5,51	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
73,02	11,61	11,76	–	7,01	–	–	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
73,02	12,80	12,95	–	7,82	–	–	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
73,02	13,91	14,06	–	8,64	–	–	PU	–	PU	PU	–
73,02	15,63	–	–	9,96	–	–	P	–	P	P	–
73,02	17,11	–	–	11,18	–	–	P	–	P	P	–
88,90	11,46	–	–	15,49	PN	PN	PN	PN	PN	PN	–
88,90	13,69	13,84	–	6,45	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
8,90	15,18	–	–	7,34	PN	PN	PN	PN	PN	PN	–
88,90	18,90	19,27	–	9,52	–	–	PNU	PNU	PNU	PNU	PNU
88,90	21,28	–	–	10,92	–	–	P	–	P	P	–
88,90	23,07	–	–	12,09	–	–	P	–	P	P	–
88,90	25,30	–	–	13,46	–	–	P	–	P	P	–
101,60	14,14	–	–	5,74	PN	PN	PN	PN	PN	PN	–
101,60	–	16,37	–	6,65	PU	PU	PU	PU	PU	PU	–
101,60	119,64	–	–	8,38	–	–	P	–	P	P	–
101,60	123,96	–	–	10,54	–	–	P	–	P	P	–
101,60	28,13	–	–	12,70	–	–	P	–	P	P	–
101,60	33,04	–	–	15,49	–	–	P	–	P	P	–

Примітка: P – гладкі, N – не вигладжений кінець; U – вигладжений кінець.

Важливими напрямками підвищення корозійної стійкості насосно-компресорних труб автори робіт [11-13] бачать наступні: вплив на середовище й умови експлуатації; вплив на метал.

В умовах нафтовидобутку до першого напрямку ставиться процес інгібування. Інгібітори здатні змінювати кінетику електрохімічних реакцій при експлуатації труб у корозійному середовищі. Цей метод вимагає капітальних вкладень у будівництво додаткових вузлів устаткування, експлуатаційних витрат, реагентів, контролю захисту.

Другий напрямок за даними авторів може бути реалізований шляхом захисту труб різними покриттями: полімерними, силікатно-емалевими, дифузійним цинкуванням. Такі технології забезпечують зниження схильності труб до корозійної й ерозійної пошкоджуваності, поліпшення герметичності різьбових з'єднань, ефективної експлуатації в інтервалі температур від -60 до $+350^{\circ}\text{C}$, а також підвищені показники міцності.

Разом з тим, як показує досвід, такі покриття часто піддаються різним механічним впливам, що супроводжуються пошкоджуваністю, та не виключає в цих зонах розвитку корозійних явищ.

Досвід світових лідерів компаній вказує на необхідність розробки й впровадження нових марок сталей. Так, компаніями Tenaris і Samitomo metal industries [14, 15] розроблені нові матеріали, що мають більш високі споживчі властивості, чим передбачені нормами API. Це сталь марки SM13CRM, яка має підвищену стійкість до пітингової корозії.

Запропонована сталь марки TN80HC, яка на 30-40% у порівнянні з іншими, забезпечує підвищення опору до зминання. Такі матеріали труб піддаються регламентованій термообробці й термомеханічній в процесі виробництва.

Інтенсивна пластична деформація скручуванням (ПДС) збільшує зносостійкість різьбових з'єднань за рахунок формування нано- і субмікроструктур із середнім розміром зерен 50-300нм [16, 17]. Це сприяє підвищенню механічних властивостей. Разом з тим, ця технологія не виключає вібрацій у різьбових з'єднаннях при експлуатації труб.

Зміна зерна фериту збільшує стабільний період експлуатації труб. Цього можна

досягти за рахунок модифікування й мікролегування низьковуглецевих сталей. Автори робіт [16, 17] припускають, що дефекти кристалічної будови (дислокацій) при редукуванні труби в процесі виробництва металу, яка перебуває в аустенітному стані, надалі закріплюються дисперсними частками карбідів MeC і успадковуються феритом. Причому, цей ефект визначається температурним інтервалом процесу редукування. Чим він нижче, тем більший досягається ефект, що сприяє високому рівню в'язкопластичних характеристик.

У представлених розробках також досліджений вплив змісту вуглецю, легуючих і мікролегуємих домішок, що забезпечують підвищену конструкційну міцність певних категорій і сортаменту насосно-компресорних труб (груп міцності Д, ДО, Е відповідно до ГОСТ 633). Це ферито-перлітна сталь типу 37ХГ (0,6% Сг; до 0,7% Мп і 0,4% Мо), модифікована домішками ванадію (до 0,08%) і ніобію (до 0,04%). При цьому, рекомендується здійснювати після прокатки спреєрне або повітряне охолодження труб.

Використання таких сталей особливо ефективно при збільшенні діаметра й товщини труб з 73,0 і 5,5мм до 101,6 і 13,0мм відповідно, тому що зі зміною їх геометричних параметрів відзначається зниження міцнісних характеристик металу.

У роботі [18] виконаний аналіз експлуатаційної стійкості устаткування нафтогазової галузі. Показано [19, 20], що вона серед інших займає провідне місце за чисельністю аварій і руйнувань устаткування свердловин, до яких належить корозійно-ерозійне пошкодження трубопроводів. Витрати на ліквідацію аварій досягають 30% від видобутку газу й нафти [21, 22]. Найбільша пошкоджуваність насосно-компресорних труб (НКТ) пов'язана з корозією, пошкоджуваністю різьби й втомними руйнуваннями. Згідно даним статистики, кількість аварійних ситуацій у ряді випадків досягає 80% від загального числа відмов. При цьому, найбільша частка аварій припадає на різьбові з'єднання (втрата герметичності, руйнування, корозія), яка досягає 55%. До інших відмов [18] належать: відкладання смол – 11%, обриви підвісного патрубку або перехідника – 6%, руйнування по тілу муфти – 11%, труби 12% і до 10% – інші.

Виходячи з такого аналізу впливає, що основний напрямок підвищення

експлуатаційної стійкості устаткування повинен бути сконцентрований на підвищенні довговічності й надійності різьбових з'єднань.

Відомо різні способи покриттів для захисту труб і різьбових з'єднань у Росії (НК Лукойл, «Татнефть», «ТНК - ВР», «Роснефть», а також Трубна металургійна компанія (ТМК) і Об'єднана металургійна компанія (ОМК) – основні виробники труб такого сортаменту). Для захисту НКТ від корозії використовують покриття (полімерні, стеклоемалеві й інш.). Їх наносять на внутрішню поверхню труб. Разом з тим встановлено, що це не вирішує кардинально проблему підвищення їх експлуатаційної стійкості, оскільки мають місце порушення якості покриттів – їх відколи, тріщини й в ряді випадків відзначається відсутність зміцнення на різьбі труб і муфт. У зв'язку із цим автори роботи [18] запропонували спосіб термохімічного дифузійного цинкування цих зон у колонах труб. Термохімічним дифузійним цинкуванням на основі залізоцинкового сплаву рекомендується зміцнювати як внутрішню, так і зовнішню поверхню різьбових з'єднань. Таке покриття не схильне до старіння, має високу твердість, зносостійкість і забезпечує достатню міцність зчеплення з основою. Складова покриття – цинк забезпечує пластичність, що виконує роль твердого мащення.

Порівняльні лабораторні випробування корозійної стійкості сталі 20, найбільш часто використовуваної для виготовлення різних труб, показали, що вона при нанесенні такого покриття суттєво зростає (табл. 1.9).

Дослідженнями мікротвердості металу НКТ груп міцності Д, Е и Р110 (розмір труб 73x5,5 мм) також показано, що при випробуваннях в агресивному середовищі (5% NaCl+0,5%CH₃COOH, насиченому H₂S, pH≤3,5) при T=297K її рівень змінюється незначно, тобто не відбувається істотної деградації покриття, хоча в ряді випадків вона підвищується до 10% і крім того, має нестабільні показання (твердість змінюється в широких межах від 317 до 489 НВ).

За даними розробників таке зміцнення забезпечує підвищення терміну служби колони в 2-3 рази.

Разом з тим, залишається так само незрозумілим, у яких зонах колони ефективно робити зміцнення з'єднань.

Таблиця 1.9 – Порівняльні дані корозійної стійкості сталі 20 без покриття

й з – дифузійним цинковим

Середовище випробувань	Швидкість корозії, г/(м ² ·год)		Співвідношення швидкостей корозії
	сталь 20	дифузійно оцинкована сталь	
Потік вологого стисненого повітря, що подавався в нафтову свердловину	0,048	0,002	24
Пластова вода, що містить 500мг/л H ₂ S	5,21	0,0565	92
Морські нафтопромисли (змінне змочування по ватерлінії, приплив повітря, вода з підвищеним солемістом)	0,30	0,005	60
Системи гарячого водопостачання в ЖКГ	0,0923	0,0022	42
Технічна вода на нафтопереробних і коксохімічних заводах	Швидкість корозії 0,2 мм на рік	Швидкість корозії 0,04 мм на рік	5

Примітка: Сталь 20 наведена як найбільш часто використовувана для виготовлення труб й інших виробів. Час випробувань не менш 1 року.

Виявлені технології розробок, які спрямовані на підвищення стійкості трубопровідної запірно-регулюючої арматури, з погляду підходів до використання матеріалів і методів зміцнення значною мірою себе вичерпали. Для довгочасної роботи таких поверхонь важливими є антифрикційні властивості в поверхнях, що з'єднуються, з низьким коефіцієнтом тертя. У цьому випадку найбільш ефективними можуть виявитися пластичні мастильні покриття з різними домішками, які можуть експлуатуватися в середовищі, без постійного вносимого мащення. Це такі як SiO₂ і SiC [23, 24]. Одним з основних дефектів їх пошкоджуваності є схоплювання. Для його зниження рекомендується використовувати нанесення неметалевих покриттів, підвищення твердості поверхні, зниження коефіцієнта тертя, добір матеріалів у сполучення й інш.

Дуже важливо в період приробляння сполучення забезпечити мінімальне зношування, тобто використовувати таку обробку робочої поверхні, щоб його

мінімізувати вже на початковій стадії. Це дозволить ефективно використовувати й тонкоплівкові покриття.

У роботі [23] відзначається, що такі фінішні плазмові покриття підвищують зносостійкість, відрізняються хімічною інертністю, високою твердістю (34 ГПа), низьким модулем пружності (160 ГПа), жаростійкістю, низьким коефіцієнтом тертя, що перешкоджають розвитку термовтоми, і це сприяє формуванню в підплівковому шарі основи стискаючих залишкових напружень.

У роботах [25, 26] відзначається, що для підвищення зносостійкості різьбових з'єднань насосно-компресорних труб, які виходять з ладу, у першу чергу, вирішення цієї проблеми автори бачать у нанесенні зносостійких покриттів методом повітряно-плазмового напилення. Для покриттів рекомендують використовувати порошкові матеріали з розміром часток менше 50 мкм. В якості порошкового матеріалу можна застосовувати цинк (склад Z-00-11) або мідь (склад С-01-01). Можливе застосування і порошкової суміші цих металів (склад С-01-11).

Перед нанесенням покриттів різьбові з'єднання піддавали струмино-абразивній обробці порошком корунду з величиною зерна № 40 за ДСТ 3647, забезпечуючи активацію поверхні. Для ефективного використання цього методу автори розробки оптимізували основні параметри технологічного процесу: струм дуги плазматрона, напруга на дузі, витрата плазмоутворюючого газу, дистанцію напилення, швидкість переміщення плазматрона по обертовій трубі, кут між потоком напилювальних часток і віссю труби.

Зносостійкість покриттів оцінювали по стендовим випробуванням, що імітують згвинчування труб. Випробування показали підвищення стійкості в 10-13 раз для покриттів ПН 55Т45 і ПГ-19Н-01 [25, 26].

У роботі не зазначено, яку поверхню зміцнювали: зовнішню або внутрішню. Крім того, немає інформації про конкретне випробування цього методу в експлуатації та яких деградаційних процесів зазнає метал під навантаженням при такому зміцненні.

Як було показано в роботах [27, 28], найважливішим у розумінні процесів, що розвиваються, є встановлення залежності між умовами навантаження виробу й

змiнами його структури в експлуатації.

У низьковуглецевих ферито-перлітних сталях, за даними цих авторів, основою матриці є феритна складова, відрізняється високою пластичністю й низькою міцністю. Тому процеси скупчення ушкоджень відбуваються при низьких напругах ($\sigma_{0,2} = 265$ МПа).

Міцнісні властивості в таких сталях досягаються здрібнюванням зерна й зростанням частки цементиту перліту. Однак, для такої структури характерне зниження числа циклів на стадії живучості з наявністю тріщини.

Для підвищення довговічності й зниження чутливості до концентрації напружень автори [28] рекомендують використання сталей з формуванням у перліті орієнтованого низьковуглецевого мартенситу або аустеніту, що сприяють релаксації напружень.

Такий підхід, цілком ймовірно, не буде ефективним для НКТ через значно високі навантаження, крім того, феритна складова завдяки високій пластичності так само може поводитися при навантаженні подібним чином. Відомо, що при навантаженні або локалізації деформацій аустеніт і мартенсит розпадаються з формуванням карбідо-феритних або бейнітних структур.

Виявлена інформація про розвиток втомної пошкоджуваності в трубопроводах [29-31], яка показує, що міцнісні властивості згодом експлуатації ростуть, а опірність до крихкого руйнування й корозії знижуються.

Дослідженнями, проведеними на вуглецевих і низьколегованих сталях міських і магістральних трубопроводів, було показано, що при тривалій експлуатації пластичність їх знижується на 8-10%. Цей ефект автори роботи рекомендують зменшити відпалом сталі в інтервалі $t = 600-650^{\circ}\text{C}$. Провідний механізм втомної пошкоджуваності пов'язаний з розвитком деградаційних явищ: дробленням карбідів, дифузією вуглецю й зміною дислокаційної структури. Разом з тим, у роботі не наводяться експериментальні дані, що підтверджують такі висновки.

Стабільність міцнісних властивостей низьковуглецевої сталі при експлуатації суттєво залежить від частки карбідної складової в перліті. У роботі [31] розпад цементиту оцінювали при значному ступені деформації. При цьому в процесі

експлуатації трубопроводів пластична деформація виявлена лише по границях зерен і поблизу дефектів. Тривале використання трубопроводів викликає помітну деградацію металу [32].

У роботі [33] вивчали деградацію металу трубопроводів, які використовували в період 42 років у порівнянні з металом до експлуатації. Методами рентгеноструктурного аналізу й електронної мікроскопії проведений зіставний аналіз перлітної складової в сталі 20, де її частка не перевищувала 15%. У вихідному стані структура являє собою пластинчастий перліт і ферит. Після тривалої експлуатації феритна складова зберіглася, а цементит перліту зруйнувався (роздробився на окремі фрагменти), у результаті чого, за даними авторів, атоми вуглецю дифундували до границь зерен, зформували зародки нових карбідних часток. Кількість цементиту, що розпався, оцінено методом рентгенівського аналізу й склало ~30% у порівнянні з вихідним. У проведених дослідженнях автори роботи [33] не оцінювали стан феритної складової, зміни властивостей якої також вносить істотний вклад у деградацію металу трубопроводів.

У роботах [34-38] аналізується деградація механічних властивостей і параметрів опору руйнуванню ферито-перлітних і перлітних сталей при тривалій експлуатації трубопроводів. Такі умови експлуатації приводять до зниження механічних властивостей металу й окрихчування через зміни структурного стану внаслідок впливу напружень корозійного робочого середовища й газів. У цих умовах можливим стає пошкодження навіть при напруженнях, що не перевищують припустимі, відповідно діючій нормативно-технічній документації. Відзначається, що при тривалій експлуатації таких матеріалів можуть протікати процеси старіння, мікродеформацій, накоплення локальних мікронапружень і дефектів, а також відбуватися розвиток електрохімічної корозії.

У цих дослідженнях зроблена спроба узагальнити виявлені закономірності й механізми деградаційних явищ для їх використання при прогнозуванні експлуатаційної надійності різних сталевих конструкцій.

У результаті аналізу було встановлено, що існують загальні й, разом з тим, специфічні фактори, що визначають ступінь деградації металу ферито-перлітної

сталі. Показано, що експлуатація ферито-перлітних сталей незначно позначається на зміні стандартних механічних властивостей, але знижує параметри опору руйнуванню за рахунок високої чутливості до локальних структурних змін. Зі збільшенням напружень при експлуатації деградаційні процеси зростають і одночасно знижується схильність до руйнування за рахунок зменшення рухливості дислокацій.

Доевтектоїдні сталі, які використовують для виготовлення труб різного призначення, зазнають деградації металу при експлуатації в умовах дії навантажень, підвищеної температури, корозійного середовища. Процес деградації металу виробів характеризується подрібненням зерен твердої фази, збільшенням щільності дислокацій і їх упорядкуванням (формуванням локальних скупчень з утворенням стінок, сіток, на яких потім виділяються надлишкові компоненти – продукти розпаду цементиту, легованого карбиду або корозійного середовища). У випадку появи мікротріщин при експлуатації деталей в умовах корозії надлишковими фазами, що декорують зміну щільності й розподілу дислокацій, можуть бути азот, водень і кисень. Такі явища зміни щільності дислокацій можна спостерігати не тільки при експлуатації [39], але й при кристалізації виливків з високовуглецевих сплавів і у відновлених покриттях, де формуються локальні напруження у виробничих процесах [40, 41].

Закріплення й посилення ступеню виділення на дислокаціях надлишкових фаз при підвищенні температури експлуатації може привести до окрихчування. Однак, при регульованих процесах виробництва й експлуатації можна використовувати цей факт створення локальних напружень для виключення процесів термообробки, що важливо особливо для масивних виливків (масою більш 10т.), що виготовляються з різнорідних металів. Як приклад, можна привести відцентроволиті валки з робочим шаром з високолегованих чавунів і серцевиною – сірого [41].

У роботах [42-45] виявлений новий тип руйнування металевих матеріалів, який одержав назву «мимовільне перетворення металу в порошок» або інакше його називають «катастрофічною карбонізацією». Цей процес характерний для сплавів на основі заліза при $t=673-1173^{\circ}\text{K}$, що працюють у вуглецевмісних газових середовищах, у яких величина активності вуглецю (a_c) значно більше одиниці.

Досягаємі значення цього показника викликають появу грубих дефектів: рівномірній втраті металу, поява пітінгів. При цьому, процес деградації металу інтенсивно розвивається. Як відзначають автори, механізм пошкоджуваності відбувається за схемою 5 стадій: перенасичення металу вуглецем; виділення цементиту на поверхні й границях зерен; виділення графіту на поверхні включень цементиту; розпад цементиту з утворенням різних вуглецевмісних фаз, а також нанорозмірних металевих часток. Завершальний етап – подальше відкладання вуглецю з газової фази, каталізуєме металевими частками.

Авторами виконані зіставні дослідження з пошуку легованих сталей, стабільних до описаної деградації. На основі термодинамічних розрахунків показано, що такими є сталі типу Гатвильда, що містять 8,0-12,0% Mn. Вони стійкі до руйнування при впливі активних вуглецевмісних газових середовищ.

Оцінку деградації металу в роботах [46-49] вивчали на початковій стадії пошкоджуваності маловуглецевої сталі при деформації без урахування розвитку корозійної пошкоджуваності.

Розвиток деградації металу при деформації з накопиченням пошкоджуваності оцінювали в умовах одноосового розтягання. Для цього використовували структурно-чутливі металофізичні методи оцінки рівня локальної неоднорідності розподілу напружень у зонах їх зародження й розвитку.

Дослідженнями деформування зразків Ст. 3 виявлено чотири стадії пошкоджуваності: мікроплинності; накопичення дефектів; взаємодії дефектів; локального руйнування. Крім того, у недеформованих зразках була виявлена технологічна пошкоджуваність окремих зон шляхом формування в них локальних мікронапружень.

Аналіз досліджуваних параметрів дозволив описати розвиток деградації металу відповідно до чотирьох стадій її розвитку.

Так, на початковій стадії деградації – мікроплинності, відбувається деформація до 3%, де у твердому розчині зменшується концентрація атомів вуглецю й азоту. Вони закріплюють вільні дислокації, за рахунок чого, зростає кількість несучільностей і модуль пружності знижується на 15%.

На другій стадії має місце збільшення ступеню деформації від 3 до 6-8% і відбувається процес збільшення кількості рухливих дислокацій, і він превалює над їхнім блокуванням домішковими атомами. У цей період відзначається зменшення щільності дислокацій за рахунок їх взаємодії й відбувається «мікророзпушення» матеріалу.

На третій стадії напруга зростає від 8-10% до 13% і досягається баланс між кількістю атомів впровадження на дислокаціях і вільними. Формуються заблоковані групи скупчень дислокацій і в ході деформаційного впливу вони стають зонами концентрації напружень. Остання стадія характеризується рівнем напружень від 13 до 17-20% і відрізняється зростаючою енергією зв'язку дислокацій із домішковими атомами. У цей період, з-за більш твердого блокування дислокацій, починають зароджуватися й розвиватися мікротріщини.

Розглянуті роботи зі впливу ролі дислокаційної структури й дифузії компонентів, що приводять до їхнього блокування й можливості декорування й виявлення при спеціальному травленні з наступним описом такої структури оптико-математичним методом, дозволять виявити внесок не тільки від впливу напружень, але й корозійного середовища при експлуатації.

Утворення найбільш активних продуктів корозії – окислів, сульфідів заліза й інш. у НКТ і обсадних трубах є зони контакту їх металу з пластовою рідиною, що містить сірководень і вуглекислий газ [50-51]. При цьому, важлива роль у корозійних руйнуваннях усередині свердловинного устаткування приділяється й сульфатвідновлювальним бактеріям, тому що вони є каталізаторами електрохімічних процесів і це викликає деградацію металу.

Комплексними металографічними дослідженнями з використанням сучасного устаткування, а також спеціальними моделюючими методами показано [52], що розвиток сульфідної корозії можливий при концентрації сірководню 0,01%.

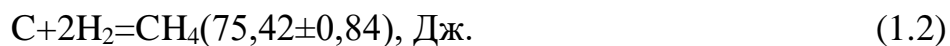
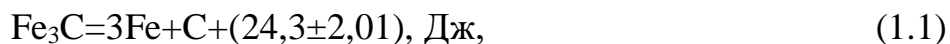
Сульфатвідновлювальні бактерії (СВБ) також сприяють тому, що на поверхні труби зароджуються відкладання у вигляді кірки темно-коричневого кольору й пухких горбків. Під шаром таких відкладень розвиваються пітінги (крапкова корозія). Деякі сульфідні включення можуть бути осередками утворення тріщин. В міру їх зростання

тріщини стають міжзеренними. Сульфатвідновлювальні бактерії розповсюджені у біосфері, особливо у різноманітних водоймах (*Desulfovibrio*, *Desulfococcus*, *Desulfobulbus*), заболочених ґрунтах, стічних водах (*Desulfotomaculum*), нафтових і газових родовищах [53-55].

Корозійно- механічні властивості НКТ залежать [50-52] від складу, форми виділень і кількості карбідних фаз.

Теоретична оцінка зміни частки перлітної складової у сталі за період експлуатації НКТ у період 8 років показала, що вона знижується на 25-30%.

Цементит, за даними [52], при впливу на нього атомів водню розкладає по реакціях:



Цей процес описують реакцією:



Атомарний водень виділяється при взаємодії сірководню з рідиною й металом устаткування:



Автор роботи [52] вважає, що структурна деградація металу НКТ визначається впливом активно-корозійного середовища й не розглядає процеси, що визначають розвиток локальних і зональних напружень, які відіграють найважливішу роль у розвитку пошкоджуваності.

Результати дослідження трубних сталей [56-58] показали, що їх корозія в сірководневмісному середовищі, яка супроводжується при експлуатації напруженнями, суттєво збільшує схильність до пошкоджуваності. Важливу роль відіграють і наявність шкідливих домішок – сірки й фосфору. У закордонних стандартах, як відзначалося раніше, їхня частка обмежена $\leq 0,012\%$, оскільки вони схильні до утворення неметалевих включень, які можуть бути концентраторами локальних напружень.

Причиною зниження стійкості трубних низьковуглецевих і низьколегованих сталей може бути наявність у них силікатів та мікроліквація легуючих компонентів

або домішок, а також порушення термомеханічних параметрів виробництва.

Знизити аварійні ситуації при обслуговуванні труб різного призначення при їх експлуатації можуть методи неруйнуючого контролю якості.

Виявлена велика кількість публікацій щодо впливу механічних напружень на магнітні властивості електротехнічних сталей і кременистого заліза [56-66].

Що стосується трубних сталей, то така інформація досить обмежена. Великий внесок у розвиток методики проведення вимірів неруйнівного контролю якості магнітним методом по коерцитивній силі й створенню устаткування вніс керівник фірми «Спеціальні Наукові Розробки» Безлюдько Геннадій Якович [67-72].

У роботі [73] розглядали можливість контролю якості трубної сталі по неруйнівному контролю з урахуванням їх структурно-чутливих параметрів (фізичних і механічних властивостей). Аналізували сталь 17Г1С, у якій виявили наявність структурних відхилень без видимих ознак дефектів. Металографічний аналіз таких зон [74] і оцінка рівня механічних властивостей показали необоротні зміни, які після тривалого строку експлуатації виявили локальну неоднорідність, що дозволяє прогнозувати залишковий ресурс трубопроводів і діагностувати технічний стан устаткування [75, 76]. У роботах [77, 78] рівень напруженого стану сталевих конструкцій оцінювали по анізотропії показань коерцитивної сили: $\Delta H = H_{\perp} - H_{\parallel}$ [79].

У роботах [67-71] наведена оглядова оцінка загального стану й експертиза втоми металу нафтохімічних виробництв коерцитиметричним методом.

Разом з тим, у літературі відсутній аналіз структурної деградації металу НКТ контролем по коерцитивній силі.

1.2 Аналіз способів виготовлення, зміцнення й відновлення робочих органів сільськогосподарської техніки

У цей час у сільському господарстві для обробки ґрунту використовується велика кількість різноманітних ґрунтообробних знарядь (культиватори, посівні комплекси, сівалки, розпушувачі й ін.), із широко застосовуваними робочими органами – стрілчастими лапами [80-86]. Вони експлуатуються в умовах прямого

впливу абразивних часток і зазнають інтенсивного зношування з відповідною зміною їх геометричних розмірів [87-95].

Для підвищення працездатності й економічної ефективності експлуатації стрілчастих лап сільськогосподарської техніки використовують різні методи зміцнення, як на стадії металургійного виробництва заготовки для їх виготовлення, так і прийнятті конструктивних рішень в машинобудуванні.

Зношені й низькоякісні стрілчасті лапи значно знижують ефективність і якість проведених робіт, їх використання приводить до недотримання агротехнічних вимог, так як, ґрунтообробна техніка додатково простоє через заміну зношених стрілчастих лап. Усе перераховане в разі збільшує витрати по обробці ґрунту й значно знижує кількість одержуваної валової продукції. Для підтримки ґрунтообробних знарядь у працездатному стані підприємства з випуску запасних частин до сільськогосподарської техніки виготовляють велику кількість нових стрілчастих лап.

Способи виготовлення лап культиваторів із хвостовою частиною й двома крилами з лезами включають використання заготовки з листового матеріалу (сталь 65Г и 70Г, товщиною 6-8мм). Потім здійснюють їх нагрівання, попереднє формоутворення й остаточну їх обробку з формуванням леза. Для зміцнення іноді здійснюють наплавлення на ріжучу кромку зносостійкого матеріалу, а потім гнуття-калібрування, формування двох кріпильних отворів на хвостовій частині лапи. У ряді випадків піддають лапи термообробці. Усі основні дії дослідників і розробників спрямовані на вдосконалювання технології виготовлення лап. Наприклад, відомий спосіб [96], який для підвищення коефіцієнту матеріалу конструкції виробу, включає таку операцію як отримання зі смуги заготовки змінної товщини в поперечному перерізі, значення якої на заданій відстані від осі симетрії лапи визначають частка від ділення площі поздовжнього її перетину ідентичної по конфігурації лапи постійної товщини, рівної крилу. Для підвищення продуктивності формування двох отворів здійснюють формозміною в 2 стадії. На першій – видавлюють конічні частини отворів пуансонами з паралельно розташованими осями й конічними формотворними частинами, осі яких розташовані на пересічних прямих, з витисненням надлишкового обсягу металу по ходу переміщення пуансонів. На другій стадії пробивають квадратні

отвори паралельно розташованими пуансонами. Для зниження енергоємності наплавлення леза зносостійким матеріалом здійснюють після операції гнуття-калібрування, а потім проводять загартування з використанням тепла заготовки після наплавлення.

Автори [97] пропонують підвищення експлуатаційних характеристик одержуваних виробів здійснювати шляхом створення заданого профілю прокату металу в носовій і хвостовій частинах з використанням методу зниження трудомісткості виготовлення, на основі використання заготовки у вигляді ромба або квадрата постійної товщини. Потім здійснювати деформацію центральної частини шляхом сполучення однієї з діагоналей ромба або квадрата відповідно до напрямку прокатки. Формоутворення крил рекомендується здійснювати деформацією з одночасним формуванням лез шляхом перерозподілу металу, розташованого в зоні кутів при іншій діагоналі ромба або квадрата. Деформацію центральної частини культиваторної лапи рекомендується здійснювати з попереднім формуванням зони під кріпильні отвори. Перед деформацією центральної частини здійснюють обтискання кута під носову частину лапи, сполучаючи також відповідну діагональ ромба або квадрата з напрямком прокатки.

Відомо також [98] спосіб, у якому для економії металу, якості одержуваних виробів за рахунок підвищення їх експлуатаційних характеристик, продуктивності, стійкості оснащення, при деформації центральної частини заготовки з боку верхньої зони інструмента до носової частини прикладають зусилля, що гальмують бічне деформування металу до одержання його остаточної форми. При відтягненні крил з лезами формоутворення останніх здійснюють із утворенням фасок.

Розглянемо виробництво культиваторних лап, яке здійснюється з використанням сучасних технологій та устаткування в машинобудуванні. На стадії розробки рекомендоване застосування комп'ютерного моделювання, що дозволяє врахувати геометричні параметри й необхідні експлуатаційні властивості майбутнього виробу. Надалі, по вже готові 3D моделі виготовляють прес-форми й інше оснащення, а також керуючі програми для верстатів з ЧПУ. Все це дозволяє

забезпечити високу точність і якість виробу. Методика математичного моделювання може використовуватися й при оцінці ергономічних показників експлуатації техніки.

Питанню відновлення, зміцнення й підвищення ресурсу ґрунтообробних робочих органів присвячена велика кількість досліджень, частина з яких належить безпосередньо до робочих органів культиваторів.

Довговічність ріжучих деталей при їх виготовленні підвищують такими способами [99]:

- зміною хімічного складу матеріалу виробу;
- термічною обробкою;
- поверхневим хіміко-термічним зміцненням;
- наплавленням різними сплавами.

Для зміцнення ріжучих кромки деталей зі стовщеним лезом широко застосовують різні види їх наплавлення твердими сплавами [83-114].

Виробник культиваторних лап «Граніт» [115] при виготовленні застосовує високотехнологічний вид різання металу з використанням різних активних газів на сучасному верстаті ЧПУ (рис. 1.2). За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення моделюються 3D форми й штампи для стрілочастих лап, що випускаються (рис. 1.3). Для придання потрібних геометричних форм лапу культиватора формують гарячим штампуванням з використанням прес-форм спеціального виготовлення (рис. 1.4). Потім проводиться загартування струмами високої частоти, яке має значну перевагу в порівнянні зі стандартним загартуванням. Воно забезпечує підвищення й стабільність зміцнюємих характеристик (рис. 1.5).

Дана технологія використовує плазмове легування – найбільш перспективний метод поверхневого зміцнення. У відмінності від традиційних способів підвищення ресурсу культиваторних лап (наплавлення сормайтотом, індукційне загартування) цим методом досягається твердість понад 65 HRC, що забезпечує стійкість ріжучої кромки та її самозагострювання при експлуатації (рис. 1.6). Фінішною операцією є абразивна обробка. Абразивна обробка відбувається за допомогою високопотужної газодинамічної установки власної розробки. Після обробки на поверхню деталей

відразу ж наноситься порошкова фарба, що забезпечує гарну адгезію та якісний зовнішній вигляд.



Рисунок 1.2 – ЧПУ плазмове різання

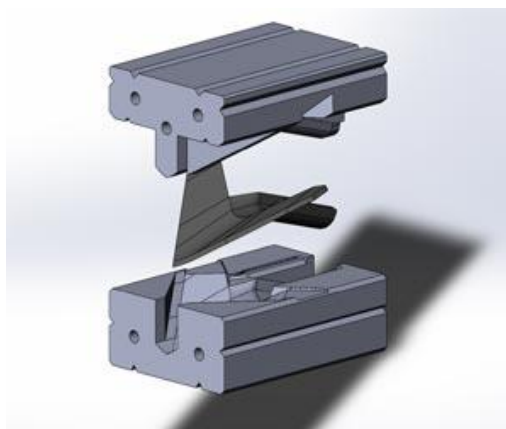


Рисунок 1.3 – Наскрізне 3D моделювання штамів і прес-форм



Рисунок 1.4 – Гаряче штампування на пресі



Рисунок 1.5 – Загартування ТВЧ з електронним керуванням



Рисунок 1.6 – Плазмове легування

Зовнішній вигляд і основні зони стрілкової лапи культиватора [116] представлені на рис. 1.7. До причин втрати працездатності стрілкових лап належать:

- затуплення лезвійної частини;

- зношування носка й крил по ширині на всю довжину;
- наявність деформацій і тріщин;
- злами;
- деформація площини.

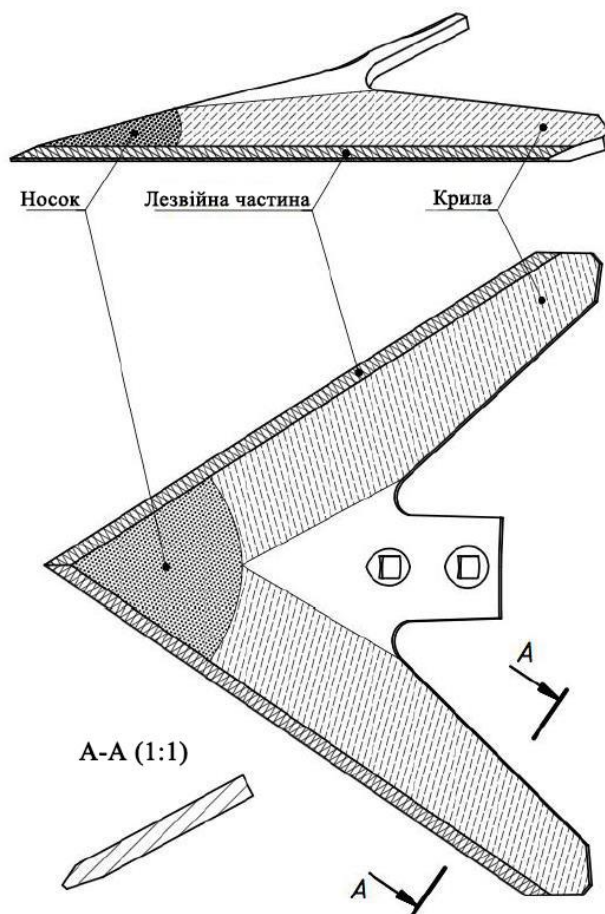


Рисунок 1.7 – Стрілчаста лапа культиватора

Близько 60% стрілчастих лап культиватора втрачають працездатність через граничне зношування лезвівної частини, носка й крил (рис. 1.8).

Для підвищення зносостійкості й ресурсу стрілчастих лап культиваторів існує велика кількість методів, серед яких можна виділити найбільш ефективні: загартування робочих органів з нагріванням ТВЧ і відпуском [117, 118]; газотермічним напиленням робочих органів порошками зносостійких сплавів [119]; застосування лазерного й плазмового модифікування поверхні робочих органів шляхом попереднього нанесення порошку зносостійкого сплаву [120].

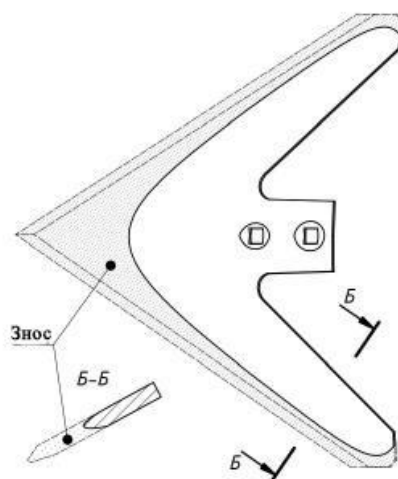


Рисунок 1.8 - Зношена лапа

Розглянемо деякі способи зміцнення культиваторних лап.

Для зміцнення стрілочастих лап широко використовують термічну обробку (загартування), яка може здійснюватися як на всю глибину лапти, так і з використанням струмів високої частоти на твердість не менш 40 HRC і глибину загартовування 1...2мм [121-124]. Однак істотного підвищення зносостійкості стрілочастих лап така термічна обробка не забезпечує.

Широко розповсюдженою технологією хіміко-термічної обробки (ХТО), застосовуваної для зміцнення ріжучих поверхонь стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь, є їх борування. При використанні даної технології отримують дифузійні зміцнюючі шари глибиною до 300...600мкм, що мають високу твердість, а також значну абразивну зносостійкість [125-128].

Зносостійкість таких робочих органів менше в порівнянні з деталями, виготовленими з легованих матеріалів.

Відомий спосіб швидкісного електродугового зміцнення (ЕДЗ) ріжучих поверхонь стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь. Сутність способу полягає в дифузійному насиченні зміцнюємої поверхні лапи вуглецем при горінні електричної дуги [129-131]. Спосіб ЕДЗ відрізняється високою продуктивністю й доступним устаткуванням. Разом з тим, швидкісне ЕДЗ забезпечує твердість поверхні, що зазнає зміцнення, не більш 55...56 HRC.

Газотермічне напилення (ГТН) дозволяє забезпечити великий термін служби робочих органів, скоротити час проведення робіт із зміцнення й знизити їх вартість [132]. При ГТН матеріал, що розпиляється у вигляді порошку або дроту подається в зону нагрівання. Газ розпиляє нагріті частки й надає їм прискорення в осьовому напрямку. У зоні нагрівання при подачі дроту газ, що розпиляє, диспергує розплавлений матеріал, у ряді методів ГТН він виконує й функцію нагрівання. Частки, що надходять на поверхню, мають більшу швидкість співударяння, утворюють міцні міжатомні зв'язки й створюють умови для адгезії матеріалу, що розпиляється, за рахунок активації поверхневого контакту.

Усі методи ГТН класифікують за видом використовуваної енергії й джерела теплоти. За видом енергії вони діляться на газоелектричні, у яких використовуються електроенергія й газополуменеві методи, де теплова енергія утворюється за рахунок згоряння горючих газів. Для нагрівання розпиляемого матеріалу використовують наступні види джерела теплоти: електричну дугу, плазму й газове полум'я.

Методи напилення називають дуговою металізацією, плазмовим, газополуменевим і детонаційно-газовим напиленням. До газоелектричних належать перші два методи, останні – до газополуменевих [133].

Застосування для зміцнення робочих органів лазерної термообробки в 1,5 рази знижує зношування в порівнянні з об'ємним загартовуванням. Лазерне наплавлення сплавом ПС-14-60 + 6% В₄С знижує зношування в 1,7-1,8 рази в порівнянні з індукційним загартовуванням [134].

Лазерні технології забезпечують локальне нагрівання з відсутністю мінімальних деформацій та охолодження за механізмом теплопровідності в глибину поверхневого шару виробу, як правило, без використання охолодного середовища. Одержати поверхневий шар з високими зносостійкими властивостями можливо, використовуючи високу швидкість нагрівання й охолодження 104-106°С/с.

Є дані експериментів щодо зміцнення лемешів плугів наплавленням частини, що зношується, електродом Т-590 і порошковим сплавом «Сормайт-1», які формують у структурі наплавленого шару карбідні включення, що підвищують мікротвердість і підвищений опір зношування [135, 136].

Відновлення деталей – технічно обґрунтований й економічно виправданий захід. Це дозволяє підприємствам скорочувати час простою, підвищувати якість технічного обслуговування й ремонту, позитивно впливати на поліпшення показників надійності й використання машин.

Розповсюдженими методами відновлення лап культиваторів є [137]:

- відтягнення зношених робочих органів, які в процесі обробки нагрівають до температури 800...1100°C й деформують на пневматичному молоті, після чого проводять заточення й необхідну термообробку;

- вирізання зношеної частини леза лапи газополуменевим різакром. Замість відрізаної частини виготовляють сталеву профільну пластину, як правило, зі сталі марки 65Г, яку приварюють суцільним швом до відновлюваної деталі.

Лапи з привареними пластинами або після відтягнення також піддають і наплавленню зносостійкими металевими порошками з нижньої сторони, що забезпечує одержання самогострювального леза.

Відомий спосіб відновлення стрілочастих лап культиватора [138] з одночасним зміцненням, що включає виконання відтягнення до відновлення нормованих розмірів, а з тильної її сторони формують запас металу в зоні носка й по довжині леза шляхом наплавлення електродом з одержанням необхідного об'єму компенсації зношеного металу. Це забезпечує відновлення номінальних розмірів лап, при цьому відтягнення лапи здійснюють гарячим деформуванням з використанням формотворного оправлення, що копіює форму носка й леза лапи, з наступним зміцненням загартуванням (рис. 1.9 і 1.10).



Рисунок 1.9 – Лапа з навареним запасом металу з тильної сторони

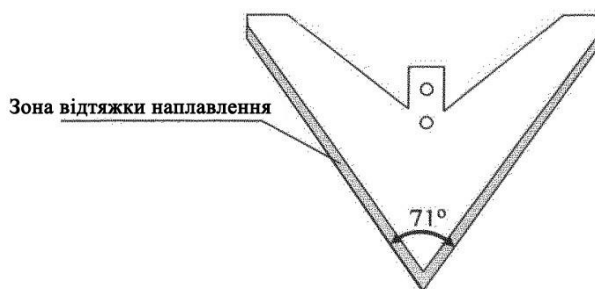


Рисунок 1.10 – Відновлена лапа

Раніше був розроблений спосіб відновлення стрілочастих лап 1 культиваторів (рис. 1.11) [139], що включає видалення зношеної робочої частини лапи шліфувальним відрізним колом, з подальшим виготовленням нової робочої частини 2 з середньовуглецевої сталі у вигляді змінної кутової пластини, яку заточують із утворенням леза й зміцнюють з тильної сторони. Перед зміцненням у ній виконують наскрізні продовгуваті отвори 3 для її переміщення по мірі зношування. На відновлюваній стрілочастій лапі культиватора також виконують різьбові отвори 4 для кріплення змінної кутової пластини за допомогою гвинтів 8 (рис. 1.11). Змінну кутову пластину піддають зміцненню з тильної сторони шляхом нанесення зносостійкого покриття в три шари, при цьому перший 5 і третій шари 7 одержують електроіскровим нанесенням зносостійкого сплаву, а другий шар 6 одержують електродуговою металізацією.

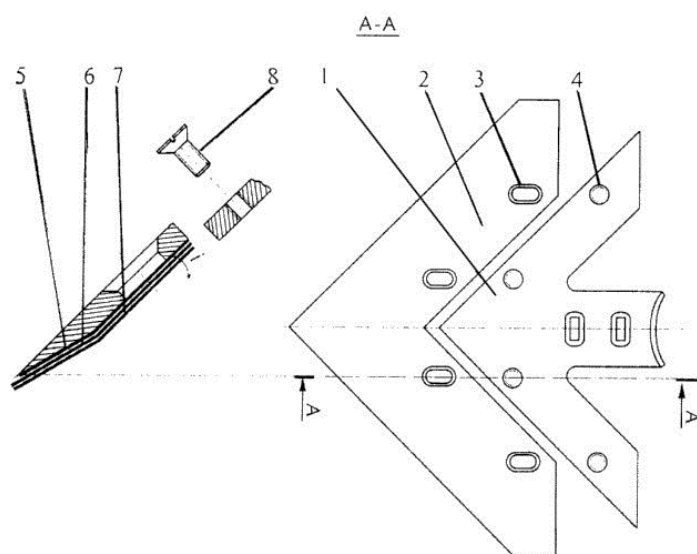
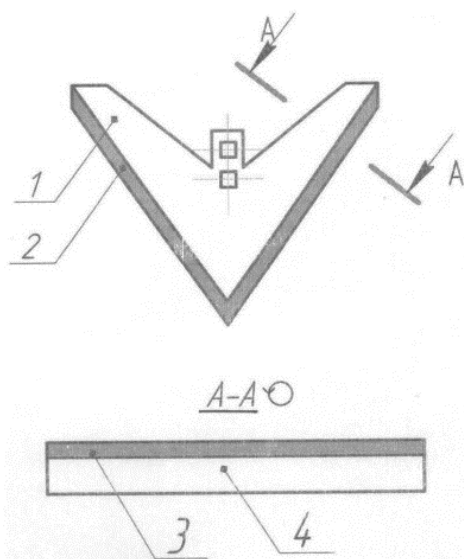


Рисунок 1.11 – Стрілчаста лапа культиватора зі змінною кутовою пластинуою, вигнутої за формою ріжучої частини з наскрізними продовгуватими отворами

Авторами роботи [140] розроблена схема зміцнення стрілчастої культиваторної лапи. Робочу поверхню леза рекомендується зміцнювати з тильної сторони комплексним термодформаційним впливом при пропусканні електричного струму великої щільності ($108-109 \text{ A/m}^2$) і низької напруги (2-6 В) через зону контакту деталі і деформуючого електрода-інструменту (ролика або пластини), що переміщається з подачею S , для забезпечення твердості робочої поверхні лапи, що перевищує твердість зовнішньої поверхні леза, і збереження її геометрії (рис. 1.12).

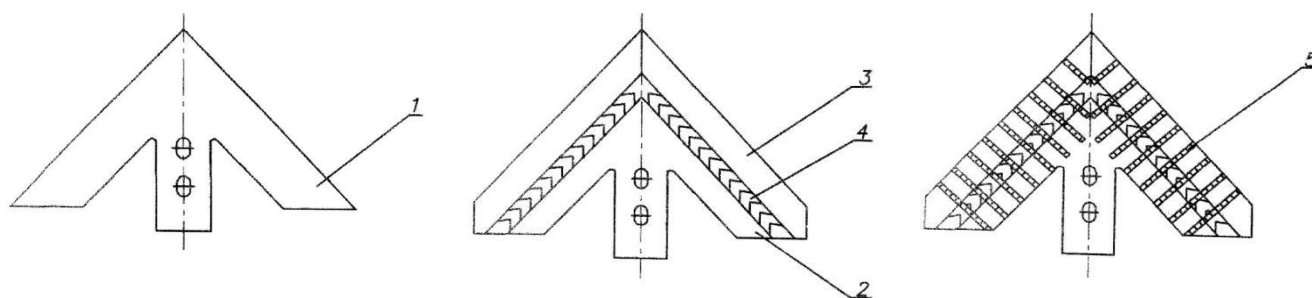


1 – тильна сторона робочої поверхні; 2 – зона леза; 3 – зона підвищеної твердості леза з тильної частини; 4 – зона з підвищеною твердістю при заводському виробництві

Рисунок 1.12 – Лапа культиватора

Існує спосіб зміцнюючого відновлення деталей ґрунтообробних машин [141], що включає видалення зношеної частини, виготовлення вставки, що компенсує, копіює зношену частину, і кріплення її до незношеної за допомогою зварювання. Це здійснюють приварюванням попередньо зміцненою термообробкою вставки з наступним наплавленням армуючих валиків на відновлену робочу поверхню. Виконують її перпендикулярно траєкторії переміщення ґрунту з перекриттям кріпильного шва (рис. 1.13).

Дослідження, проведені вченими, дозволили встановити, що застосування твердих сплавів для забезпечення зміцнюючих покриттів деталей ґрунтообробних знарядь різного призначення досягли певного порога. При проведенні аналізу матеріалів і зносостійких составів серед композиційних та неметалевих матеріалів було встановлено, що для значного підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь найбільш доцільно застосовувати металокерамічні матеріали.



1 – частина деталі, що залишилася, після експлуатації; 2 – не зношена зона деталі;
3 – компенсуюча вставка; 4 – зварювальний шов; 5 – армуючі валики

Рисунок 1.13 – Відновлення й зміцнення культиваторної лапи комбінованим методом

Металокерамічні матеріали (МКМ) можуть використовуватися для підвищення зносостійкості ріжучих поверхонь стрілочастих лап ґрунтообробних знарядь, експлуатованих в абразивній ґрунтовій масі, складаються з металевої сталевих основи (матриці) із включеними до її складу надтвердими керамічними включеннями (оксидів, карбідів, нітридів і інш.), тобто являють собою композиційний матеріал. Цей матеріал відрізняється комбінацією різних за властивостями і формою двох або декількох структурних складовин. При цьому дані матеріали мають чітку границю розділу між ними [142-146]. Значною перевагою композиційних матеріалів є те, що вони поєднують у собі позитивні властивості тих матеріалів, які входять до їхнього складу. При зміцненні деталей знарядь МКМ їх найбільш часто наносять на робочі поверхні у вигляді покриттів. Існує досить велика кількість способів, що дозволяють формувати дані покриття.

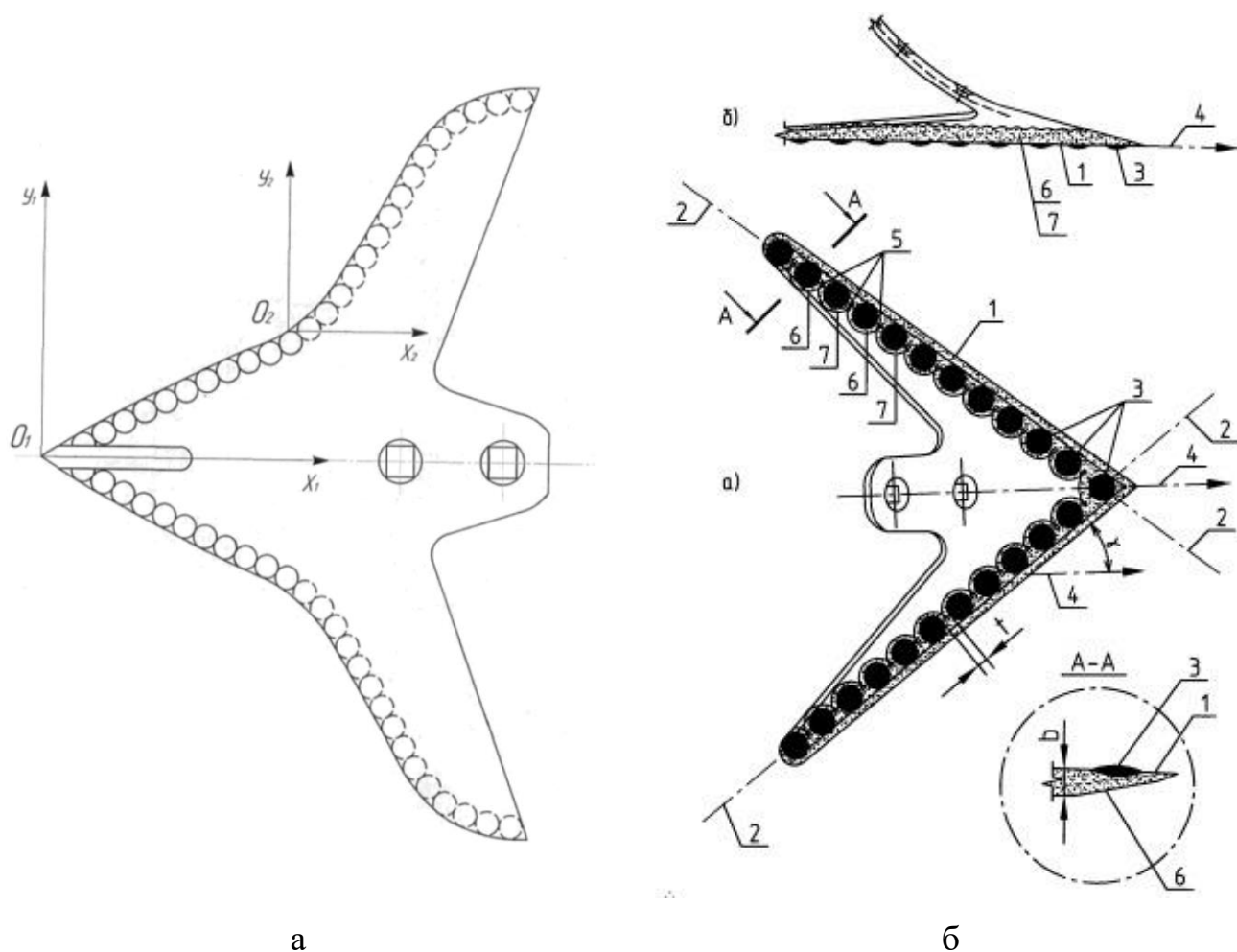
Одним із сучасних перспективних способів одержання металокерамічних покриттів є карбовібродугове зміцнення (КВДЗ) з використанням вугільного електрода й багатокомпонентних металокерамічних паст. Даний спосіб зміцнення розроблений вченими ФГБНУ ГОСНІТІ та Орловським ГАУ [94, 129, 130, 147-154].

Сутність способу полягає в наступному. Спочатку на ріжучу поверхню стрілочасті лапи наносять пасту, яку висушують до затвердіння. Розплавлення пасти проводять з використанням вібруючого вугільного електрода. При горінні електричної дуги на зміцнюючій ріжучій поверхні з компонентів пасти утворюється

металокерамічне покриття. Одночасно відбувається дифузійне насичення матеріалу стрілкової лапи вуглецем за рахунок його дифузії при сублимації в електроді. Відмінною рисою КВДЗ є відсутність значного теплового вкладення в зміцнюючу деталь за рахунок вібрації вугільного електрода.

Ефективним напрямком підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин є керування їх зношуванням шляхом локального зміцнення лез по площині або довжині [155-166].

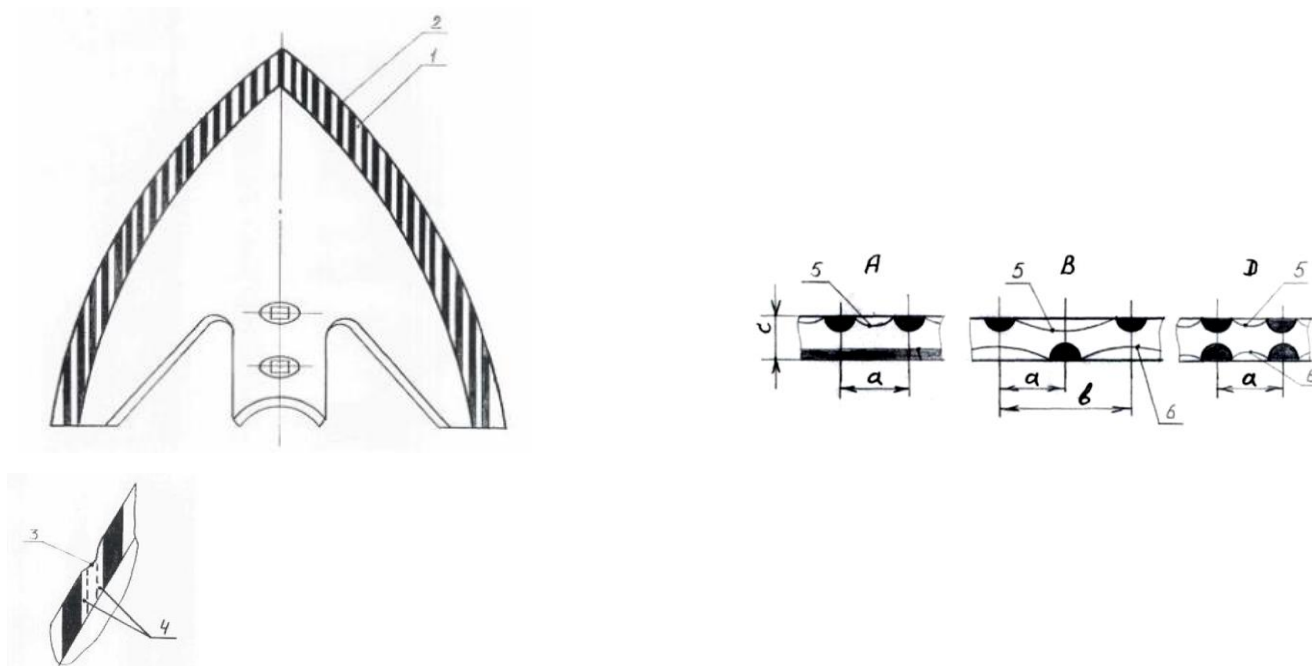
Автори робіт [164-166] розробили способи зміцнення лап культиватора нанесенням з нижньої сторони твердосплавного матеріалу у вигляді кіл по всій довжині леза й лінійне зміцнення ріжучої кромки (рис. 1.14).



а – схема наплавлення згідно [164, 165]; б – [166]: 1 – культиваторна лапа, 2 – лінії армування, 3 – точки зносостійкого матеріалу, 4 – напрям переміщення робочої поверхні, 5 – перекриття зон термічного впливу, 6 і 7 – сусідні точки

Рисунок 1.14 – Зміцнення лап культиватора наплавленням зон у вигляді кіл

Відомо також способи зміцнення наплавленням армуючих смуг [167, 169, 170] на поверхню лап або різних за зносостійкістю матеріалів [168]. Згідно [167] робоча поверхня виконана зі змінною зносостійкістю, шляхом смугового зміцнення матеріалу. Це може бути досягнуто декількома варіантами (рис. 1.15). Перший – на лицьовій поверхні леза нанесені смуги, на тильній – суцільний шар зносостійкого матеріалу. Другий – зміцнюючі смуги нанесені з лицьовий і тильної сторін у шаховому порядку. Третій – зміцнюючі смуги нанесені з лицьової і тильної сторін один проти одного.



- 1 – лезо, 2 – зміцнюючі смуги, 3 – міжсмуговий простір,
 4 – прилягаючий до смуг простір, 5 – пляма лицьового фактичного зношування,
 6 – пляма тильного фактичного зношування

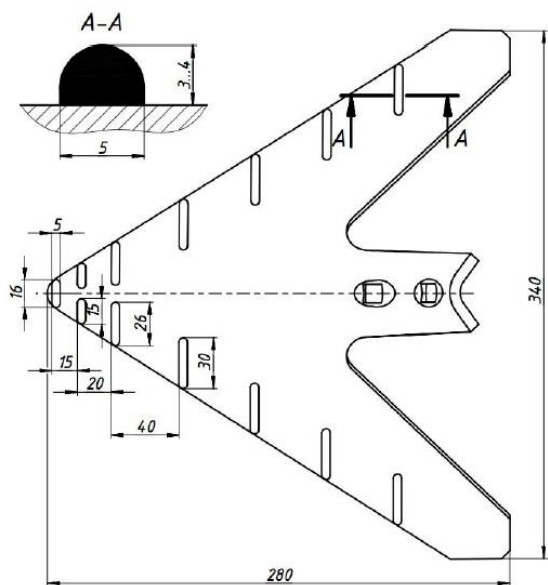
Рисунок 1.15 – Схема нанесення зміцнюючих смуг

Однак такі методи зміцнення при відновленні культиваторних лап в експлуатації не можуть бути реалізовані через зменшення їх товщини, що може призводити до проплавлення деталі навіть при наплавленні з однієї сторони.

Авторами [116, 169, 170] запропонований метод підвищення зносостійкості культиваторних лап, який здійснюється за рахунок наплавлення зносостійких валиків прямолінійної форми на робочі поверхні стрілкової лапи культиватора, а саме: на

носок, крила й лезвійну частину. Схема розташування зносостійких валиків і відновлена лапа представлені на рис. 1.16.

Згідно способу [168] на лезо стрілкової лапи наносять ділянками матеріали, зносостійкість яких зменшується від її носка до обрізу крила (рис. 1.17.).

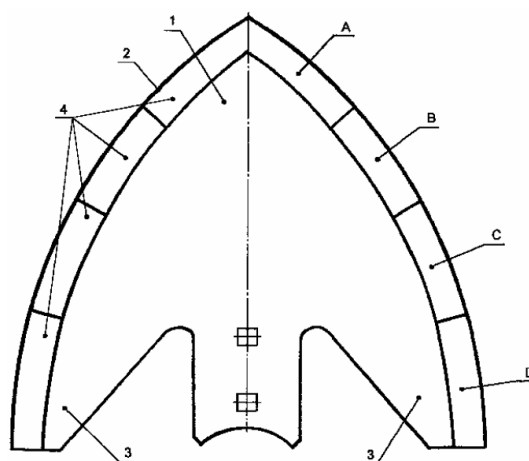


а



б

Рисунок 1.16 – Схема розташування зносостійких валиків (а) і наплавлена лапа культиватора (б)



1 – стрілчаста лапа, 2 – криволінійне лезо, 3 – поверхня крил, 4 – матеріал змінної зносостійкості. На ділянці А – зносостійкість висока;

Д – зносостійкість менша; В і С – проміжні значення цього параметра

Рисунок 1.17 – Робочий орган культиватора

Запропоновано робочий орган культиватора [171], що включає стрілчасту лапу, робоча зона якої виконана у вигляді кривої поверхні, і вона проходить від початку її носка до кінця по бічних поверхнях. Профіль культиваторної лапи за напрямом руху зменшується з формуванням при експлуатації нового за рахунок нанесення на робочу поверхню смуг з тугоплавкого металу під різними кутами щодо переміщення ґрунту при експлуатації. Попередня оцінка такої технології зміцнення леза лапи робочого органа культиватора може бути ефективною за рахунок формування зубчастого профілю в процесі експлуатації й самозагострювання. Таку технологію підвищення зносостійкості лап культиватора автори рекомендують використовувати багаторазово при її зношуванні. Недоліком цього методу зміцнення є те, що смуги наносять тільки на лезо, яке формують різними методами (механічною обробкою, пластичним деформуванням, відтягненням та інш.), що призводить до накоплення в ньому напружень і додатково вони формуються на границі лезо – основа лапи. Крім того, на крилах лапи максимальне зношування відбувається з їх протилежної поверхні крил, щодо леза носка, і їх більше зношування спостерігається з внутрішньої поверхні. Тому з урахуванням зон найбільшого зношування й схеми зміцнення, досягнення значного ефекту самозагострювання неможливо. Що стосується рекомендації щодо додаткового відновлювального зміцнення леза при використанні техніки, згідно з такою технологією, і це також не буде ефективним. Це пов'язане з тим, що метал леза в експлуатації зазнає його зношування, а також зменшення товщини значної її частини.

Відомо спосіб [172] зміцнення леза й прилеглих до нього перпендикулярно спрямованих зон лапи культиватора наплавленням смуг зносостійким матеріалом, а в міжсмугових зонах – створенням рядів отворів, які формуються в процесі штампування. Така технологія є складною й супроводжується не сумісними операціями в потоці виробництва, які використовують різні підходи нанесення отворів штампуванням і смуг – наплавленням. Використання таких різних технологічних процесів буде сприяти локалізації напружень від наплавлення смуг біля зон штампування, що призведе до формування дефектів і тріщин при нанесенні отворів. Метод також не запобігає деформації крил лапи при експлуатації.

Також відомі способи [173, 174] зміцнення, які формують на поверхні крил і носка отворів. Стрілчаста лапа заглиблюється на агротехнічно задану глибину й у процесі поступального руху її лезо зношується. На думку розробників такої технології, в момент руйнування перемички між лезом і отвором, утворюється зубчастий профіль, який інтенсифікує підрізання кореневої системи. Однак викликає сумнів стабільність такої схеми зміцнення в експлуатації.

Розглянемо деякі способи підвищення зносостійкості застосуванням біметалічного матеріалу [175] або чавуну [176].

Спосіб [175] виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин включає їх формоутворення з гарячекатаного біметалічного листа й термічну обробку. Основний шар біметалу виготовляють із легованої сталі, а плакуючого – виконують із високолегованого зносостійкого матеріалу. Його наносять на основний шар методом електрошлакового наплавлення. Перед формоутворенням лист відпалюють при температурі 680-820°C, а термічну обробку робочих органів проводять шляхом загартування від температури 850-950°C і відпуску при температурі 150-250°C. Формоутворення лап включає нарізку заготовок з листа, механічну обробку, гарячу гнбку, що забезпечує необхідну форму.

Розроблено технологію [176] виробництва деталей з бейнітного чавуну з кулястим графітом (БЧКГ) для ґрунтообробної сільгосптехніки. За даними авторів, використання БЧКГ підвищує зносостійкість ґрунтообробних знарядь сільгосптехніки в порівнянні зі сталевими штампованими, які в цей час використовуються в Україні й закордоном.

1.3 Застосування алмазовмісної шихти для модифікування поверхонь

Всебічні дослідження щодо отримання алмазної немагнітної фракції здійснювали з використанням фізичних і хімічних методик та зі застосуванням різних способів їх отримання. При цьому оцінювали їх властивості та прогнозували особливості структуроутворення і можливості використання для модифікування із забезпеченням стабільності й однорідності властивостей. У меншій мірі дослідження

виконували для використання таких присадок в рідкий метал при виготовленні деталей і їх відновленні та експлуатації. Це пов'язано з тим, що кожна сфера використання нерозривно пов'язана із забезпеченням специфічних споживчих властивостей, обумовлених нормативно-технічною документацією.

Найчастіше для підвищення довговічності деталей використовують легуючі і модифікуючі домішки. Додаткове легування істотно підвищує вартість виробництва виробів. Тому найчастіше використовують введення модифікуючих домішок, які при відновленні забезпечують необхідні їм фізико-механічні властивості: подрібнення зерен при кристалізації покриттів, здатність формувати більш однорідну структуру. В якості таких модифікуючих домішок використовують оксиди, нітриди і, останнім часом, алмазну фракцію. Тому для підвищення ефекту виробництва використовували алмазний модифікатор і його піддавали спеціальній обробці з нанесенням на нього покриття, що складаються з різних компонентів.

Це такі як Ni, Cr, Ti, Co-Ni, Ni-W, Ti-Cr, Ti-W [177, 178]. Для модифікування алмазної фракції додатковими компонентами здійснюють нанесення на неї компонентів багатоступінчастою обробкою, що включає спеціальну обкатку і спікання при різних температурах (750 і 900°C). Така технологія отримання порошкової композиції є досить витратною.

Виходячи з вимог, які пред'являються до зміцнення відновлюваних покриттів, на деталях виконували аналіз матеріалів різних типів патронів, які можна утилізувати в невеликому контейнері [179, 180].

Найбільш ефективними можуть бути 12,5 мм бойові патрони, частка яких складе 90,0% і 15мм (до 10%) сигнальні. Кількість сигнальних патронів не повинно перевищувати цієї кількості, так як вони включають Mg, який значно підвищує піроефект і забезпечує локальну детонацію до 3000°C. Такі боеприпаси мають складну конструктивну будову, для чого використовують різні за складом вихідні матеріали. До складу патронів входить також порох і це не вимагає додаткового використання вибухових речовин при їх утилізації.

При виборі вихідного матеріалу при детонації також враховували, що компоненти Cu і Zr стабілізують такий процес.

Для детонації використовували контейнер об'ємом 1м^3 з отворами на його поверхні, бокових стінках і дні для видалення газів та легкоплавких компонентів. Такі отвори формували діаметром 6мм, один від одного на відстані 50мм. Контейнер для детонації встановлювали в полі на відстані 1,5км від будівель. Перед закладанням в контейнер патрони упаковували в зв'язки по 10 шт і укладали в чотири шари, а потім підпалювали нижній (першу в'язку). Час детонації кожного шару змінювався і склав 1-2с (першого); 2-3с (другого); 3-5с (третього); 5-10с (четвертого). Сигнальні патрони розподіляли рівномірно в зв'язці з освітлювальними кожного шару. Це забезпечило середню температуру інтервалу детонації $1500\text{-}1800^\circ\text{C}$.

Відмінною особливістю такого способу детонації є отримання шихти зі стабільною алмазної фазою і можливістю одночасного отримання модифікуючих компонентів.

Для досліджень якісного та кількісного складу шихти використовували методи хімічного та спектрального аналізів, електронну мікроскопію і локальний спектральний аналіз.

Використання такої шихти для досягнення конкретних заданих властивостей, її легко можна розділити на фракції (дрібну немагнітну, магнітну і велику – змішану). Залежно від типу фракції її ефективно використовувати для різного призначення – в металургії, машинобудуванні і нафтогазовидобувному виробництвах, а також різних за часткою і способами введення в якості модифікуючої домішки в метал і пластичне мастило для стабілізації роботи обладнання [79], в зміцнюючі покриття відновлювального наплавлення різними методами.

При утилізації боєприпасів формуються конгломерати, які відрізняються за розміром. Їх дробили і аналізували різними методами. На першому етапі властивості оцінювали хімічним аналізом. При цьому визначали середній вміст основних компонентів, якість і структуру поверхні, що входять в метал – Fe, Cu і C. Встановлено, що в такий шихті їх частка становить: 3,47-3,43% C; 3,14% Cu і до 100% S, Ca, Mg, K, Na, Fe, O₂.

Для виявлення всіх можливих компонентів, що входять в дисперсну фракцію шихти, аналізували їх вміст методом спектрального аналізу роздрібнених зерен конгломерату.

Статистичним електронімікроскопічним аналізом і локальним рентгеноструктурним виявили багат шарові покриття на алмазних фракціях, які легко деформуються при детонації, оскільки розташовуються як усередині різних за розміром зерен конгломерату, так і по їх границі у вигляді плівкового покриття ($\times 4000$, рис. 1.18).

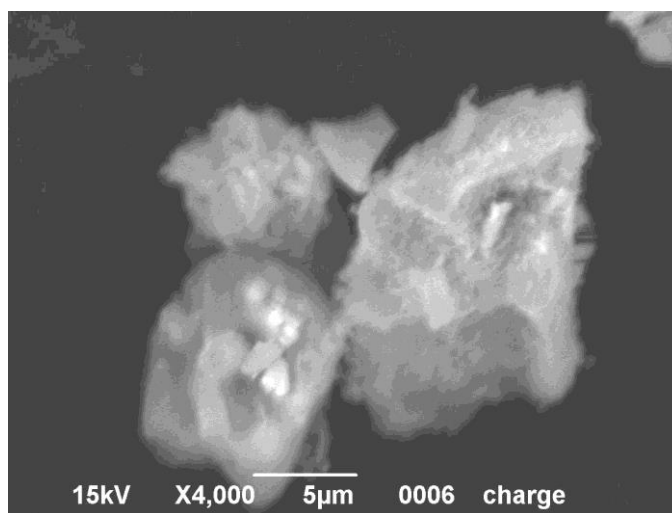


Рисунок 1.18 – Алмазна фракція в немагнітній складовій шихти в плівковій оболонці металів

Одночасно існують конгломерати, що складаються з оксидів металів в немагнітній складовій шихти, і вони при детонації деформуються в меншій мірі. У першому випадку при циклічній детонації алмазна фракція подрібнюється до нано- і дисперсних включень, а в другому - їх розмір значно більший і вимірюється в мкм. Це пов'язано з тим, що такі включення спікаються в слабкодеформуємій оболонці з оксидів металів. Алмазна фракція в цих двох варіантах формування зерен конгломерату є стабільною завдяки такому способу детонації і це підтверджується тим, що протягом п'яти років зберігання вона не розпадається з утворенням графіту. Алмазна фаза з менш пластичним покриттям краще виявляється при використанні такої шихти в структурі нанесеного зміцнюючого покриття. Виконано аналіз конгломератів шихти.

Немагнітна складова шихти, оцінена методом спектрального аналізу (табл. 1.10), показала, що основними її компонентами є, %: 6,42 Fe (можливо γ -Fe); 13,30 Cu; 5,69 Al; 8,23 Ti; 13,37 Mg; 1,63 V; 5,88 Zn; 16,98 Sn.

Таблиця 1.10 – Хімічний склад немагнітної складової шихти, %

Елемент	№ зерна					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
Mg	-	66.83	-	-	-	13.37
Al	-	28.46	-	-	-	5.69
Si	-	1.95	-	-	-	0.39
Ti	20.19	-	-	11.01	9.96	8.23
V	8.16	-	-	-	-	1.63
Cr	1.17	-	-	0.66	0.54	0.47
Mn	0.86	0.04	-	0.46	0.44	0.36
Fe	6.23	0.46	4.91	9.61	10.88	6.42
Ni	0.01	-	-	0.21	0.18	0.08
Cu	7.81	1.45	9.15	25.01	23.09	13.30
Zn	-	0.82	4.63	11.36	12.61	5.88
Y	2.58	-	-	0.72	0.77	0.82
Zr	0.24	-	-	-	-	0.05
Mo	0.44	-	-	0.18	0.13	0.15
Sn	5.48	-	71.19	4.52	3.7	16.98
Hf	2.9	-	-	-	-	0.58
Ta	0.41	-	-	-	-	0.08
W	4.24	-	-	-	-	0.85
Pb	39.24	-	8.13	30.39	34.67	22.48
Bi	0.06	-	-	-	-	0.01
Ag	-	-	0.4	0.08	-	0.10
Sb	-	-	1.6	2.09	-	0.74
Co	-	-	-	1.12	1.09	0.44
Cd	-	-	-	2.58	1.94	0.90

Найбільш ефективною для зміцнення відновних покриттів є немагнітна складова шихти з нано- і дисперсними алмазами. Вона містить більше модифікуючих домішок – Al, Mg, Y.

Така шихта включає 24 компоненти, що на 33% більше, ніж магнітна складова, в якій відсутні такі як: Al, Si, Zn, V, Hf, Ta, W, Bi і Ag. З усієї статистичної вибірки

такі компоненти в більшій мірі присутні в єдиних зернах, хоча в деяких з них середня концентрація досягає 13,37 Mg, 5,69 Al, 1,63 V і 0,86 W. Середня частка інших компонентів, виявлених в одиничних зернах конгломерату, сумарно не перевищує 0,01-0,58%.

При використанні немагнітної складової шихти в якості модифікуючої домішки найбільш ефективним є її введення в кількості 5-7% від частки електрода або дроту. При перерахунку середня частка модифікуючої домішки, що вводиться в рідку ванну становитиме, %: 0,8 Mg; 0,34 Al; 0,02 Si; 0,49 Ti; 0,03 Fe; 0,005 Ni; 0,003 Zr; 0,1 V; 0,03 Cr; 0,02 Mn; 0,8 Cu; 0,35 Zn; 0,05 Y; 0,01 Mo; 0,22 Hf; 0,005 Ta; 0,05 W; 1,35 Pb і 0,21 C (нано- та дисперсних алмазів).

Виходячи з отриманої інформації по компонентах та їх частці в шихті при використанні в якості модифікатора немагнітної складової фракції, слідує, що основними модифікуючими домішками є Mg, Al, Ti, а легуючою – Cu. Середня кількість алмазної фракції, оціненої за часткою вуглецю методом хімічного аналізу в такій шихті становить 3,45% C, а при введенні її з шихтою для модифікування не перевищить 0,21%. При нанесенні відновлювальних покриттів компоненти з низькою температурою плавлення будуть впливати на поверхню і їх можна видалити при механічній обробці.

Раніше були проведені дослідження щодо можливості використання немагнітної фракції шихти для модифікування відновлювальних покриттів наплавленням на деталі вали [181-184] (Додаток Е). Виявлено, що при цьому знос зменшується на 39-56%. Також проведені дослідження по введенню немагнітної фракції детонаційної шихти в рідку ванну при заправці тріщин в корпусних деталях із сірого чавуну [185-188]. Відновлення дефектів заправленим з використанням вторинної сировини – детонаційної шихти від утилізації боєприпасів підтвердило ефективність такої модифікуючої домішки при дозованому її введенні в рідку ванну.

Одночасно були проведені дослідження щодо можливості модифікування магнітної фракцією детонаційної шихти [189-191]. Зносостійкість таких покриттів підвищилася на 20-25% (Додаток Ж).

Виходячи з отриманих результатів, дослідження щодо можливості застосування немагнітної фракції для модифікування поверхонь, які працюють в різних умовах експлуатації, є актуальними і можуть отримати подальший розвиток.

1.4 Мета і завдання досліджень

У розділі виконаний аналіз літературних джерел і патентів, які належать до способів виготовлення й підвищення експлуатаційних властивостей деталей різного призначення: насосно-компресорних труб і культиваторних лап сільськогосподарської техніки.

Сполучною ланкою в даних дослідженнях є товщина матеріалу й марки сталей, що застосовуються, а також використання вторинної й природної сировини для підвищення стійкості виробів, що працюють в різних середовищах експлуатації.

Метою представленої роботи є теоретичне, експериментальне й технологічне обґрунтування способів підвищення стійкості виробів різного призначення із застосуванням модифікуючих домішок та їх впровадження у виробництво.

Для виконання поставленої мети необхідно було розв'язати ряд завдань:

- визначити напруження в зонах труб бурильної колони;
- оцінити локалізацію й характер деформацій для прогнозування стійкості НКТ при експлуатації;
- дослідити характер пошкоджуваності при експлуатації НКТ в умовах вуглекислотного впливу середовища;
- встановити деградаційні явища, що мають місце при впливі напруженого стану при взаємодії з вуглекислотним середовищем і одержати ефективне пластичне мастило з вторинною сировиною для зменшення пошкоджуваності різьбових з'єднань;
- визначити особливості напруженого стану, зношування й деградації металу робочого шару в процесі експлуатації культиваторних лап та розробити методологію оцінки їх напруженого стану;
- розробити процес внесення модифікуючих домішок в рідку ванну

наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною з алмазною фракцією і природною речовиною – глиною для підвищення властивостей, експлуатаційної стійкості робочих органів сільськогосподарських машин;

- теоретично оптико-математичним аналізом виявити зміни структури при введенні модифікуючої домішки бентонітової глини для зміцнюючого покриття наплавленням культиваторних лап сільськогосподарської техніки;

- провести експериментальні та технологічні дослідження з вибору модифікуючих домішок природного походження для зміцнюючих покриттів наплавленням;

- оцінити експлуатаційну стійкість деталей, згідно нових розроблених технологічних процесів модифікування;

- оцінити економічну ефективність технологічних процесів на споживчі властивості виробів.

ВИСНОВКИ

Підводячи підсумок проведеного аналізу розглянутих публікацій щодо виробництва, використання й деградації структури й властивостей металу насосно-компресорних труб при експлуатації, а також з виготовлення, зміцнення й відновлення робочих органів сільськогосподарської техніки можна зробити наступний висновок. Вибір такого типу виробів для аналізу обумовлений як вимогами з підвищення стійкості таких виробів, так і пошуком сфер ефективного використання вторинних модифікуючих домішок, які знизять витрати на модифікування й зміцнення робочих поверхонь різного типу.

1. Існує безліч стандартів й іншої нормативно-технічної документації, які регламентують сортамент вироблених труб та їх хімічний склад. У різних країнах вони мають багато загального, але є й серйозні відмінності. Для виробництва такої продукції найчастіше використовуються низьковуглецеві й низьколеговані сталі (леговані Mn, Cr, Mo, і мікролеговані V, Nb, Ti). Основною відмінністю різних нормативних документів є обмеження припустимого вмісту шкідливих домішок S і P.

Для підвищення споживчих властивостей труб та їх експлуатаційної стійкості розробляються спеціальні покриття, які дозволяють знижувати схильність матеріалу до корозійної пошкоджуваності.

2. У наведених дослідженнях відзначається, що період початку розвитку деградаційних процесів можна відсунути на більш тривалий період використанням труб за рахунок оптимізації технологічних параметрів їх виробництва, які суттєво подрібнюють феритні зерна. До них належать такі операції як регламентовані параметри редукування, використання термічної або термомеханічної обробок.

3. При виборі тієї або іншої технології й параметрів виробництва та підготовки до використання продукції в експлуатації слід враховувати конкретні умови середовища взаємодії, глибини свердловини, температурні параметри, які впливають на тип і характер деградації металу, що розвивається.

4. Більшість авторів у розглянутих роботах з деградації металу труб вважають, що основною причиною їх пошкоджуваності є вплив активного корозійного середовища й лише окремі роботи аналізують роль впливу напруженого стану. У цьому випадку зародження й розвиток пошкоджуваності відносять до зміни щільності дислокацій і виділенню на них надлишкових фаз за рахунок розвитку дифузії, що декорують їх компоненти.

5. Із всього розглянутого різноманіття способів зміцнення культиваторних лап, можна зробити висновок, що основні напрямки підвищення їх зносостійкості наступні: застосування зносостійких матеріалів при їх виготовленні, розробка методів зміцнення нових конструктивних і технологічних рішень їх виготовлення, а також відновлення й зміцнення в процесі експлуатації.

6. Розробка способу зміцнення повинна бути спрямована на підвищення зносостійкості лап культиватора й незначне подорожчання технології. Відновлення лап культиватора може передбачати заміну ріжучої частини, тому що згодом відбувається інтенсивна деградація металу й відновлення традиційними методами економічно не ефективно.

7. Виходячи з аналізу сучасних досліджень встановлено, що найбільш ефективною для зміцнення відновних покриттів є немагнітна складова шихти з нано-

і дисперсними алмазами. Такі покриття мають підвищену зносостійкість. Застосування немагнітної детонаційної шихти, а також матеріалів природного походження для зміцнення деталей різного призначення є актуальним напрямом дослідження.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виконана робота спрямована на пошук нових технологічних рішень підвищення властивостей робочих поверхонь та експлуатаційних показників деталей різного призначення, зміцненням із застосуванням модифікуючих домішок з найменшими витратами. При цьому, особливу увагу приділяли використанню для модифікування вторинної та сировини природнього походження для зменшення витрат у виробника.

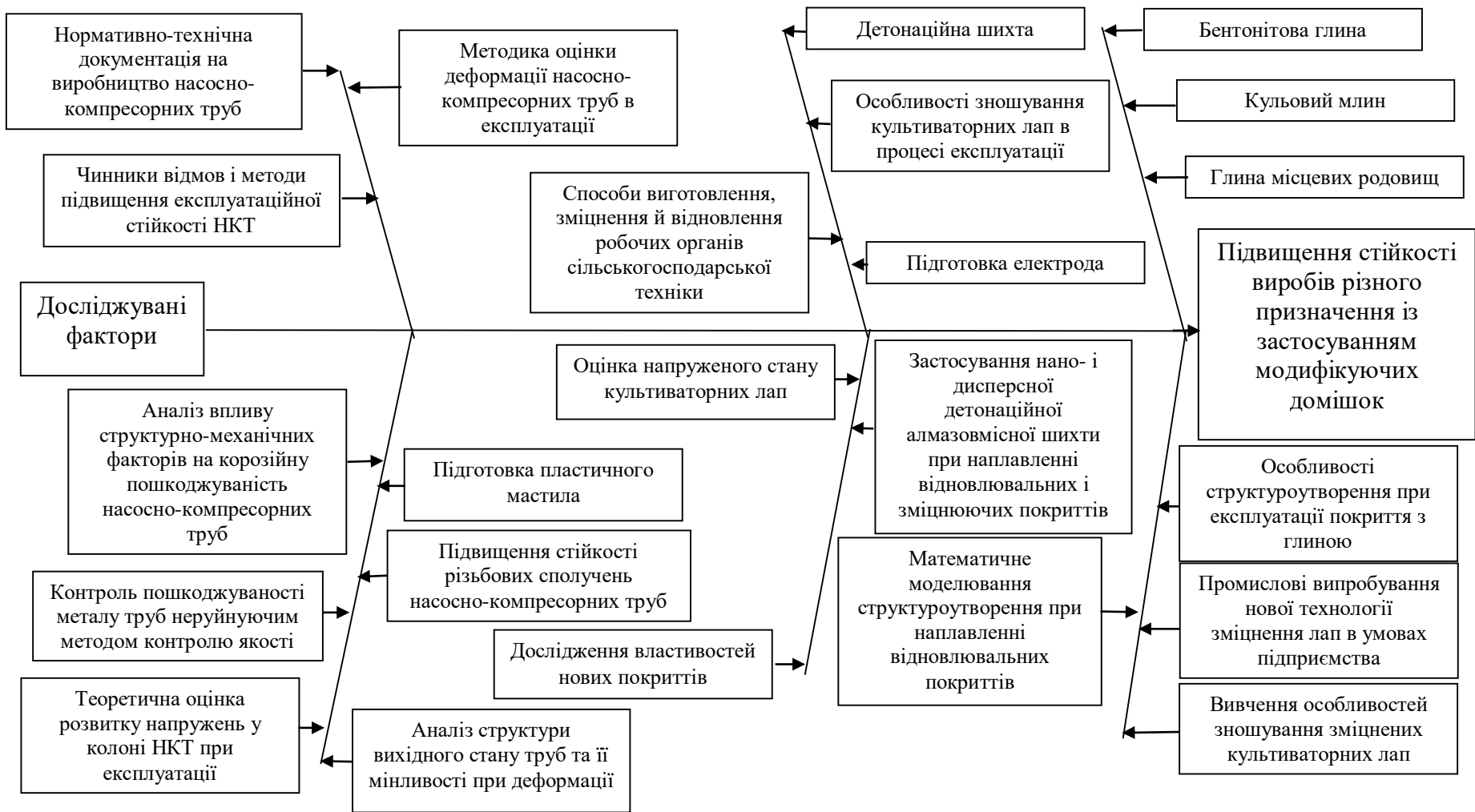
2.1 Методологія досліджень

Методологічно робота побудована на основі аналізу вітчизняних і закордонних джерел наукової інформації, узагальнена інформація з виробництва насосно-компресорних труб. Виявлені чинники відмов і методи підвищення експлуатаційної стійкості, а також способи виготовлення, зміцнення й відновлення робочих органів сільськогосподарської техніки. Об'єднання в єдину роботу цих різних досліджень пов'язано з використанням однакової детонаційної домішки для підвищення різних властивостей виробів при їх виробництві, обслуговуванні та експлуатації.

Послідовність та обсяг виконаних досліджень для досягнення мети й завдань розробок наведені у діаграмі Ісікави (рис. 2.1).

2.2 Матеріали, використовувані для модифікування при виготовленні, ремонті й експлуатації виробів різного призначення

Нано- і дисперсні алмази, отримані спеціальними методами, є дуже великокоштовними модифікуючими домішками, тому їх використання істотно знижує економічну ефективність технологічного процесу зміцнення та відновлення робочих поверхонь.



Експериментальні, теоретичні та технологічні основи нових напрямів дослідження

Рисунок 2.1 – Напрями досліджень, які використовували для зміцнення виробів з введенням модифікуючих домішок

Економія може суттєво зрости, якщо використовувати вторинну сировину, яка включає такі ж домішки. Досвід щодо їх використанню отриманий на кафедрі технологічних системи ремонтного виробництва Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. У роботі використовується напрями застосування вторинної сировини детонаційної шихти від утилізації боеприпасів, а також принципово новий метод – застосування природного матеріалу – глини.

Для модифікування відновлювального шару наплавленням, підвищення його якості, зносостійкості або ж введенням домішок у пластичне мастило для стабілізації роботи різбових спряжень, підвищення зносостійкості використовували немагнітну частку з алмазною фракцією детонаційної шихти. Аналізували вплив різної частки та її кількості, фракції і способи введення.

Детонаційна шихта, яку оцінювали локальним спектральним методом, складається з наноалмазів (3,37-3,43% C), інших компонентів (S, Ca, Mg, K, Na, Fe, O) сумарно до 10%, а хімічний аналізом всієї частки шихти виявлено, що найбільшу концентрацію мають компоненти C, Cu та Fe (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад детонаційної шихти від утилізації боеприпасів спеціального набору, % (хімічний аналіз)

C	Cu	Fe
3,37-3,43	до 3,14	до 2,9%

Для утилізації використовували патрони бойові й освітлювальні [179, 180], строк зберігання яких закінчився, відповідно діючій нормативній документації.

Патрони утилізували методом спалювання при нагріванні до температури мимовільної їх детонації з доступом кисню [192]. Далі шихта при такому способі утилізації була розподілена на першому етапі на дві фракції: немагнітну й магнітну.

Проведеними експериментами було встановлено, що отриману методом детонації дрібну шихту можливо легко поділити на групи її з'єднань наступними обробками: магнітну (виділяється фракція, що містить максимальну частку кисневих включень заліза) та немагнітну – просівом через сито (відділяється разом з нано- і

мікродисперсними алмазами фракції й частково кисневі з'єднання міді, заліза та алюмінію) і більш груба сфероїдизована фракція, що містить мідь, вуглець, залізо та інші компоненти. Ці компоненти рекомендується використовувати при плавленні в металургійних процесах.

Для застосування порошкову композицію просівали через сито з комірками до 10-20мкм, а потім вводили в пластичне мастило й перемішували до рівномірного розподілу домішки.

При її використанні з розміром включень менш 10мкм зносостійкість зростає не суттєво. Підвищення відзначається тільки в перший період випробувань і це пов'язане з тим, що наноалмази формують на поверхні тертя неглибокий рельєф, у якому відкладається лише незначна кількість домішок і мастила. Вони швидко переходять до контактуючої поверхні тертя й завершують свій вплив на зменшення зношування.

Найбільш ефективний вплив домішки порошку має фракція з розмір до 10-20мкм. Вона сприяє формуванню подряпин, що є «кишенями» для нагромадження компонентів модифікатора й мастила [193, 194].

Існує велика кількість методів відновлення працездатності культиваторних лап. Найбільш затребуваним є їх відновлення з нанесенням покриттів наплавленням. Для цього найчастіше використовують електроди Т-590, Т-620 [195-197] (табл. 2.2), які підвищують зносостійкість покриттів. Для цього також використовують різні способи модифікування металу відновлювального покриття. Найчастіше додатково вводять модифікатор у вигляді обмазки електрода або шлікерного покриття [198].

Для реалізації цього процесу на електрод наносили тонке покриття немагнітної детонаційної шихти та бентонітової глини. Оцінку хімічного складу такої глини виконано мікрорентгеноспектральним аналізом на енергодисперсійному спектрометрі «Спрут» СЭФ 01 М. За результатами аналізу виявлені наступні компоненти, %: 1,65 Fe, 0,25 K, 0,15 Ca, 0,06 S, 0,2 Mg, 54,88 Si, 32,42 Al, 0,3 Na. Глину для модифікування використовували у вигляді роздрібленого порошку. Її змішували з клеєм ПВА на водній основі й наносили тонким рівномірним шаром на поверхню електрода. Потім електрод просушували при кімнатній температурі 24 год, далі 2 год

при $t = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а далі використовували його для формування покриття наплавленням. Частка модифікатора, що наносилася, відносно електрода становила 6-8%, тобто, %: 0,099-0,132 Fe, 0,015-0,02 K, 0,009-0,012 Ca, 0,0036-0,0048 S, 0,012-0,016 Mg, 3,29-4,39 Si, 1,94-2,59 Al, 0,018-0,024 Na. Виходячи із цього, можливо розраховувати на помітне збільшення концентрації кремнію й алюмінію в покритті. Нанесення покриття наплавленням проводили на стрілчасту лапу культиватора зі сталі 65Г.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад електрода Т-620, %

C	Si	Mn	Cr	Ti	B	S
3,0	2,2	1,2	22,5	0,7	0,8	0,03

Таблиця 2.3 – Хімічний склад використовуваної бентонітової глини, %

Загальний склад глини	Fe	K	Ca	S	Mg	Si	Al	Na
	1,65	0,25	0,15	0,06	0,2	54,88	32,42	0,3
Частка модифікатора, що вводиться, в покриття (6%)	0,10	0,02	0,01	0,004	0,012	3,3	1,95	0,02

У сьогоденні широко застосовується відновлення деталей з використанням вторинної сировини. Як відомо, чим дисперсніша домішка, яка додається у рідку ванну, тим однорідніший розподіл хімічних компонентів по перетину відновленого шару, що в свою чергу впливає на зміну мікротвердості. Раніше проводили дослідження з використання вторинної сировини зольних відходів, детонаційної шихти від утилізації боеприпасів, шунгіту, які подрібнювали вручну та просіювали на різних решетах для використання дрібної фракції [199-202].

У даному дослідженні розробили, виготовили та використовували кульовий млин для подрібнення природного матеріалу – не тільки бентонітової глини, а ще із різних родовищ (рис. 2.2) [203, 204].

Використання бентонітової глини передбачало отримання її вже у подрібненому вигляді. Для аналізу впливу глин з місцевих родовищ використовували кульовий млин [205]. У роботі розглянуто технологія отримання дисперсної домішки глини.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд кульового млина

Глина в природному стані – це в'язка субстанція, що характеризується певною вологістю, кольором, які залежать від місця її видобутку, та вона має різний хімічний склад. Використовували суглинок з Прилукського району Чернігівської області і глину Куп'янського родовища Харківської області. Проби зразків для досліджень взяті в різних шарах родовищ. Перша проба верхнього шару суглинку з Прилукського району мала пісочний колір, другий – суглинок червоного кольору, а третій – світло-бурий.

Проба з Куп'янського родовища представляла собою глину, яка була сіро-білого кольору, гігроскопічна і нагадувала крейду. Подрібнення глин проводили на кульовому млині. Кульовий млин складається з: барабана, в який засипані кульки підшипників діаметром 10мм; електродвигуна, зуборемінної передачі, підставок і сполучної пластини. Габаритні розміри циліндра барабана: $D = 100,4$ мм; $d = 84,6$ мм; $L = 98$ мм. Частота обертання барабана становить 140 об/хв.

Оцінку якості подрібненого порошку проводили за допомогою електронного мікроскопа зі збільшенням $\times 200$. Далі зіставляли зі шкалою, ціна поділу якої дорівнювала 0,01 мм, і визначали величину частинок порошку. Зразки перемеленого порошку, в залежності від часу обробки в млині, значно відрізнялися один від одного.

Так, після обробки тривалістю 40 хв в Прилукському зразку спостерігається достатнє подрібнення, але частки кварцу зберігалися значно більшими, ніж інші (через високу їх твердість). Після подрібнення тривалістю 90 хв спостерігається значне зменшення зерен порошку і більшість частинок кварцу мають такий же розмір,

як і інші складові. Однак, зустрічаються його частки, які майже не зазнали подрібнення. Після 120 хв подрібнення глина характеризувалася рівномірним розміром зерен і порошок нагадував пудру. При 150 хв подрібнення порошок мав вигляд без будь-яких якісних змін відносно попереднього періоду обробки (рис. 2.3).

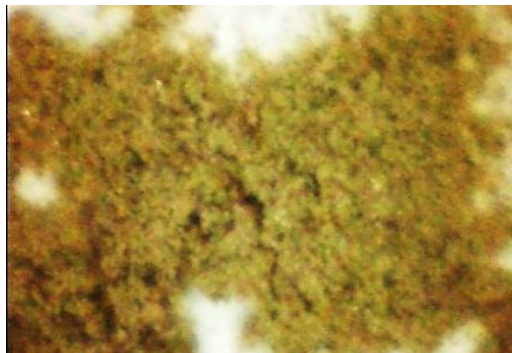


Рисунок 2.3 – Час подрібнення Прилукської глини протягом 150 хв, $\times 200$

Глина з Куп'янського родовища мала вигляд «грудок», тому її попередньо подрібнювали вручну (рис. 2.4). Після цього глина з Куп'янського родовища була піддана обробці в кульовому млині. При такій обробці вона була добре подрібненою і мала вигляд пудри, та не відчувався кварц, як у суглинків з Прилукського родовища.



а

б

в

а – вихідний стан, $\times 2$; б – зовнішній вигляд перед обробкою в кульовому млині;
в – після подрібнення протягом 120хв, $\times 200$

Рисунок 2.4 – Глина Куп'янського родовища

Так як ця глина мала невеликий вміст вологи, то після години обробки в кульовому млині вона не подрібнювалась, а прилипла до стінок барабана. Далі цю глину помістили в піч для сушіння на 90 хв при температурі 240°C .

Далі її знову засипали в барабан на 90 хв, для того, щоб приготувати порцію для пресування таблетки і подальшого проведення рентгеноспектрального аналізу для

встановлення вмісту компонентів. Для цього використовували спеціальний штамп зі сталі 20. Він являє собою циліндр, в який з обох сторін вставляються пуансони (рис. 2.5) для запресовування. Формування таблеток проводили з використанням гідравлічного пресу марки ОКС 1671М, максимальний тиск досягав 40 т. Таблетки використовували для досліджень хімічного складу глини.



а



б



в

а – оснащення для виготовлення сформованих таблеток з глини; б – таблетка для проведення хімічного аналізу, в – прес

Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд оснащення

Перед нанесенням домішки глини на електроди, їх попередньо обробляли в пічці з температурою 180°C та прогрівали 1,5 год, після чого охолоджували на повітрі. При наплавленні та модифікуванні порошок глини використовували шляхом перемішування його з клеєм марки ПВА в пропорції 2 г порошку і 2 г клею. Після чого отриману суспензію відразу наносили тонким шаром на електроди. На 1 електрод наносили ~ 1,6 г суміші (рис. 2.6).

Після нанесення модифікуючого покриття на електрод глину знову просушували на повітрі 24 год, а потім 2 год на печі при температурі 180°C.

За результатами аналізу хімічного складу видно, що в глині з Куп'янського родовища (табл. 2.4) присутня висока концентрація кальцію – 56,455%. Тому глина з даного родовища має високу гігроскопічність, а також схильність до формування грудочок. Глина Прилукського родовища (табл. 2.5.) відрізняється підвищеним

вмістом кремнію - 73,243%. Така глина мала добру сипкість, і вона якісно подрібнювалася в кульовому млині.



а



б

а – електрод Моноліт; б – з обмазкою глиною

Рисунок 2.6 – Електроди для відновлення і модифікування поверхонь

З порівняльного аналізу різних родовищ глини видно, що вони містять і домішки, які забезпечують модифікуючий ефект – Na, K, Ca, Mg, а також шкідливі компоненти S і P, які вони нейтралізують. Для аналізу впливу введення домішки даних глин обрано електрод E46-Моноліт (табл. 2.6).

Таблиця 2.4 – Хімічний склад глини з Куп'янського родовища, %

Загальний склад глини	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Si	P	S	Cl
	5,225	1,129	6,551	0,623	56,455	0,341	19,2	8,5	1,0-1,5	7,0
Частка модифікатора, що вводиться, 6%	0,31	0,07	0,39	0,04	3,39	0,21	1,15	0,51	0,09	0,42

Таблиця 2.5 – Хімічний склад глини із Прилукського родовища, %

Загальний склад глини	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Si	S
	0,815	0,586	8,822	1,179	1,405	1,917	73,243	2,5
Частка модифікатора, що вводиться, 6%	0,049	0,035	0,53	0,07	0,084	0,12	4,39	0,15

Таблиця 2.6 – Хімічний склад наплавленого покриття електродом E46-Моноліт-РЦ-УД (E432(3)-РЦ11), %

Mn	Si	C	P	S
0,40-0,65	0,15-0,40	0,11	0,035	0,030

2.3 Методи досліджень, використані в роботі

Дослідження структури металу проводили металографічним методом, з використанням оптичної, електронної та емісійної мікроскопії. Для цього використовували мікроскопи MIM-8, ZEISS Axio Vert. A1 зі збільшенням від $\times 50$ до 1000, а також зі збільшенням від $\times 100$ до 5000 та іншими методами. Крім того, вивчали розподіл компонентів методом мікрорентгеноспектрального аналізу на електронному мікроскопі YSM-820 Link «YEOL» з системою рентгенівського мікроаналізу. Розподіл компонентів також вивчали й методом термоелектронної емісії. Для детального вивчення структури різних зон при відновленні використовували новий підхід з оцінкою всіх сформованих фаз по фотографіях при різних збільшеннях і отриманих методом оптико-математичного опису, що дозволило обґрунтувати переваги запропонованої технології.

Мікротвердість різних зон оцінювали по мікро-Вікерсу приладом UIT HVmicro-1 і навантаженні 50 г (0,49 Н), витримка 10 с, та при навантаженнях 20 і 50г на приладі ПМТ-3 Зміни вивчали і рентгенівським методом нанесених покриттів, проводили на апараті ДРОН-3 в $K\alpha$ -Cu випромінюванні.

Для оцінки впливу модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів проводили їх випробування на зношування. Стендові випробування на зношування проводили на машині тертя СМТ-1 на підприємстві ДП «Завод ім. В.О. Малишева». Випробування проводили за схемою «диск-колодка». Схема випробувань і розмір зразків наведені на рис. 2.7.

Випробування зразків здійснювали в абразивному середовищі кварцового піску без змащення й проводили за схемою Бринеля. Випробуванню піддавали зразки розміром 10×10 мм, які вирізали із зони з покриттям і обробляли на плоскошліфувальному верстаті при навантаженні 5кг. Контртіло - фторопласт

(ПТФЕ-4). У даному випробуванні фторопласт використовували як тіло для утримання абразиву в зоні тертя. У якості абразиву використовували пісок Староверовського родовища (Україна) фракцією 0,25-0,4мм. Перед випробуванням підготовлені зразки (колодки, диски) промивали, маркірували, зважували на вагах WA-200. Шлях тертя складав 100м.

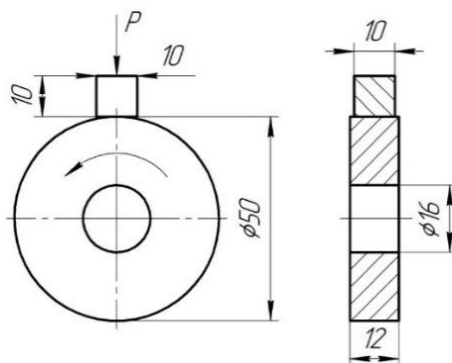


Рисунок 2.7 – Схема випробувань і розміри зразків при стендових випробуваннях на зношування

Враховуючи малу товщину покриття, оцінку міцності зчеплення його з основою визначали за методикою Гуляєва – Гудцова [206, 207]. Сутність даної методики полягає в тому, що вимірювали довжину діагоналі відбитка, нанесеного алмазним індентором в зону границі наплавленій шар – перехідна зона. При цьому для розрахунків використовували залежність:

$$\sigma = \frac{2P}{d^2}, \quad (2.1)$$

де: P – навантаження на індентор, Н;

d – довжина діагоналі відбитка, мм.

Найбільш ефективним неруйнівним методом контролю напруженого стану й деградації металу можуть бути показники різного рівня коерцитивної сили [208-210]. Для контролю напружено-деформованого стану виробів і металоконструкцій, виготовлених з різних марок сталей і сплавів, застосовують коерцитиметри відмінних типів.

Структуроскоп магнітний КРМ-Ц-К2М (рис. 2.8) можливо використовувати на будівельних майданчиках, у польових умовах, при роботі на висотних спорудах, де

немає мережі живлення або воно заборонене правилами безпечної експлуатації [211-215]. Магнітний структуроскоп КРМ-Ц-К2М при розробці бракувальних норм дозволяє оцінювати по коерцитивній силі механічні властивості та структурний стан сталей широкого застосування на основних стадіях діаграми навантаження – пружної, пружно-пластичної й пластичної [216]. Залежно від розміру магнітного перетворювача прилад дозволяє оцінювати рівень коерцитивної сили на глибину до 5 і 20 мм.



Рисунок 2.8 – Загальний вид коерцитиметра КРМ-Ц-К2М з різними накладними перетворювачами

Також існують коерцитиметри, які працюють тільки від електричної мережі. Одним з таких є коерцитиметр ІКС-104-ІНТЕКС (рис. 2.9). Цей тип коерцитиметрів використовували для оцінки рівня напруженого стану на невелику глибину, але навіть можливо і при нанесенні нанопокриттів.



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд коерцитиметра ІКС-104-ІНТЕКС з перетворювачем

2.4 Розробка методики оцінки розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації

Запропонована методика оцінки характеру розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації [217]. Для одержання достовірної й найбільш повної інформації експерименти слід проводити попередньо на устаткуванні з розтягування й розриву зразків різної довжини (не тільки стандартних).

В останні роки введений новий стандарт [218] для розрахунку бурових труб. Питання про місце руйнування при експлуатації труб і його характер в цьому стандарті не розглядаються. Багато приділено уваги поздовжньому вигину із крутінням.

У даній роботі за основу розрахунків була прийнята методика, наведена в монографії Васидзу К. [219].

Однак, у ній також не розглянуті питання, які пов'язані з визначенням зони пластичності. Завдання жорстко пластичного середовища можуть бути вирішені тільки з урахуванням визначення саме цієї зони.

У завдання даного розділу входила розробка методики оцінки характеру розтягування довгих стрижнів для одержання рекомендацій на основі проведення експериментів. Запропоновано алгоритм розрахунків, який заснований на переборі довжин пружних і пластичних деформацій, а також знаходженні зони дотичних деформацій [79].

Аналогічні підходи, особливо пов'язані з диференціальними рівняннями, можливо застосувати й до зовсім інших завдань. Наприклад, до завдань економіки, конструкцій різних демпферів тощо.

В основі оцінки лежить варіаційний принцип найменшої дії, описаний у роботах з аналітичної механіки.

Рішення такого завдання в техніці проводять на основі зміцнення сталі при пластичній деформації. Вважається, що крім основного модуля пружності між границею текучості й тимчасовим опором існує інший, набагато менший, який відносять до модуля зміцнення. Вважається також, що в розглянутому випадку має

місце лінійний зв'язок між напругою й деформацією.

При оцінці деформації колони слід враховувати можливість її нелінійного розтягання.

Оцінку нелінійності слід вводити тільки за рахунок того, що є робота деформації, яка у свою чергу розбивається на 2 частини. Перша – при одній і тій же силі розтягування (діє пружна деформація), але на ній не зберігається об'єм металу, а друга – при тій же силі розтягування діє пластична й на ній зберігається об'єм металу. Умова збереження об'єму завжди призводить до нелінійності відносно Δl (величина подовження за границею текучості). Розглянемо наведений рис. 2.10.

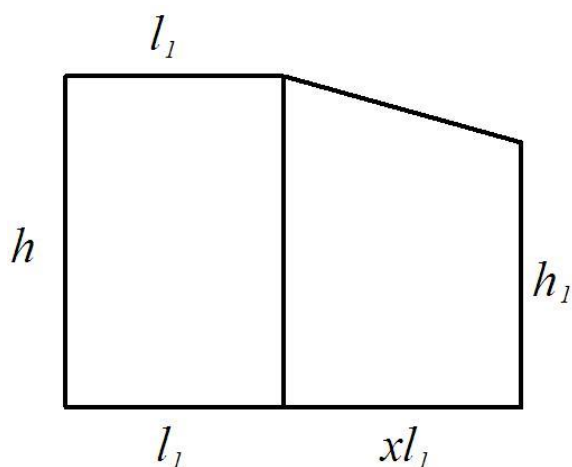


Рисунок 2.10 – Умова збереження площ

При розтягуванні стрижня, у якого ширина b набагато більше висоти h , з достатнім ступенем точності можливо замість умови збереження обсягу записати умову збереження площі:

$$hl_1 = xl_1 \frac{h + h_1}{2} \quad (2.2)$$

Якщо крім того прийняти, що відомий тангенс кута нахилу u трапеції, площа якої наведена в правій частині цієї залежності, то:

$$h_1 = h - xul_1 \quad (2.3)$$

підставляючи цей вираз та замість h_1 , отримаємо: $hl_1 = xl_1 \frac{h + h - xul_1}{2}$, або після

$$\text{перетворення } 2hl_1 = xl_1(2h - xul_1), ul_1^2 x^2 - 2hl_1 x + 2hl_1 = 0, \text{ або } ul_1 x^2 - 2hx + 2h = 0 \quad (2.4)$$

Це рівняння із двома коріннями:

$$x_1 = \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1}, \quad x_2 = \frac{h + \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1}. \quad (2.5)$$

У цьому випадку другий корінь не підходить, тому що він дуже великий. У Додатку Б дається обґрунтування щодо використання першого кореня для проведення розрахунків напруженого стану колони. Докладно розглянута і методика оцінки напружень для досягнень подовження.

Аналізом комп'ютерних розрахунків встановлено, що на стрижні виявляється ділянка пластичної деформації.

Пробні розрахунки зроблені залежно від товщини k . При $k=2$ й із силою руйнування одержали 4,5мм, тобто, майже h , тобто формулу (Б.20, див. Додаток Б) можна рекомендувати для використання при обробках експериментів з розтягування. Враховуючи дані діючої нормативно-технічної документації, можна уточнювати методом найменших квадратів параметр k (параметром дотичної деформації сталі). Якщо він виявиться стійким для даної марки сталі, то його фізичний зміст пов'язаний з відносним звуженням.

Найбільш важким завданням є визначення пружної зони при спільній наявності пружної й пластичної деформацій. Те, що крім розглянутого завдання, такі приклади існують, можна переконатися на технології виробництва гнутих профілів із широкого марочного складу тонкого листа. При їх виробництві дуже мала за обсягом зона пластичності й величезна зона пружності. Здавалося, що її довжину можна було б вважати нескінченною, але експерименти показують, що це не так: зона пружності обмежена жолобленням листа перед ділянкою пластичності. Це можливо спостерігати й візуально.

Очікувати жолоблення товстої труби на ділянці пружності не слід. А от на ділянці пластичності труба цілком може прийняти форму еліпса від розтягування або від скручування. Поздовжній пластичний вигин вже розглянутий. При пластичному скручуванні труби може виникнути зона еліпсовидності.

Встановлено, що в характеристиках нормативно-технічної документації відносно подовження й звуження залежать від довжини. В експериментальних даних відсутня така інформація.

Якщо в декількох стрижнів однієї й тієї ж висоти, але різної товщини має місце те саме відносне подовження й звуження, тоді довжини їх пластичних ділянок, на яких відбувається руйнування, повинні бути пропорційні довжині стрижнів. Разом з тим, такий висновок суперечить принципу Сен-Венана, згідно з яким довжина ділянки руйнування відповідає порядку декількох товщин стрижня. Це може свідчити про те, що відносне звуження також залежить і від довжини стрижня. У зв'язку із цим, експерименти слід проводити на устаткуванні з розтягування й розриву зразків різної довжини (використовувати не тільки стандартні).

2.5 Нові підходи оцінювання структури наплавлених покриттів методом математичного аналізу металографічних зображень

Відомо, що зносостійкість поверхні в умовах механічного впливу визначається в першу чергу її структурно-фазовим складом. Для кожного типу зношення характерно певне поєднання структурно-фазових складових, що забезпечують максимальну зносостійкість поверхні. Процес нанесення покриття має вирішальний вплив на проведення структурно-фазових перетворень в покритті. Широка зміна відновлюючого покриття наплавленого шару залежить від дольової участі основного і присадного матеріалів, високої температури нагріву у діапазоні швидкостей охолодження. Це призводить до формування різного структурно-фазового стану в поверхневому шарі, виконаному одним і тим же наплавлювальним матеріалом.

У роботах [220-225] представлені математичні моделі, які описують фазові перетворення в наплавлених покриттях зі сталей. Дані моделі дозволяють спрогнозувати структуру без проведення безліч експериментальних досліджень. Раніше була розроблена і неодноразово описана методика математичного моделювання структуроутворення [226-230]. Дана методика дозволяє досліджувати отриману структуру і виявляти відсоткове співвідношення сформованих фаз, але в кожному конкретному випадку аналізують додаткові параметри.

Для проведення моделювання структуроутворення використовували оптико-математичний опис [223-230] її мінливості при введенні модифікуючої домішки

глини в відновлювальне покриття при наплавленні на тонкостінну культиваторну лапу сільськогосподарської техніки. Дослідження базувалися на порівняльному аналізі базового варіанту наплавлення й з введенням модифікуючої домішки.

Відомо оптико-математичний опис структуроутворення при зміцнюючому наплавленні при якому використовували модифікування вторинною сировиною з алмазною фракцією від детонації боєприпасів певного набору патронів бойових і освітлювальних та вони детально розглянуті в раніше опублікованих роботах [188, 231,232] і захищені патентами України [179, 233], які показали наявність стабільної фази, що формується у вигляді нано- та дисперсних включень алмазів. Перевага використання такого модифікатора полягає в подрібненні структури (особливо включень карбідної фази) за рахунок створення додаткових центрів кристалізації і зниження температури рідкої ванни до $\sim 300^{\circ}\text{C}$ завдяки тому, що такі включення є мікрохолоджувачами, тому що вони розчиняються при $t=4000^{\circ}\text{C}$, а температура плавлення електрода не перевищує 1600°C .

Отримані зображення мікроструктур проаналізували, використовуючи розроблені раніше підходи [225, 234-236]. Зображення структури в цифровому форматі .bmp (256 відтінків сірого або у кольоровому зображенні) поділили на фрагменти розміром 3×3 пікселі і в залежності від місця розташування аналізували їх мінливість. У кожній тічці металографічного зображення з координатами (x, y) визначали умовний колір, заданий значенням Лапласіан функції (2.6), за допомогою якого описували дисипацію енергії [215]:

$$L(x, y) \equiv \Delta C(x, y) = \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C(x, y)}{\partial y^2} \quad (2.6)$$

У кінцево-різницевого поданні функція $C(x, y)$ мала вигляд матриці $C_{i,j}$ розміром 3×3 пікселя:

$$C_{i,j} = \begin{pmatrix} c_{i-1,j-1} & c_{i-1,j} & c_{i-1,j+1} \\ c_{i,j-1} & c_{i,j} & c_{i,j+1} \\ c_{i+1,j-1} & c_{i+1,j} & c_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Таку матрицю у кожному інтервалі обробляли послідовним скануванням і оцінювали кожен піксель, задавши його точкою кольору всередині фрагмента

заданого розміру. За координати вибирали піксель зображення (з центральним значенням $C_{i,j}$, де i і j – номери рядка і стовпчика відповідно). Кінцево-різницеve подання дифузійних процесів оцінювали за допомогою Лапласіана (2.8) для кожної точки аналізованого фрагмента зображення, яке мало вигляд:

$$L(x, y) \approx \frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 c}{\Delta y^2} = L_{ij} = c_{i,j-1} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + c_{i+1,j} - 4c_{i,j}, \quad (2.8)$$

де крок за координатами на цифровому зображенні $\Delta x = \Delta y = 1$. Мінливість, оцінену в конкретній точці обраного фрагмента зображення, задавали співвідношенням кількості збігів умовного кольору середньої точки відносно точок навколо неї.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто комплексні методики і матеріали, які використовували для підвищення експлуатації при різних умовах використання: модифікуюча домішка внесена як в зміцнююче покриття, так і у спряження в пластичне мастило. В першому випадку розглядали культиваторні лапи сільськогосподарських машин, а в другому – спряження у колонах насосно-компресорних труб.

1. Методично робота побудована на аналізах двох напрямів розгляду літературних джерел, які в подальшому можуть підвищити експлуатаційні властивості деталей та виробів на основі нових способів використання немагнітної частки детонаційної шихти з алмазною фракцією для зміцнюючого модифікування металу. При цьому обсяг та послідовність досліджень представлені діаграмою Ісікави.

2. Розглядаються різні методи, що дозволили виявити хімічний склад та локальний розподіл шихти, яка використовується в якості домішки. Таку шихту одержали з використанням спеціальних обробок та її частка при введенні в рідку ванну складала 5-7% від маси електроду.

При використанні модифікуючої домішки – бентонітової глини (6-8% від маси електроду), а потім і різних родовищ України, їх подрібнювали на спеціально

розробленому обладнанні – кульовому млині, піддавали сушінню. Аналізом показано, що при модифікуванні 6% домішки хімічний склад покриття незначно змінюється, %: до 045-065 Mn; 0,15-0,40 Si; до 0,11 C, 0,035 P; 0,010 S.

Всі варіанти модифікування вивчали металографічно: оптичною, електронною мікроскопією, термоелектронною емісією локального розподілу компонентів на однорідність їх засвоєння у покритті. Для цього використовували оптичний мікроскоп та електронний YSM-820 Link «YEOL» з системою рентгенівського мікроаналізу. Мікротвердість оцінювали по мікро-Вікерсу приладом UIT HVmicro-1 і навантаженні 50г та при навантаженнях 20 і 50г на приладі ПМТ-3.. Зміни вивчали і рентгенівським методом на апараті ДРОН-3 в $K\alpha$ -Cu випромінюванні. Для оцінки зношування проводили стендові випробування з введенням пластичного мастила у спряження, в абразивному середовищі – піску на машині тертя СМТ-1. Оцінку міцності зчеплення покриття з основою виконували згідно методики Гулаєва-Гудцова

$$\sigma = \frac{2P}{d^2}, \text{ де: } P - \text{ навантаження на індентор, Н; } d - \text{ довжина діагоналі відбитка, мм.}$$

Здійснення контролю якості проводили з використанням коерцитиметра КРМ-Ц-К2М, згідно розроблених бракувальних норм.

4. Розроблено методику оцінки розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації. В основу розробленої моделі оцінки закладений принцип мінімуму ентропії. Основою створення моделі розтягання труб стало порівняння впливу пружних і пластичних деформації. Запропонований алгоритм заснований на оцінці довжин пружних і пластичних зон, а також знаходженні зони дотичних деформацій. Розрахунки проведені для криволінійних поверхонь і трапецій. При проведенні розрахунків розглядали різницю відносин пружної деформації всього стрижня до гранично-пружного.

Підхід до оцінки напруженого стану й одержанню інформації про її сумарну роботу описаний в системі диференціальних рівнянь. У розрахунках введений параметр опору деформації замість границі текучості, що дозволило зрушувати екстремальну точку ентропії. Новизна виконаних оцінок включає облік прихованої енергії пластичності, аналогом якої може бути процес кристалізації.

Дана методика використовувалась для розрахунку пластичної деформації в різьбовому спряженні під час його зношування та вплив на деградацію металу.

5. Для оцінки структуроутворення при нанесенні покриттів наплавленням з використанням модифікуючих домішок використовували оптико-математичний аналіз електронних фотографій структур та новий комплексний підхід до оцінювання якісного та кількісного фазового складу, а також взаємозв'язок різних фаз в зонах наплавлення і перехідної з основою. Такі теоретичні дослідження дозволили підтвердити ефективність виконаних розробок.

РОЗДІЛ 3

ДЕГРАДАЦІЯ МЕТАЛУ Й ПІДХОДИ ДО ЇЇ ОЦІНКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ДЕТАЛЕЙ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1 Аналіз впливу структурно-механічних факторів на корозійну пошкоджуваність насосно-компресорних труб в умовах вуглекислотної свердловинної корозії

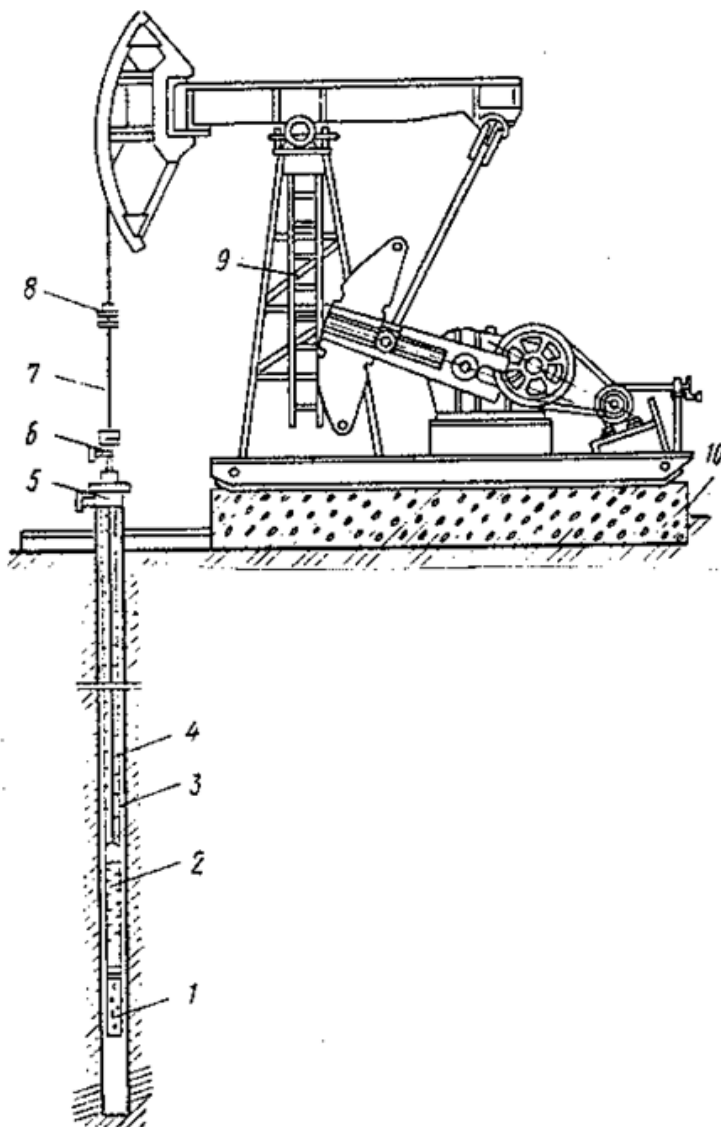
Компонування досліджуваних колон НКТ проведено за схемою: верхня зона зібрана із труб марки Р-110, середня – із групи міцності Е, і нижня – Д (рис. 3.1). При експлуатації обрив колон з найбільшою корозійною пошкоджуваністю відзначається у верхній зоні з 14 труб, зібраних зі сталі Р-110 (при діаметрі 73мм і товщині стінки 5,5мм). У цих ділянках труби, ушкодження корозією, досягають розмірів до 10-20мм і можуть займати загальну площу внутрішньої поверхні від 10 до 50% залежно від глибини свердловини й строку експлуатації. Одночасно з корозійною пошкоджуваністю відзначається потоншення цих труб у процесі експлуатації з 5-6мм до 2-4мм. Труби із цієї марки сталі, розташовані в нижній частині колони, які не піддані корозії, практично не змінюють товщини стінки (становить 5-5,7мм). Найбільше пошкодження й деградація металу при експлуатації стосуються різьбових з'єднань (до 55%).

У трубах міцності марок Е та Д корозійна пошкоджуваність не перевищує 1% і характерна для зон з температурою експлуатації більше 50°C. Ці дані отримані в період проведення капітального ремонту.

Виходячи з отриманої інформації, випливає, що істотну роль в експлуатації відіграє розвиток напруженого стану у верхній частині колони, що призводить до деформації (розтягування) труб у цій зоні, й це вимагає детального дослідження для розробки подальших рекомендацій з підвищення їх стійкості.

Розглянуто вплив факторів структурної деградації сталі насосно-компресорних труб газодобувної галузі на інтенсивність їх пошкоджуваності. На прикладі структурних змін, яким піддані труби в експлуатації, проаналізовані механізми

деградації сталі при одночасному впливі розтягування й впливу корозійно-активного середовища [237, 238].



- 1 – фільтр; 2 – свердловинний насос; 3 – насосно-компресорні труби;
 4 – насосна штанга; 5 – трійник;
 6 – сальник-ущільнювач;
 7 – сальниковий шток;
 8 – планшайба для підвіски НКТ;
 9 – верстат-качалка; 10 – фундамент

Рисунок 3.1 – Схема штангової насосної установки

Найважливіший фактор, що визначає довговічність насосно-компресорних труб (НКТ) та їх експлуатацію в регламентованому періоді – ресурсі, є їх корозійна стійкість. Параметри експлуатації (внутрішній тиск продукту, загальна вага колони труб, її викривлення в нижніх ділянках свердловини) й електрохімічні показники середовища визначають вибір НКТ із відповідними характеристиками. Якість НКТ визначається фізико-хімічними й механічними властивостями металу, сполучених різьбових поверхонь, які піддані найбільшим пошкодженням.

У даному дослідженні аналізували зв'язок структурних параметрів металу з рівнем корозійної пошкоджуваності тіла й елементів різьбових з'єднань НКТ зі сталі Р-110 виробництва Китаю. Хімічний склад, %, досліджуваного металу труб: 0,29 С;

0,36 Si; 1,1 Cr; 0,1 Ni. Труби експлуатувалися в свердловинах з підвищеною корозійною активністю по вуглекислотному типу.

Газорідинні потоки у відповідних свердловинах характеризувалися як корозійно-активні при:

- концентрації CO₂ у газовій фазі ≤ 0,415 %, що обумовлює його парціальний тиск 0,11 – 0,12 МПа (при $p_{\text{парц}} \geq 0,2$ МПа корозійні умови експлуатації відносяться до критичних, при $p_{\text{парц}} < 0,02$ МПа - середовище корозійно-безпечне);
- конденсації вологи в газі 3,4 -3,6%, що достатньо для зволоження поверхні НКТ і розвитку корозійних процесів;
- наявності у воді хлорид-, сульфат- і бікарбонатіонів, рН ~ 5, що створює умови для загальної й пітингової корозії;
- концентрації води в рідкій фазі до 5 - 6 про. %;
- лінійній швидкості потоку 3 м/с.

Як було показано в роботі [239], основна кількість відмов при експлуатації НКТ відбувається через стрес-корозію (корозія під напругою). У ряді випадків такий тип корозії провокується навантаженнями, що перевищують припустимий рівень.

Згідно РД 39-0147014-217–86 «Інструкція для експлуатації насосно-компресорних труб», основною механічною характеристикою, що лімітує несучу здатність колони, вважають границю текучості (σ_T) тіла труб верхньої ділянки. При компонуванні допустимі напруження від діючого навантаження у верхній ділянці колони не повинні перевищувати $0,77\sigma_T$. Як показали розрахунки, для досліджуваних труб зі сталі Р-110 $\sigma_T = 758$ Н/мм². Припустимий рівень напружень не повинен перевищувати $0,77\sigma_T = 584$ Н/мм².

Аналіз розподілу механічних напружень у верхній ділянці колони не виявив відхилень розрахункових значень від проектних. Розрахунки осьових розтягувальних напружень для корозійно-ушкоджених труб верхньої ділянки колони був виконаний за формулою на основі теорії міцності:

$$\sigma_z^i = Qn^{-i} / F, \quad (3.1)$$

де σ_z^i – напруження в трубі i ; $Qn^{-i} = g(m_{\text{тр}} + m_{\text{муф}}) \times (n - i)$ – сумарна вага труб нижньої ділянки колони (сила, що діє в напрямку розтягування); $m_{\text{тр}}$ – маса труби з

досліджуваної сталі; $m_{\text{муф}}$ – маса муфти; n – кількість труб у колоні; i – номер труби, у якій визначається осьове напруження розтягування;

$$F = 0,25\pi (D_{\text{зовн}}^2 - D_{\text{внут}}^2) \quad (3.2)$$

– площа ефективного перетину колони.

Напруження у верхній трубі склали 224 Н/мм^2 , в 14-й трубі – 218 Н/мм^2 або $0,3\sigma_T$ і $0,28\sigma_T$ відповідно, що свідчить про відсутність розрахункових помилок при компонуванні колони.

Для аналізу деградації структури металу при експлуатації НКТ був обраний зразок труби з наскрізним отвором у різьбовому з'єднанні, тобто з максимальним рівнем корозійного пошкодження. Зразки для аналізу вирізали по зоні найбільшої пошкоджуваності на ділянках труби з локальною пітинговою корозією. Шліф для аналізу виготовляли по перетину труби.

При встановленні можливих структурних механізмів корозійної пошкоджуваності в даному дослідженні на першому етапі вивчали нетравлені мікрошліфи, вирізані упоперек осі, що й включають ділянки з пітинговою корозією внутрішньої поверхні глибиною до 2,5 мм. Труба перебувала у верхній частині колони, що відповідало максимальним розтягувальним напруженням у ній.

На рис. 3.2 зафіксована тріщина глибиною 0,83 мм і умовною шириною 0,06 мм, що йде в метал з поверхні пітингового «кратера». Тріщина має характерні для корозії, що розвивається, нечіткі зовнішні береги з яскраво вираженим забарвленням, сітчастою структурою й розвиненими бічними утвореннями-відростками. Берега тріщини окиснені (розміром до 0,03 мм у глибину уздовж перетину тріщини). Домінуючі кольори забарвлення – коричнево-жовтий і блакитний. Структура шарів, що прилягають до умовної осі тріщини, відрізняється щільними скупченнями й шаруватістю, що вказує на циклічне та стадійне її зростання в умовах дії інтенсивних механічних напружень. Структура цих утворень має повністю й частково замкнені зони, які можна віднести до границь зерен металу. Враховуючи характер пошкоджуваності металу, фіксуемий після травлення (рис. 3.3), можна зробити висновок про те, що розвивається міжкристалітна корозія в металі (безперервна сітка по границях зерен).

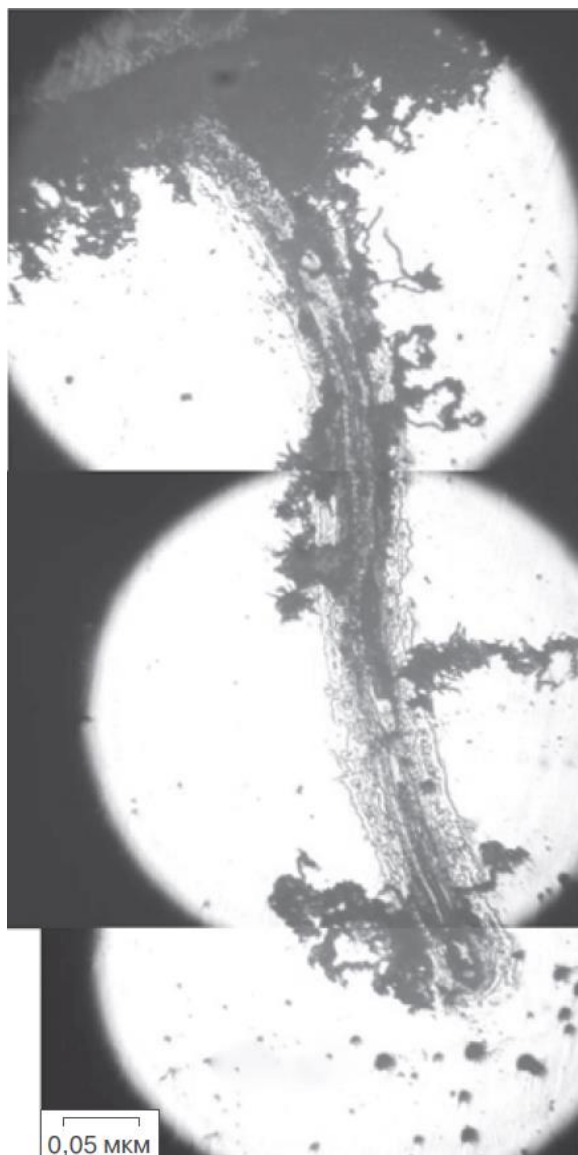


Рисунок 3.2 – Панорама тріщини в зоні пітінгу (нетравлений шліф), $\times 260$

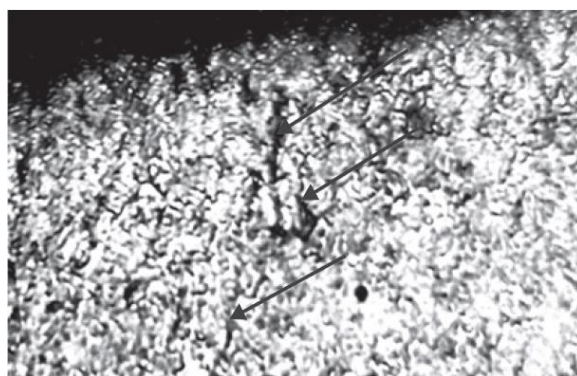


Рисунок 3.3 – Поверхня пітінгу після травлення. Стрілками зазначені міжкристалітні тріщини в глибині металу, $\times 50$

Зона шліфа, що прилягає до кінця тріщини, характеризується групою крапкових

включень, характер розподілу яких вказує на зв'язок зростання тріщини з їхньою наявністю: склад включень піддавали мікрорентгеноструктурному аналізу (МРСА). На рис. 3.4 представлений збільшений фрагмент із зафіксованим характерним розподілом включень. У ряді випадків вони виділяються рядково (за напрямком деформації), а у вершини тріщини – додатково й за границями зерен.

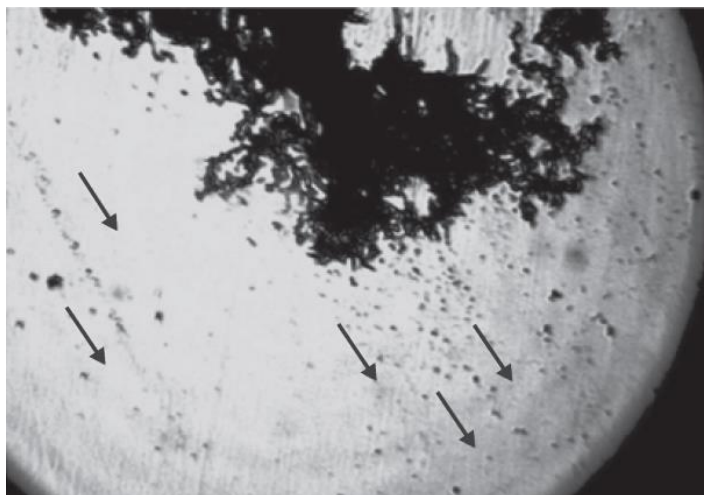


Рисунок 3.4 – Точечні включення. Стрілками зазначений характерний напрямок їх розподілу, $\times 500$

Роль неметалевих включень у розвитку корозійної пошкоджуваності сталевих труб вивчено в роботах [240-242], авторами яких встановлено, що основним фактором, що визначає аномально високу швидкість корозії сталі, незалежно від її марки, слід вважати наявність неметалевих включень особливого типу, умовно названих корозійно-активними (КАНВ). Вони мають складний склад і, як правило, містять кальцій. Автори робіт [240, 241] припустили, що зміна структури металу навколо включення відбувається внаслідок значних локальних напружень і деформацій, викликаних різницею коефіцієнтів термічного розширення металеві матриці й неметалевого включення (насамперед оксидів кальцію й алюмінію). У результаті структурних дефектів на границі метал – включення відзначається зміна металеві матриці, у порівнянні із чистим металом. Цей фактор, за припущенням авторів вищезгаданих досліджень, значно впливає на високу пітингову пошкоджуваність металу НКТ, експлуатованих у корозійно-активному середовищу.

Зіставляючи літературні дані з характером корозійного пошкодження

досліджуваних нами зразків НКТ, можна зробити попередні висновки про механізм деградації металу. Пітингове пошкодження (рис. 3.5) мало місце тільки на внутрішній поверхні НКТ у досліджуваних свердловинах з підвищеною корозійною активністю. Оскільки пітингові ураження розташовані на внутрішній поверхні труб, у зонах найбільшої концентрації зовнішніх механічних напружень (різьбове з'єднання й/або верхні ділянки колони НКТ), справедливо припустити, що керуючим зовнішнім фактором, що визначають ініціювання й розвиток корозійного пошкодження досліджуваних НКТ, є інтенсивні розтягування, створювані вагою колони. Оцінювальні розрахунки розтягувальних напружень у верхній ділянці колони НКТ, як можна припустити, дозволять встановити відповідність діючих навантажень припустимим величинам, складаючих значну частину (до 0,4) критичних значень.

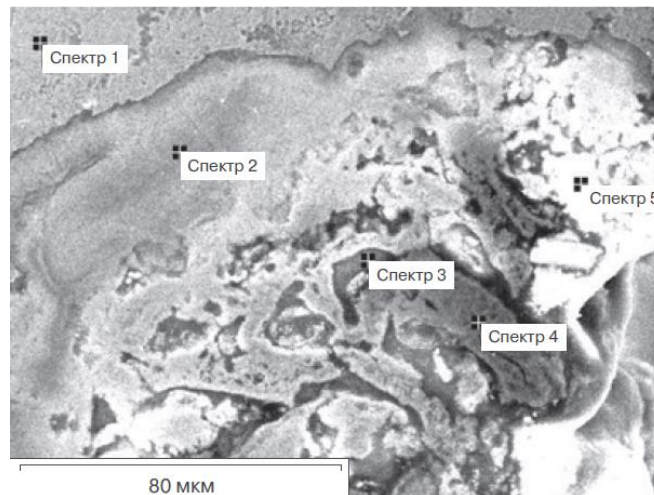


Рисунок 3.5 – Електронне зображення поверхні пітингу, $\times 800$. Зазначені зони локального МРСА зразка НКТ

Отже, причина й механізми корозійних пошкоджень повинні бути віднесені, у першу чергу, з урахуванням оцінки деградації структури під дією значних деформацій, а потім звернути увагу на інтенсифікацію процесів під впливом корозійно-активного середовища (вуглекислотної корозії). При цьому роль керуючого фактору, мабуть, буде визначатися еволюцією структурних змін у сталі під впливом певних (граничних) розтягувальних напружень. Для вивчення структурної деградації й виявлення ініціюючих факторів пошкоджуваності металу НКТ був проведений МРСА зразків металу труб у зоні пітингу й у його глибині, а

також вивчений розподіл хімічних елементів у зазначених зонах. Аналіз виконаний на скануючому електронному мікроскопі JSM-6390 LV фірми JEOL (Японія) із системою рентгенівського аналізу Incaenergy 350 (Oxford instruments analytical ltd). Дані, отримані в ході аналізу спектрів (див. рис. 3.5), не відрізняються від загального вмісту елементів в аналізованому зразку труби. У табл. 3.1 наведені характеристики відповідних спектрів. Велика кількість вуглецю у всіх дефектних зонах свідчить про його дифузію й найважливішу роль в процесах деградації металу НКТ, що відбуваються.

Таблиця 3.1 – Розподіл хімічних елементів у зонах сканування (згідно рис. 3.5)

Елемент	Мас. частка, %	Ат. %	Елемент	Мас. частка, %	Ат. %
Спектр 1			Спектр 4		
C	21,78	56,42	C	32,78	50,91
Mn	1,12	0,63	O	31,16	36,33
Fe	77,10	42,95	Al	0,10	0,07
Спектр 2			Si	0,11	0,07
C	20,52	34,45	S	0,57	0,33
O	40,42	50,94	Cl	2,14	1,13
Cl	2,40	1,37	Ca	0,27	0,12
Cr	0,40	0,16	Cr	1,90	0,68
Fe	36,26	13,09	Mn	0,85	0,29
Спектр 3			Fe	30,10	10,05
C	69,54	81,49	Спектр 5		
O	16,91	14,88	C	17,37	31,15
S	0,15	0,07	O	37,51	50,50
Cl	0,74	0,2	S	0,09	0,06
Ca	0,15	0,05	Cl	4,16	2,53
Cr	3,40	0,92	Fe	40,87	15,76
Fe	9,11	2,30			

Згідно зі спектром 1, що відображає дані МРСА пори у металі зразка НКТ (рис. 3.6), виявлена, крім основного ряду елементів сталі, група неметалів (табл. 3.2). Характерним виявилася присутність у спектрі Pb (0,09 ат. %), наявність якого, імовірно, пояснюється використанням при виплавці сталі засміченою цим компонентом шихти або домішки, що входить до складу пластичного мастила. Спектри 2 і 3 характеризують склад включень у металі. Вони мало відрізняються хімічним набором компонентів. Відмінним є наявність у спектрі 3 марганцю й хрому замість заліза, яке виявлено в спектрі 2 (вміст Fe не перевищує 16,62 %). Наявність кальцію, алюмінію й кисню свідчить, що аналізовані включення належать до алюмосилікатів близького хімічного складу. Аналіз спектрів 1 – 3 (див. рис. 3.6) також вказує на присутність у досліджуваних зонах металу компонентів (C, O, Na, S, Cl, Ca, K) з транспортуємого газорідного середовища, типової для вуглекислотної корозії.

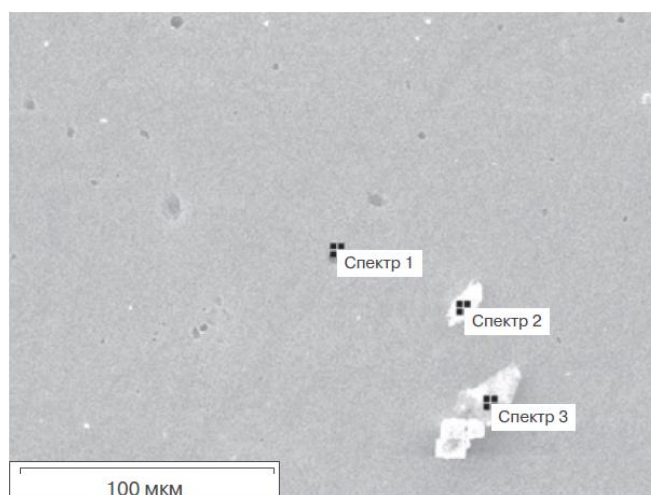


Рисунок 3.6 – Електронне зображення поблизу поверхні пітінгу, $\times 500$. Маркерами позначені зони локального МРСА

В цілому, на основі аналізу складу й розподілу хімічних елементів у досліджених зразках, а також на основі порівняння з раніше опублікованими даними щодо корозійної пошкоджуваності металу НТК, можна зробити наступні висновки.

Розподіл вуглецю як елемента матриці досліджуваного металу багато в чому визначає властивості міцності, показало значне зростання градієнта його концентрації від глибини металу до поверхні корозійної поразки (пітінгу). Відносна концентрація вуглецю в даному напрямку для дослідженої зони пітінгу виросла більш

ніж удвічі (див. спектри 2 і 3 на рис. 3.5). Встановлений факт свідчить про дифузію вуглецю під напругою. Процеси окиснення інтенсифікуються й навколо неметалевих включень, коефіцієнти лінійного розширення яких відрізняються від основного металу (рис. 3.7). Як показали раніше виконані дослідження [243], це відбувається в результаті локальних деформацій при розтягуванні в процесі експлуатації.

Таблиця 3.2 – Дані МРСА зразка НКТ (згідно рис. 3.7)

Елемент	Мас. частка, %	Ат. %	Елемент	Мас. частка, %	Ат. %
Спектр 1			Спектр 2		
C	37,52	63,11	C	43,29	59,55
O	14,81	18,70	O	28,36	29,29
Na	0,68	0,59	Na	1,90	1,37
Al	0,42	0,31	Al	1,14	0,70
Si	0,81	0,58	Si	2,28	1,34
S	0,89	0,56	S	1,19	0,61
Cl	0,33	0,19	Cl	1,12	0,52
Ca	0,78	0,39	K	0,71	0,30
Mn	3,63	1,34	Ca	3,39	1,40
Fe	38,00	13,75	Fe	16,62	4,92
Pb	1,12	0,09			
Спектр 3					
C	43,91	72,99	Cl	0,48	0,27
O	6,81	8,49	K	0,32	0,16
Na	0,61	0,53	Ca	0,38	0,19
Al	0,23	0,17	Cr	0,23	0,09
Si	0,43	0,33	Mn	0,56	0,20
S	0,49	0,31			

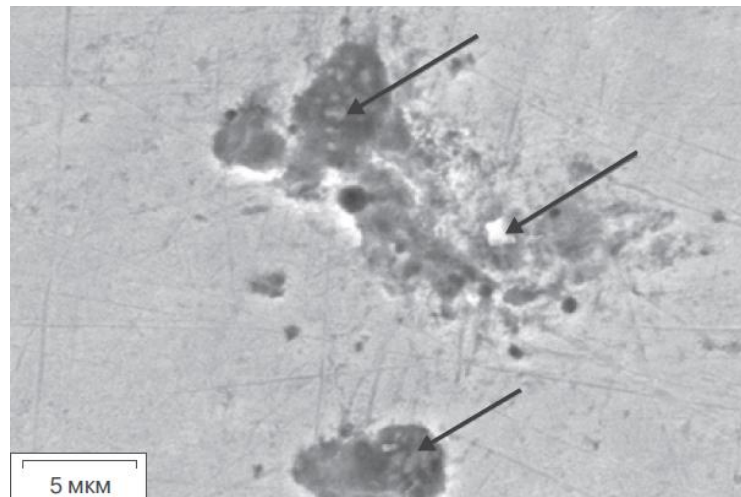


Рисунок 3.7 – Електронне зображення зони металу НКТ, $\times 1000$.

Пори й неметалеві включення позначені стрілками

Процес, пов'язаний з дифузією вуглецю до поверхні, відзначається (у початковій стадії) уже при прокатці. У роботі [243] було встановлено, що при пластичній деформації сталі 20 (склад по вуглецю близький до досліджуваних зразків НКТ) відбувається дроблення цементитних пластин, фази ушкоджуються дефектами (дислокаціями), що рухаються вздовж напрямку навантаження. При дробленні цементиту відзначається розвиток процесу дифузії вуглецю, частина атомів якого йде в пори ОЦК-ґратки, частина – на стінки дислокацій, де надалі вони виступають зародками нових фаз, формованих під напругами. За даними досліджень [244], джерелом вільного вуглецю в сталях є також його особливі з'єднання – фулерени. Згідно з результатами цих досліджень, вільний вуглець, що утворювався й що був присутній у металі труб, може об'єднатися у фулеренові комплекси C_{60} і C_{70} , що надалі призведе до розпушення металу, ослабленню хімічних зв'язків і виникненню додаткових гальванічних пар. Це стимулює корозію за вуглекислотним типом й обумовлює виникнення пітінгов на внутрішній поверхні НКТ.

На основі проведених досліджень можна відзначити наступне.

У результаті значних деформацій у трубах колони інтенсифікуються пороутворення, дифузія вуглецю (за рахунок руйнування цементиту перлітної складової) і вуглекислота корозія виявляється не тільки на поверхні металу труб, але й по їх глибині. При цьому, анодами можуть бути границі зерен, що містять вільний

вуглець, карбідні фази й неметалеві включення, що мають різко відмінні електрохімічні потенціали й властивості міцності.

Підвищена концентрація вуглецю, пороутворення й насичення поверхні елементами, що входять до складу активно корозійного середовища, сприяють деградації металу НКТ при експлуатації (особливо на внутрішній поверхні), а також визначають поріг розтягувальних напружень, що ініціюють виникнення вуглекислотної корозії в добувних свердловинах.

3.2 Обґрунтування параметрів оцінки пошкоджуваності металу труб неруйнівним методом контролю якості

У розділі розглянуті аспекти застосування магнітного методу неруйнівного контролю по коерцитивній силі для оцінки експлуатаційної стійкості насосно-компресорних труб, використовуваних у газодобувній галузі. Проаналізовані можливості оцінки якості й пошкодження металу НКТ при експлуатації цим методом [245].

У зв'язку з різноманіттям умов експлуатації свердловинного устаткування й колон НКТ пред'являються особливо високі вимоги до стабільності металу. В останні роки почастишали випадки відмови устаткування на свердловинах газоконденсатних родовищ через корозійне пошкодження й руйнування труб. Кількість аварій, пов'язаних з руйнуванням НКТ, на деяких родовищах, як було показано раніше, досягає 80% від загального числа аварій свердловинного устаткування. Значна частина таких відмов пов'язана з обривами колон НКТ, викликаними не тільки дефектами геометричних параметрів (неспіввісність з'єднання «труба – муфта», порушення форми й розмірів профілю різьби), але також загальною й локальною корозією тіла труб і фретинг-корозією різьбового з'єднання. Інтенсивна корозія різьбової частини НКТ призводить до ослаблення несучої здатності колони в цілому й виступає першопричиною її обриву.

Безаварійна й безпечна експлуатація колон насосно-компресорних труб (НКТ) є запорукою високих економічних показників газодобувної галузі. Реалізація цього

першочергового завдання прямо пов'язана з можливостями неруйнівного контролю технічного стану й прогнозування залишкового ресурсу НКТ на різних стадіях експлуатації.

Аналіз існуючих методів оцінки технічного стану НКТ показав, що вони регламентуються ГОСТ 633, Апіспес 5СТ і спрямовані на ефективне виявлення бракувальних дефектів методом кількісного порівняння обмірюваних параметрів з нормативними. Зазначені нормативні документи не містять показників якості НКТ, що характеризують опір корозійному руйнуванню, статичній й циклічній втомі в експлуатаційному середовищі й корозійно-механічному опору протягом регламентованого терміну служби.

Технічні вимоги до НКТ, викладені в ГОСТ 633, регламентують контроль виробничого процесу виготовлення труб і встановлюють значення їх геометричних розмірів, механічних характеристик для різних груп міцності сталі, вміст домішок хімічних компонентів, а також норми відхилень цих параметрів як для труб, так і для різьбових з'єднань. У вимогах також міститься перелік неприпустимих і припустимих дефектів, обумовлених способом виробництва, які можуть бути виявлені неруйнівним методами контролю.

У згаданих вище методах оцінки технічного стану НКТ не передбачається використання заходів проміжного контролю НДС (напружено-деформованого стану), властивостей і структури металу НКТ при тривалому їх контакті з корозійним середовищем. Підхід, що склався при контролі НКТ і умов використання не дозволяє оцінювати придатність до подальшої експлуатації корозійно-пошкоджених труб, запас їх надійності залежно від корозійної активності свердловинних середовищ, а також ступеню деградації металу для оцінки ресурсу.

Найбільш частими причинами відмов є: отвори й тріщини в тілі НКТ, потоншення її стінки, злам по різьбовому з'єднанню, звуження прохідного перетину колони через асфальтосмолопарафінові відкладання. Найбільша кількість дефектів, що викликає відмови, виникають у тілі НКТ і є наслідком протікання процесів електрохімічної корозії, її розтріскування, втоми, а також специфічного сульфідного розтріскування, адсорбції твердих відкладень, корозійно-механічного зношування.

Для встановлення залежності «характер пошкодження – коерцитивна сила» НКТ на різних ділянках колони, а також вивчення можливості використання цього методу контролю для оцінки структурно-механічного стану металу труб і прогнозування їх експлуатаційної стійкості були проведені спеціальні дослідження.

У даній роботі планували визначити можливість застосування неруйнівного методу магнітного контролю для оперативної оцінки характеру пошкодження металу тіла труб і різьбового з'єднання НКТ як найбільш уразливих елементів колони. За даними Американського нафтового інституту (API), частка аварій через руйнування різьбових з'єднань становить 55%.

В якості об'єктів дослідження були обрані елементи різьбових з'єднань і тіла трьох НКТ зі сталі P-110 виробництва Китаю (діаметр труби 73 мм, товщина стінки 5,5 мм), що експлуатувалися в умовах підвищеної корозії [237]. В результаті аналізу пошкоджуваності труб встановлене наступне. Газорідинні потоки у відповідних свердловинах характеризувалися як корозійно-активні при наявності ряду діючих факторів (див. розділ 3.1).

У якості інформативного параметра магнітного контролю обрана коерцитивна сила, що було продиктовано наступними міркуваннями. Незважаючи на різні механізми впливу свердловинних середовищ на метал НКТ, необхідною умовою зародження й розвитку корозійного пошкодження є структурні неоднорідності (або дефекти) як технологічного, так і експлуатаційного характеру. При цьому корозійні руйнування феромагнітного матеріалу супроводжувалися змінами потенційно-енергетичного рельєфу за рахунок перерозподілу внутрішніх напружень, викривлень поверхневого шару, виникнення нової картини розподілу дефектів і т.д. У той же час розвиток дефектів, які присутні у структурі металу на мікро- і макрорівнях (неметалеві включення, смугастість, скупчення дислокацій, мікро- і макротріщини і т.д.), відбувається в умовах напружено-деформованого стану (НДС) металу. В цілому НДС колони інтегрально враховує напруження від експлуатаційних навантажень, обумовлених змінами властивостей міцності в результаті електрохімічних процесів. На загальний НДС також впливає зміна поперечного перерізу НКТ через його зменшення при розтягуванні.

Магнітні властивості металів, як відомо, значною мірою чутливі до змін структурних, а також напружених станів сталей і сплавів. Одним з найбільш інформативних магнітних параметрів є коерцитивна сила. Завдяки добре вивченим кореляційним зв'язкам з механічними характеристиками більшості феромагнітних сталей [244], коерцитивна сила може бути використана для якісної оцінки (ранжирування) рівня структурної неоднорідності й напружено-деформованого стану виробів. Крім того, застосування сучасних коерцитиметрів дозволяє виконувати відбудування від повітряного зазору величиною до 6 мм і, отже, не вимагає попередньої підготовки поверхні для проведення контролю. Цей фактор вкрай важливий для оперативної оцінки ступеня пошкодження різьбових з'єднань НКТ. Таким чином, застосування в даному дослідженні методу коерцитивної сили цілком обґрунтоване і актуальне.

Зразки для досліджень були виготовлені з вирізаних фрагментів труб з різним характером і ступенем пошкодження. Для визначення коерцитивної сили (K_c) використовували коерцитиметр КРМ-ЦК-2М. Вздовж осі труб виміри виконували великим датчиком на всіх зразках (на зразку № 1 (рис. 3.8)). Крім того, використовували малий датчик для вимірів уздовж і поперек осі, що було обумовлено необхідністю оцінки вимірів у локальному об'ємі металу для визначення анізотропії властивостей (4-а зона контролю, наявність наскрізних отворів у різьбовому з'єднанні). Незважаючи на різні площі вимірюваної поверхні великого й малого датчиків, зона контакту при виконанні вимірів в обох випадках була приблизно рівною (радіус кривизни поверхні НКТ становив ~ 40 мм). Це дозволило використовувати дані вимірів коерцитивної сили, отримані за допомогою малого датчика, без перерахування. Запропонований авторами метод проведення вимірів коерцитивної сили захищений патентом України [246].

Аналіз стану металу НКТ у зонах контролю дозволив умовно виділити три ступені за рівнем пошкоджуваності: критична – наскрізні отвори й осередкова виразкова корозія внутрішньої поверхні в різьбовому з'єднанні (див. рис. 3.9); сильна – суцільна дрібновиразкова корозія внутрішньої поверхні різьбового з'єднання (рис. 3.9); помірна – рівномірна корозія внутрішньої поверхні тіла труби (рис. 3.10,

хвилеподібний профіль).



Рисунок 3.8 – Різьбове з'єднання зовнішньої поверхні (фрагмент НКТ), зруйноване виразковою корозією



Рисунок 3.9 – Вид внутрішньої поверхні зруйнованого різьбового з'єднання



а

б

Рисунок 3.10 – Вид поверхні різьбового з'єднання (а) і внутрішня його поверхня (б) (суцільна виразкова корозія)

На рис. 3.8 наведені зони контролю зразка з наскрізними отворами в різьбовому з'єднанні. Характер пошкоджень дозволяє зробити висновок про механізм руйнування металу в 4-й зоні контролю. Товщина металу НКТ у місцях западин різьби мінімальна, що обумовлює максимальний рівень напружень, викликаних як механічними навантаженнями, так і корозійним впливом. Цей висновок підтверджується рівнем коерцитивної сили в різьбовому з'єднанні зразка. Як було згадано вище, коерцитивна сила є своєрідним індикатором рівня механічних напружень, обумовлених структурною неоднорідністю. Остання може бути викликана різними, у тому числі експлуатаційними факторами. Отримані наступні результати вимірів коерцитивної сили, виконаних у відповідності зі схемою контролю (див. рис. 3.8):

Номер зони контролю	1	2	3	4
Великий датчик				
$H_{c \text{ осьова}}$	12,3	16,0	12,0	-
Малий датчик				
$H_{c \text{ осьова}}$	12,2	15,4	13,2	26,0
$H_{c \text{ дольова}}$	16,0	13,8	11,0	19,0

Статистичний аналіз вимірів коерцитивної сили характеризується наступними показниками H_c (середнього значення), D (дисперсії середнього) і СКВ (середньоквадратичного відхилення).

Великий датчик:

$$H_{c \text{ осьова}} = 13,4 \text{ А/см}, D = 3,3, \text{СКВ} = 1,8, \text{АКС}_{\text{осьова}} = 19\%.$$

Малий датчик:

$$H_{c \text{ осьова}} = 16,7 \text{ А/см}, D = 30,2, \text{СКВ} = 5,5; H_{c \text{ дольова}} = 15,0 \text{ А/см}, D = 8,6, \text{СКО} = 2,9, \text{АКС}_{\text{осьова}} = 36\%; \text{АКС}_{\text{дольова}} = 27\%,$$

де АКС (анізотропія коерцитивної сили в осьовому й дольовому напрямках) обчислювалася за формулою:

$$\text{АКС} = (H_{c \text{ max}} - \bar{H}_c) / \bar{H}_c. \quad (3.3)$$

Корозійна пошкоджуваність металу зразка, наведеного на рис. 3.9,

характеризується локальними виразками загальною площею близько 50%, з мінімальним залишковим потоншенням у межах 2-4мм.

При ранжируванні пошкодження металу НКТ за коерцитивною силою був встановлений максимальний рівень, що склав 26 А/см (максимум в 4-й зоні контролю), який відповідав максимальному рівню корозійного пошкодження.

Зразок (див. рис. 3.10) характеризувався наступними значеннями коерцитивної сили, вимірюваної великим датчиком: H_c осьова дорівнювала 14,0; 16,1; 13,2 для зон контролю № 1, 2 і 3 відповідно. Статичний аналіз вимірів показав наступне: $H_c = 14,4$ А/см, $D = 1,5$, СКВ = 1,2, АКС = 12%, де АКС обчислюється за формулою (3.3).

Корозійне пошкодження металу досліджуваного зразка (див. рис. 3.11) характеризується локальними виразками загальною площею близько 95%, з мінімальним залишковим потоншенням у межах 2,5-3,5 мм. Максимальний рівень коерцитивної сили має значення 16,1 А/см, що становить 62% від максимальної величини для зразка, наведеного на рис. 3.7.

Зразок (рис. 3.11), який був вирізаний з тіла НКТ, характеризується суцільною корозією внутрішньої поверхні з хвилеподібним профілем. Результати вимірів коерцитивної сили великим датчиком наступні: H_c осьова дорівнювала 9,7; 11,3; 9,9 для зон контролю № 1, 2 і 3 відповідно. Середній статистичний аналіз цього варіанта пошкоджуваності характеризується: $H_c = 10,3$ А/см, $D = 0,5$, СКВ = 0,7, АКС = 10%.

Максимальні значення коерцитивної сили зафіксовано на рівні 11,3 А/см, що становить 44% від показань її в якісній зоні зразка. Для встановлення кореляції структурного пошкодження й коерцитивної сили виконане ранжирування (якісне порівняння) отриманих даних.

В якості шкали для осі X використане умовне пошкодження металу НКТ із характеристичними критеріями. Критичному пошкодженню (наскрізні отвори) привласнений третій рівень (рис. 3.12), сильному - другий рівень і помірному пошкодженню – перший. Пошкодження металу в кожній із зон контролю відповідали певним значенням коерцитивної сили. Середні значення коерцитивної сили є малоінформативними, оскільки не характеризують динамічний діапазон цієї структурно-чутливої характеристики. Отримана залежність (близька до лінійної),

дозволяє характеризувати ступінь пошкодзованості НКТ за мінливістю коерцитивної сили металу. Запропонований метод контролю стану труб при експлуатації є також ефективним для оцінки якості й однорідності властивостей металу при виробництві такої продукції й може бути використаний на ділянках контролю при здавальних випробуваннях металопродукції [247].



а



б

Рисунок 3.11 – Вид поверхні тіла НКТ (а) і внутрішньої поверхні НКТ (б) (суцільна корозія без наскрізних отворів із хвилеподібним профілем)

На підставі аналізу отриманих даних виявлена при різному стані НКТ зона розкиду значень коерцитивної сили, що характеризує ступінь деградації металу залежно від інтенсивності його пошкодзованості. Коерцитивна сила в місцях корозійно-механічного пошкодження НКТ зв'язана (майже лінійно) з рівнем

структурної пошкоджуваності, що дозволяє використовувати такий неруйнівний магнітний контроль за цим параметром, а також діагностувати стан передруйнування.

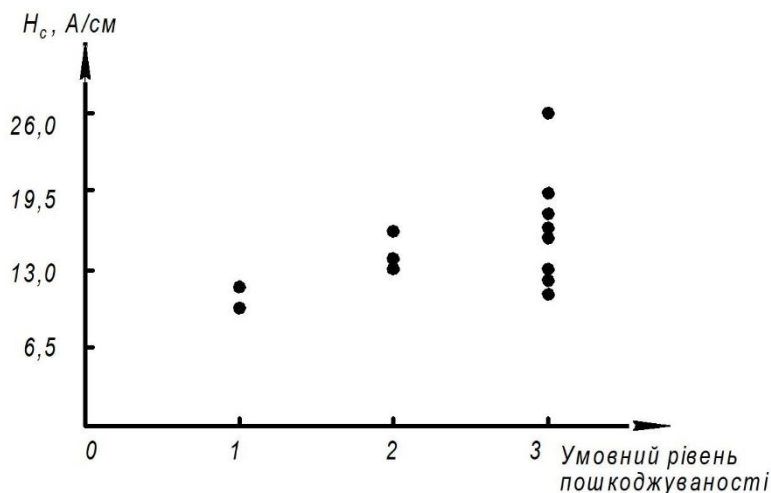


Рисунок 3.12 – Залежність зміни коерцитивної сили від структурного пошкодження металу НКТ

При використанні даного підходу до вирішення практичних завдань потрібна додаткова оцінка локальних структурних змін, що дозволить більш надійно судити про ресурс труб в експлуатації. Крім того, для широкого використання цього методу необхідна розробка методичних вказівок з використанням H_c у якості індикаторного параметра для надійного контролю рівня пошкодження металу труб з різних матеріалів, їх сортаменту й умов експлуатації.

3.3 Особливості зношування й деградації металу в процесі експлуатації культиваторних лап сільськогосподарської техніки

Істотним недоліком сучасних стрілочастих лап культиваторів із площинними деформаторами є неякісне розпушування ґрунту. Інтенсифікація такого процесу супроводжується підвищеним зношуванням ріжучих кромки леза лап, які впливають на енергономічні показники використовуваної техніки. Крім того, відбувається руйнування біоактивних структур ґрунту до пилоподібних, які легко зазнають ерозії [248].

У цьому зв'язку становить інтерес проведення досліджень щодо оцінки

характеру зношування культиваторних лап для розробки нового технологічного процесу, що забезпечить як підвищення їх довговічності, так і якість обробки ґрунту.

У цей час відсутні реальні фізико-математичні моделі абразивного зношування й формування геометрії ріжучих елементів лап культиватора. Визначення основних закономірностей абразивного зношування ріжучих елементів, формування оптимальної їхньої геометрії, добір матеріалів для виготовлення й зміцнення, їх вплив на технологічний процес виробництва й експлуатації є важливим завданням для вирішення проблеми підвищення ресурсу ґрунтообробних органів машин [131, 248].

Встановлене [248], що процес взаємодії робочих органів машин із ґрунтом при їх переміщенні характеризується впливом абразиву на клин із плоскою або криволінійною робочою поверхнею. Вплив лапи на ґрунт залежить від характеру деформування матеріалу, параметрів клину, фізико-механічних властивостей і стану металу, а також ґрунту, швидкості переміщення техніки.

Величину абразивного зношування лапи по товщині можна представити у вигляді функції від наступних факторів:

$$I_h = f(p, L, H_\mu, m, S), \quad (3.4)$$

де p – нормальний питомий динамічний тиск ґрунту; L – шлях тертя; H_μ – твердість матеріалу лапи; m – показник зношувальної здатності абразиву; S – площа тертя.

Для аналізу зміни профілю стрілочастих лап культиваторів в експлуатації були обрані вироби виробництва Marathon Series фірми Osmundson (рис.3.13) і 9.3" Tigermate II фірми CNH (рис. 3.14). Порівняльно досліджували як нові, так і відпрацьовані (зношені) в однакових умовах (ґрунтах) експлуатації [249, 250].

При контролі перевіряли товщину й основні розміри крил, ширину захвату.

Візуально видно, що їх геометричні розміри після експлуатації суттєво відрізняються. Для визначення мінливості товщини використовували лінійку й цифровий штангенциркуль фірми Miol. Основні характеристики: точність виміру – 0,01мм, діапазон виміру 0-150мм. Вимір лап проводили відповідно розробленої схеми, представленої на рис. 3.15.



а



б



в

а – нова; б, в – зношені

Рисунок 3.13 – Стрілчасті лапи культиватора виробництва Marathon Series фірми Osmundson



а



б



в



г



д



е



ж



з



и



к



л

а – нова; б-л – зношені

Рисунок 3.14 – Стрілчасті лапи культиватора 9.3" Tiger Mate II фірми CNH

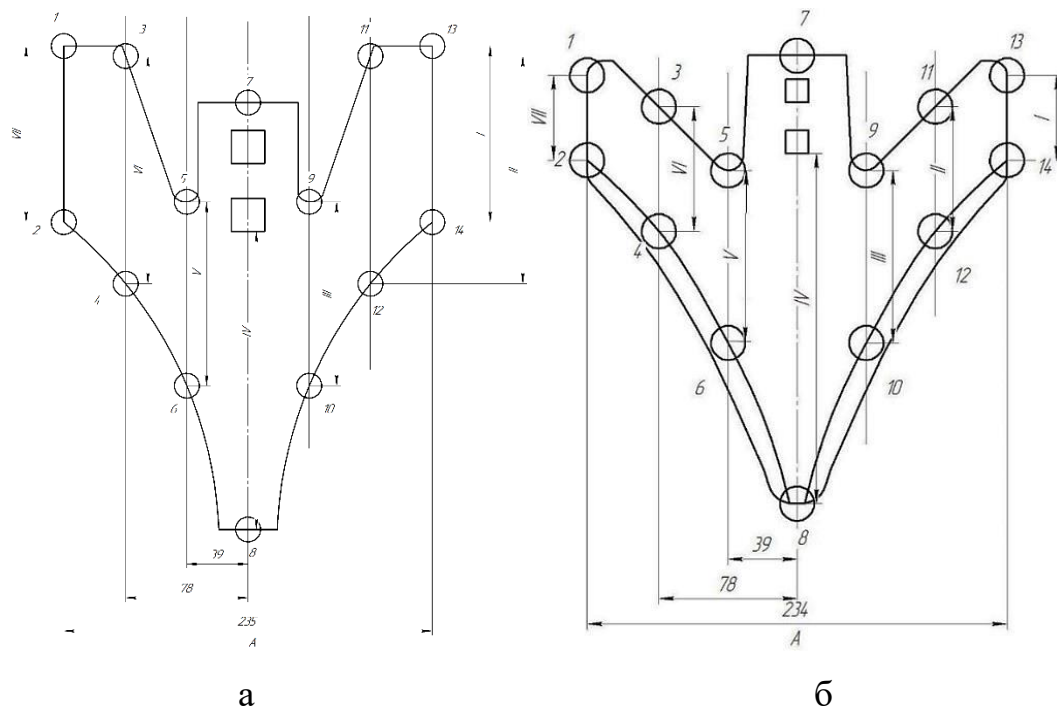


Рисунок 3.15 – Вимір товщини й лінійних розмірів на новій (а) і зношеній (б) культиваторних лапах фірми Marathon Series і ТМ II 9,3"

Кружечками показані точки виміру товщини. Оцінка якості нових культиваторних лап показала, що їх геометричні розміри із двох сторін ідентичні, а зміна товщини становить 5,43-6,09мм для Marathon Series і 6,34-7,33 для 9.3" Tiger Mate II. На кожній лапі проводили по 14 вимірів. Ширина захвату нових лап двох різних виробників становила 235мм і 234мм відповідно. При вимірах розділили лапу від центру на три умовні зони, через 39мм для кожної. Геометричні розміри позначені римськими цифрами – розміри крил, носка, які відповідали 7 вимірам. Ці виміри виконували для оцінки величини зношування. Далі, робили виміри ширини захвату на зношених лапах – розмір А (див. рис.3.15), відмінності яких помітні й візуально. По різниці між показаннями нової лапи й, тих що вийшли з експлуатації, судили про їх зношування. Це аналізували їх сполученням (накладенням).

На підставі запропонованої методики були проаналізовані культиваторні лапи закордонного виробництва (рис. 3.16-3.19). Ширина лап Marathon Series практично не змінювалася в процесі експлуатації, а 9.3" Tiger Mate II зменшилась в межах від 234мм до 227мм.

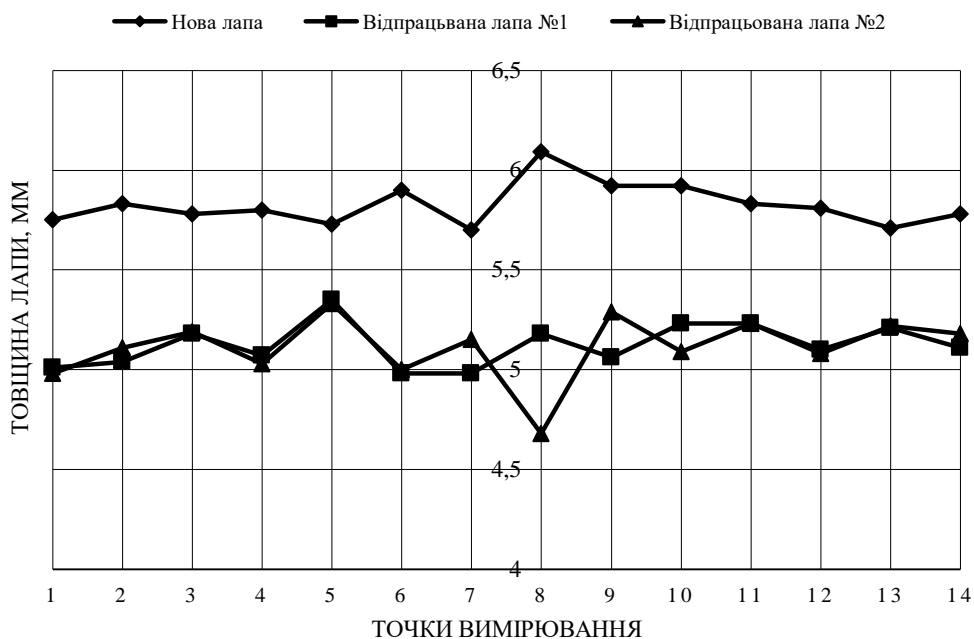


Рисунок 3.16 – Зміна товщини металу культиваторних лап Marathon Series виробництва США в процесі експлуатації

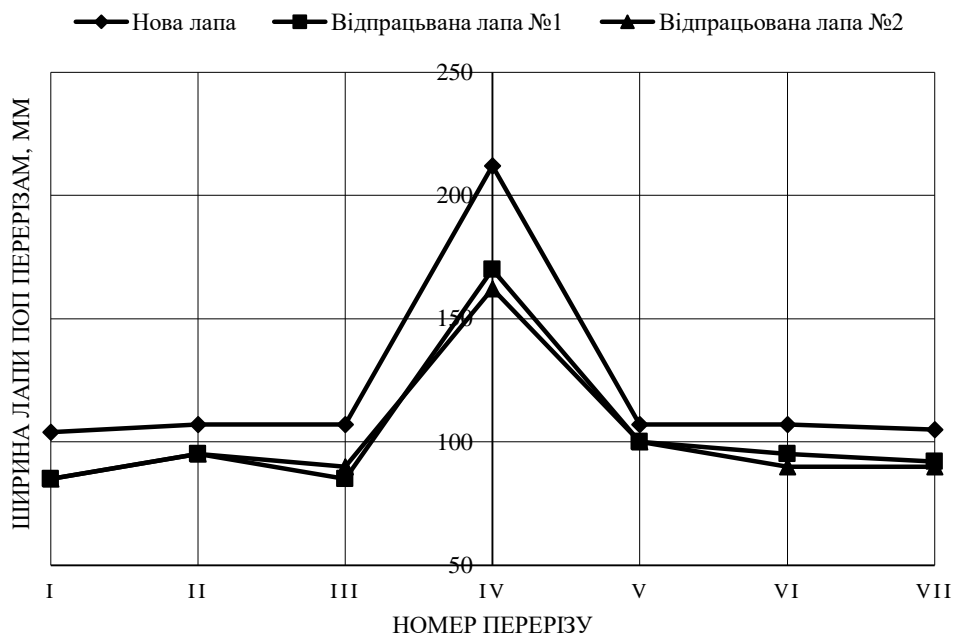


Рисунок 3.17 – Зміна розмірів по перетинах культиваторних лап Marathon Series виробництва США (див. рис. 3.15)

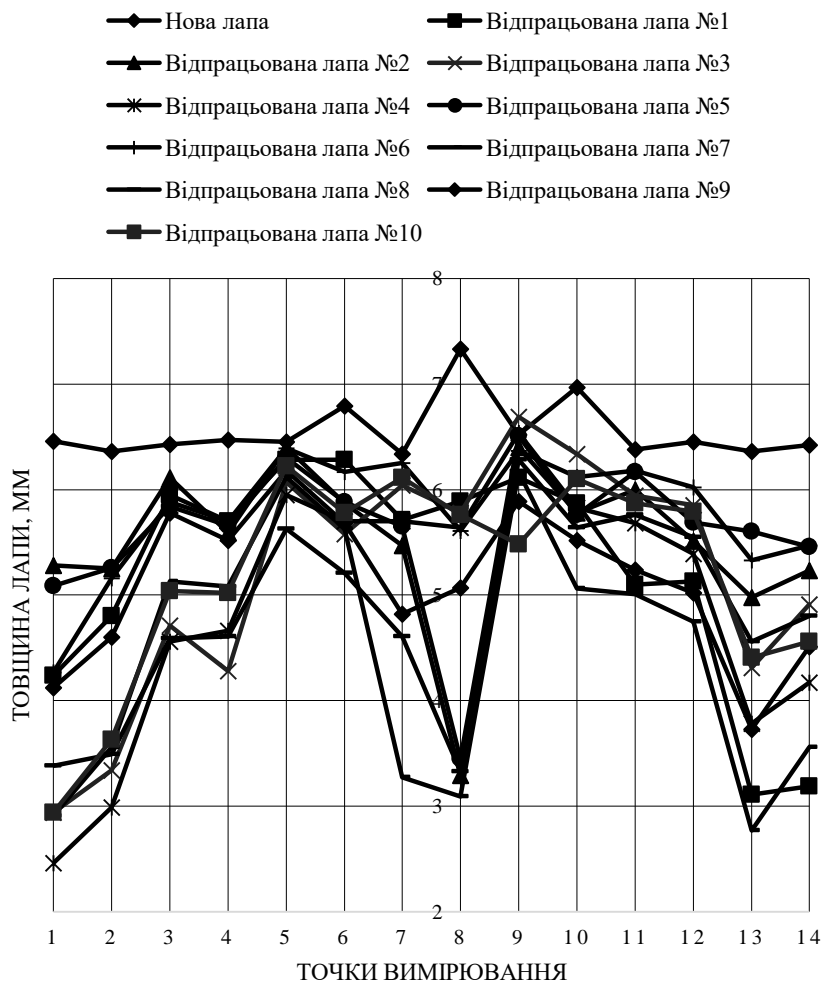


Рисунок 3.18 – Зміна товщини металу при експлуатації культиваторних лап 9.3" Tiger Mate II виробництва Канади (згідно рис. 3.15)

З отриманих даних випливає [251, 252], що культиваторні лапи зношуються нерівномірно, товщина в усіх зонах аналізу відрізняється (рис. 3.16, 3.18). Розмірні характеристики нових лап однакові й симетричні. Після експлуатації вони суттєво відрізняються (рис. 3.17, 3.19). Це свідчить про те, що лапи працюють у різних умовах, ґрунтах і зношуються нерівномірно. Так само спостерігається перекис при закріпленні їх на стойці культиватора. Деякі лапи мали видимі потертості (у зоні кріплення лапи) основного металу, що свідчило про їх великий наробіток і несвоєчасну заміну при технічному обслуговуванні або ремонті.

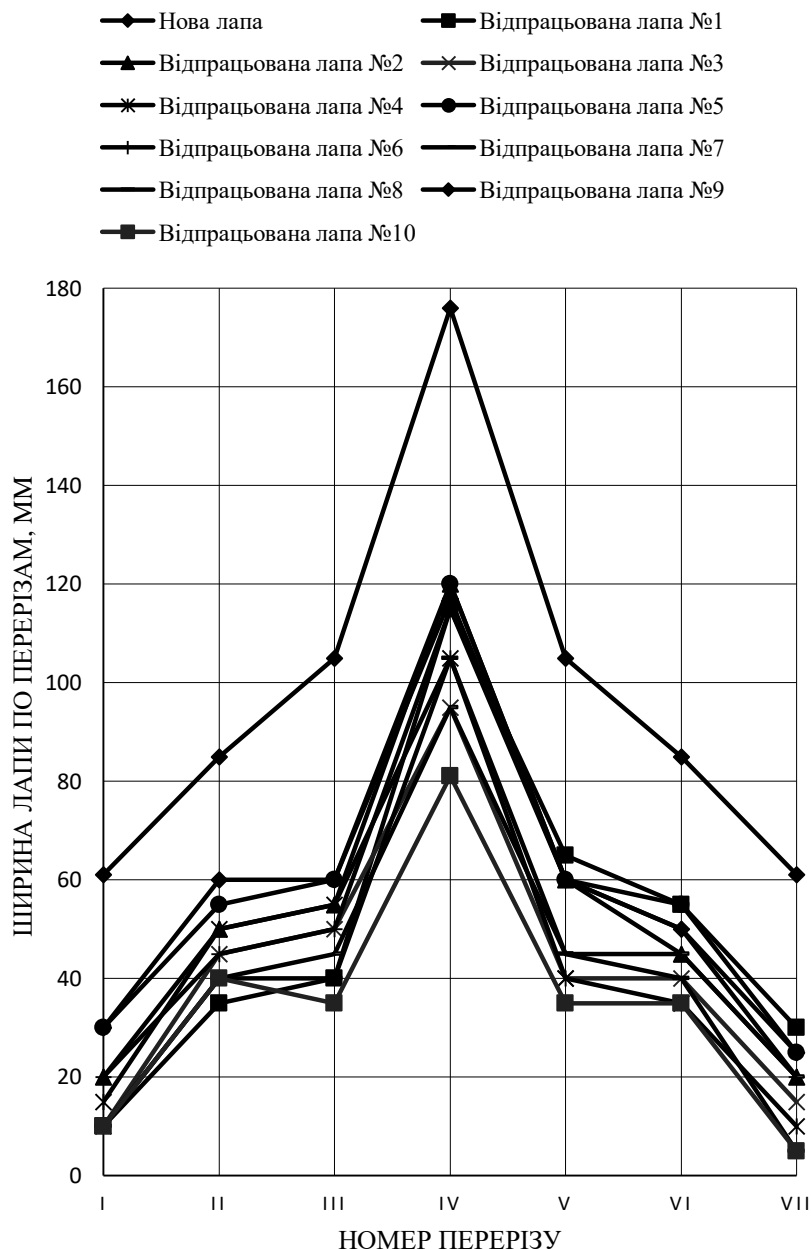


Рисунок 3.19 – Зміна розмірів культиваторних лап 9.3" Tiger Mate II виробництва Канади по зонах перетину (згідно рис. 3.15)

Зношування ріжучих крамок лап культиваторів є необоротним процесом під час взаємодії із ґрунтом при виконанні робіт. Величина й характер зношування визначаються, насамперед, закономірностями розподілу напружень на робочих поверхнях культиваторної лапи.

Для забезпечення довговічності культиваторних лап, зниження величини їх зношування необхідно, з однієї сторони зменшувати схильність до абразивної

пошкоджуваності, а з іншого – забезпечити підвищення експлуатаційних властивостей їх матеріалу на основі використання нових технологій і типів зміцнюючих покриттів, які наносяться.

Виходячи з досвіду фахівців ХНТУСГ, найбільш ефективно є зміцнення при використанні оптимальних матеріалів і спеціального модифікування. Експериментальні дослідження свідчать про те, що найбільша інтенсивність зношування стрілчастих лап культиватора характерна для носка. У міру віддалення від нього, інтенсивність зношування ріжучої кромки лапи знижується.

Закономірність зміни інтенсивності зношування лапи по довжині її ріжучої кромки може бути описана, запропонованої в роботах [248, 251, 252] залежністю, яка має вигляд:

$$i = i_0 m_i l^{-\frac{H_\mu X}{H_a} \sqrt{\frac{E_M S}{pT}}}, \quad (3.5)$$

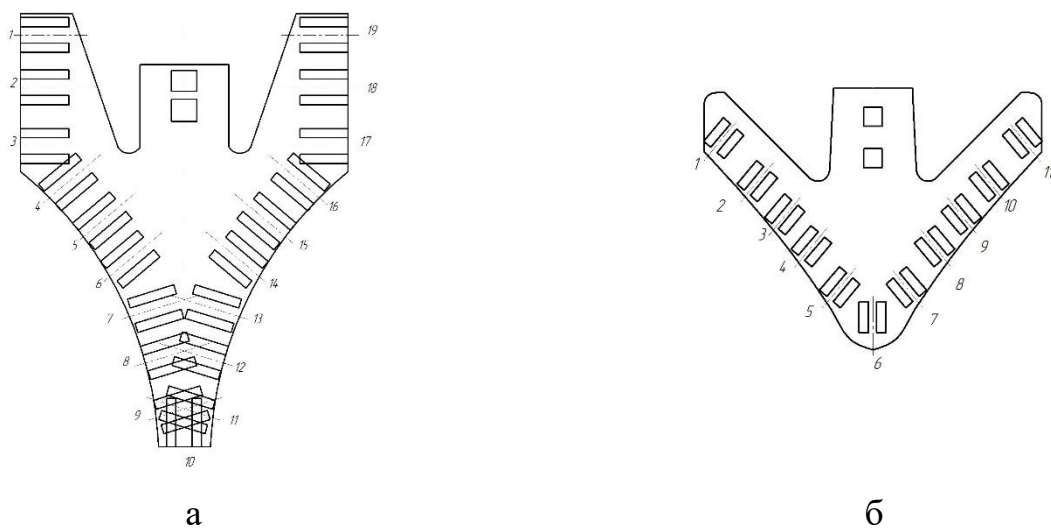
де H_μ і H_a – відповідно значення твердості матеріалу лапи й абразиву; X – емпірична постійна, що враховує оптимальні фактори; E_M – коефіцієнт пружності матеріалу лапи; S – площа робочої поверхні лапи; p – питома навантаження ґрунту на лапу; T – наробіток на одну лапу; l – довжина елемента пласта; i – інтенсивність зношування.

Аналіз запропонованої залежності інтенсивності зношування по довжині ріжучої кромки показує, що нерівномірне зношування лапи культиватора можна пояснити змінним тиском ґрунту на різні зони по її периметру.

3.4 Оцінка напруженого стану культиваторних лап

Нові й зношені культиваторні лапи виробництва Marathon Series фірми Osmundson [253] і 9.3" Tiger Mate II фірми CNH перевіряли на наявність дефектів, неоднорідність структури й напружений стан металу по зміні коерцитивної сили з використанням приладу системи КРМ-Ц-К2М. Вимірювання коерцитивної сили в культиваторних лапах проводили в наступній послідовності. Згідно схем вимірювання (рис. 3.20), лапи Marathon Series фірми Osmundson оцінювали в 19

точках, а лапах 9.3" Tiger Mate II фірми CNH – в 11 при використанні малого щупа (перетворювача).



а – Marathon Series фірми Osmundson; б – 9.3" Tiger Mate II фірми CNH

Рисунок 3.20 – Схеми вимірювання коерцитивної сили

Виконаний аналіз якості культиваторних лап в процесі їх виробництва й експлуатації [86], який проводили на основі статистичної обробки показань вимірів коерцитивної сили.

За запропонованою методикою були проведені вимірювання величини коерцитивної сили на культиваторних лапах (рис. 3.21 і 3.22) для визначення напруженого стану. З отриманих залежностей видно, що для нових лап фірми Osmundson характерний незначний розкид у показаннях коерцитивної сили по вимірюваних точках. Розкид значень змінюється від 11,8 до 12,7 А/см, що вказує на добру якість металу і його штампування. Хімічний склад матеріалу культиваторних лап фірми Osmundson наступний, %: 0,265 С; 0,29 Si; 1,24 Mn; 0,80 Cr; 0,15 Ni; 0,0022 В. За ДСТУ EN 10083-3 – це борована сталь марки 30MnB5. У зношених лап спостерігається зміна коерцитивної сили на крилах. Особливо це видно на лапах з наробітком 900га. На крилах лап вона знижується до 10,8-11,3 А/см.

Динаміка зміни коерцитивної сили залежно від наробітку вказує на мінливість ступеня структурної деградації металу, незважаючи на сформовані напруження в зоні крил культиваторних лап.

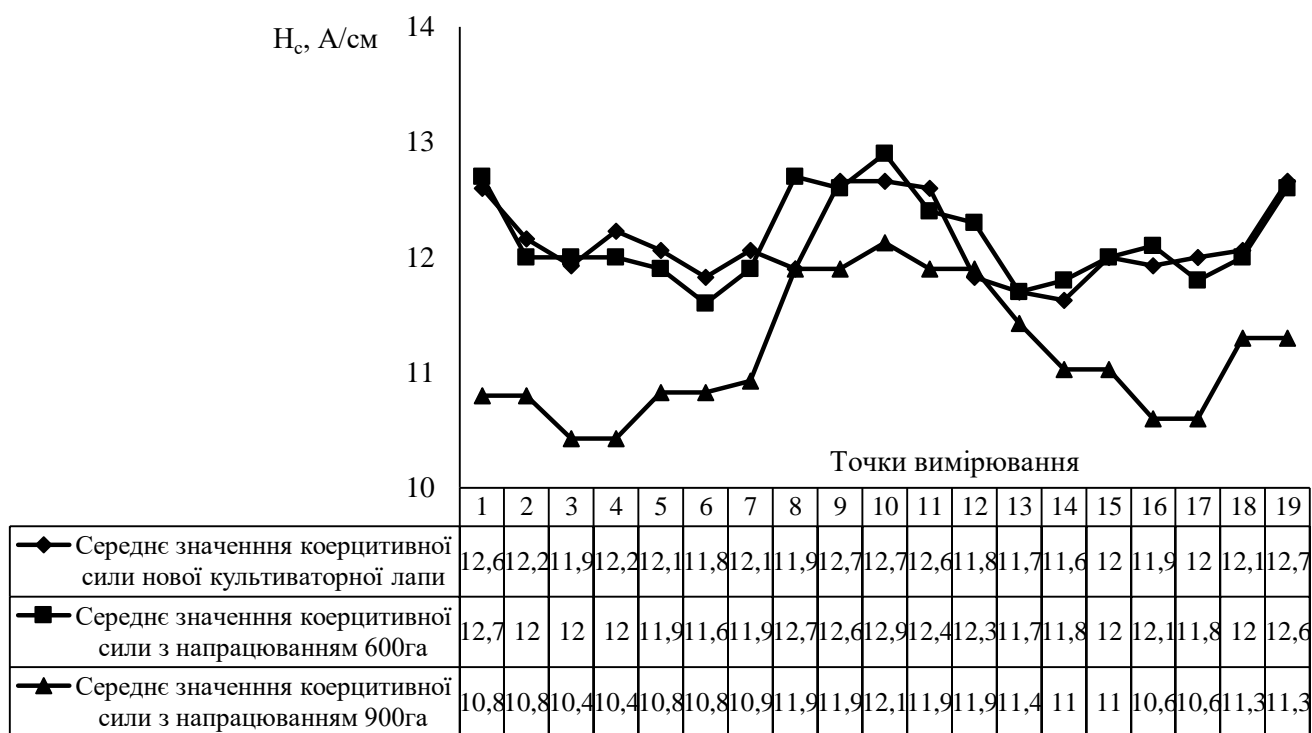


Рисунок 3.21 – Зміна показань коерцитивної сили в різних зонах культиваторних лап фірми Osmundson (схема вимірів наведена на рис. 3.20, а)

Для нових лап фірми CNH характерний значний розкид у показаннях коерцитивної сили по вимірюваних зонах. Розкид значень становить від 13,36 до 20,53 А/см, що вказує на виникнення значних локальних напружень у матеріалі в області крил і зниження їх у носка при штампуванні. Із цього випливає, що штампування відбувається з деяким перекосом при установці заготовки.

У зношених лап спостерігається підвищення напруженого стану по всіх зонах вимірів з незначним розкидом значень коерцитивної сили. Розкид показань перебуває в межах від 17,23-25,23 А/см. Для всіх аналізованих лап характерно деяке зниження напруженого стану на носку й зростання – на крилах.

Для контролю напружено-деформованого стану виробів і металоконструкцій, виготовлених з різних марок сталей і сплавів, застосовують коерцитиметри відмінних типів.

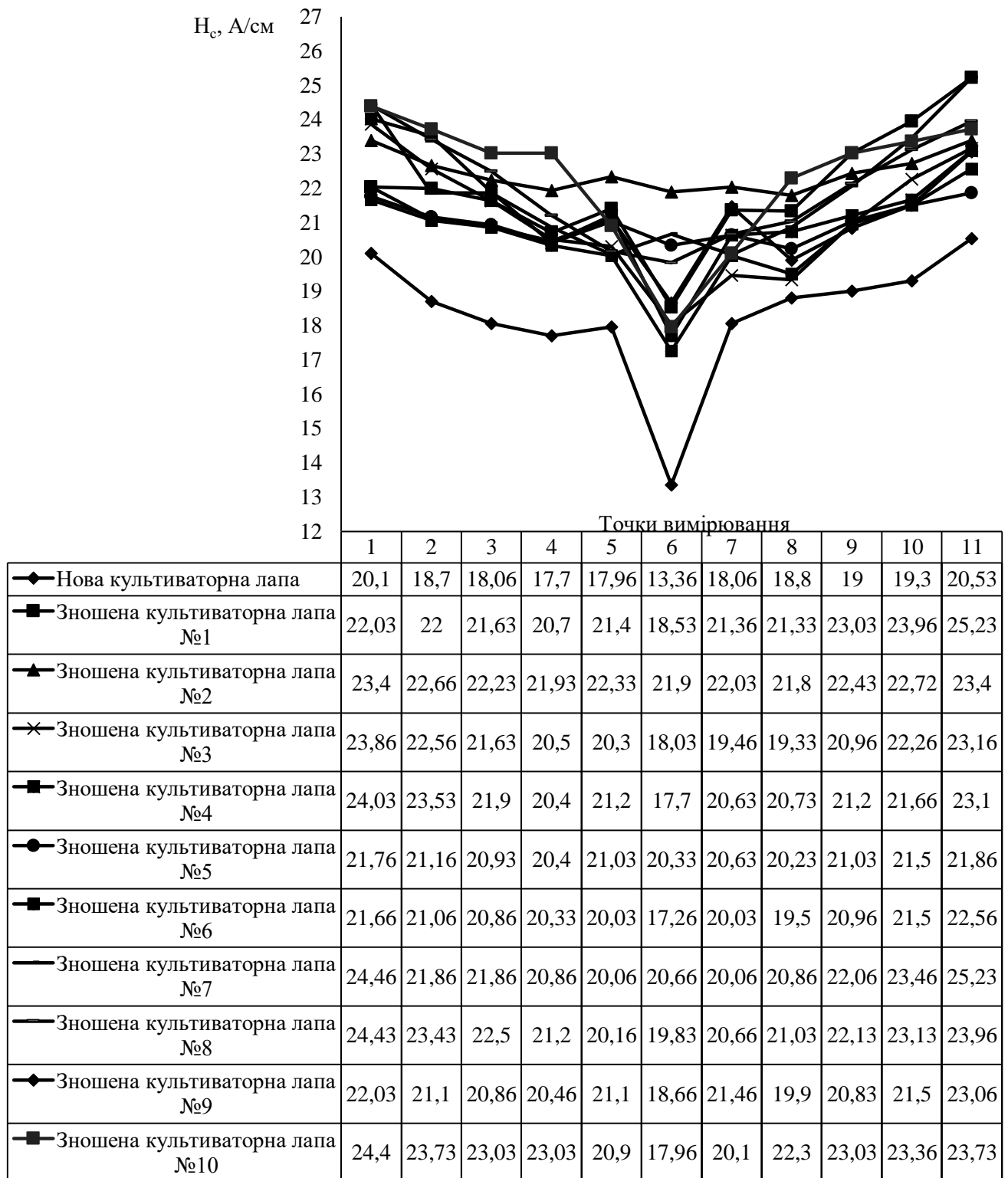


Рисунок 3.22 – Характер мінливості коерцитивної сили в культиваторних лапах фірми CNH до й після експлуатації (схема вимірів наведена на рис. 3.20, б)

Структуроскоп магнітний КРМ-Ц-К2М можна використовувати на будівельних майданчиках, у польових умовах, при роботі на висотних спорудженнях, де немає

мережі живлення або воно заборонене правилами безпечної експлуатації [190-194]. Магнітний структуроскоп КРМ-Ц-К2М при розробці бракувальних норм може оцінювати за коерцитивною силою механічні властивості й структурні зміни в сталях широкого застосування на основних стадіях діаграми навантаження – пружної, пружно-пластичної й пластичної [216]. Залежно від розміру магнітного перетворювача прилад дозволяє оцінювати рівень коерцитивної сили на глибину до 5 і 20 мм.

Також існують коерцитиметри, які працюють тільки від електричної мережі. Одним з таких є коерцитиметр ІКС-104-ІНТЕКС. Цей тип коерцитиметрів призначений для оцінки рівня напруженого стану на невелику глибину, навіть при нанесенні нанопокриттів.

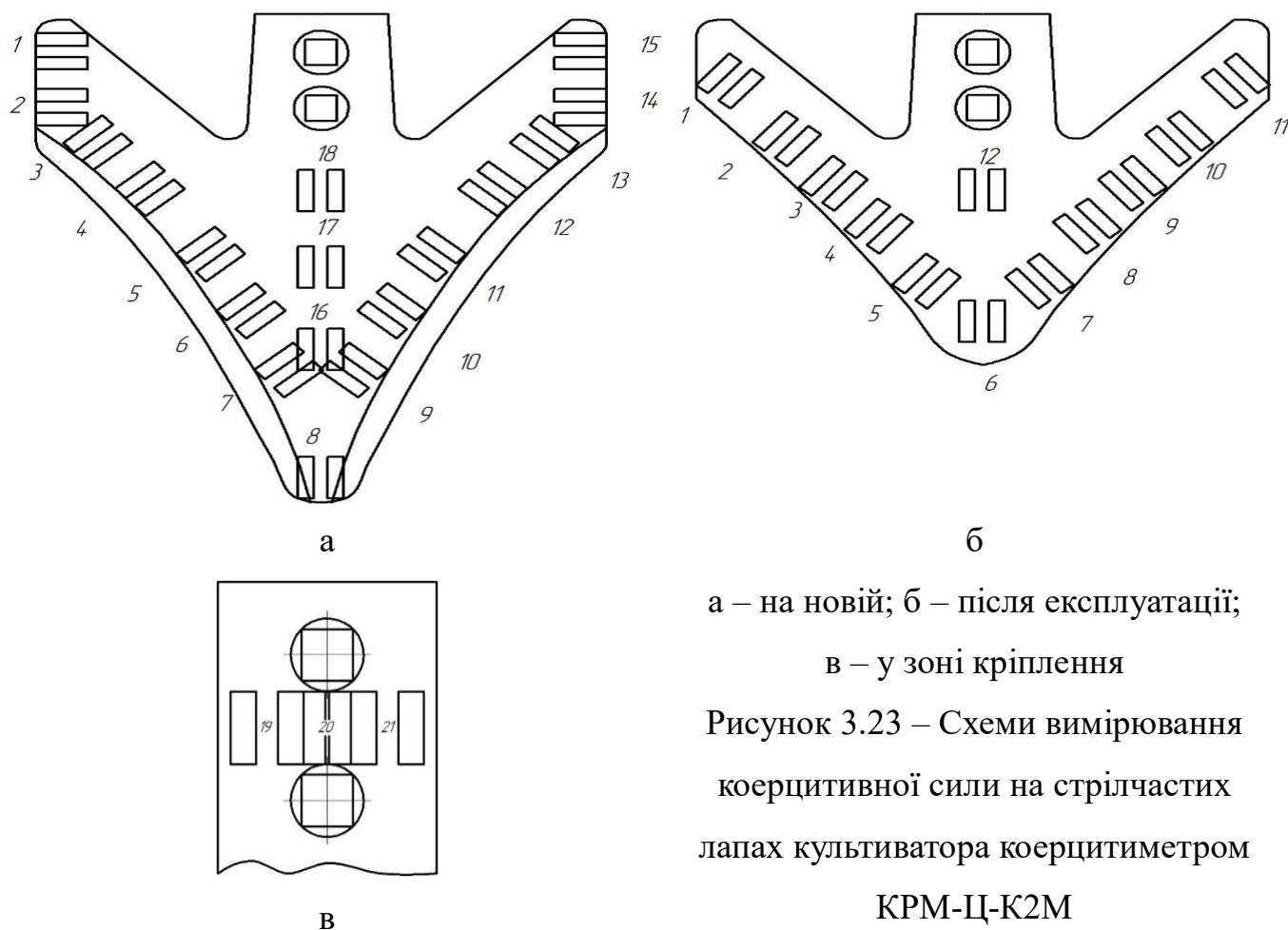
Виміри здійснювали порівняльно на різних типах коерцитиметрів, як нових стрілчастих лап культиватора 9.3" Tiger Mate II фірми CNH (рис. 3.14, а), так і після їх експлуатації (рис. 3.14, і). Хімічний склад матеріалу лап культиваторів виробництва Канади наступний, %: 0,25 С, 0,25 Si, 1,31 Mn, 0,84 Cr, 0,23 Ni, 0,0036 В. За ДСТУ EN

На першому етапі вимірювання коерцитивної сили проводили за допомогою коерцитиметра КРМ-Ц-К2М у двох напрямках: при перпендикулярному й поздовжньому положеннях перетворювача щодо ріжучої кромки лап (оцінювали анізотропію), згідно зі схемами, представленими на рис. 3.23 [254, 255].

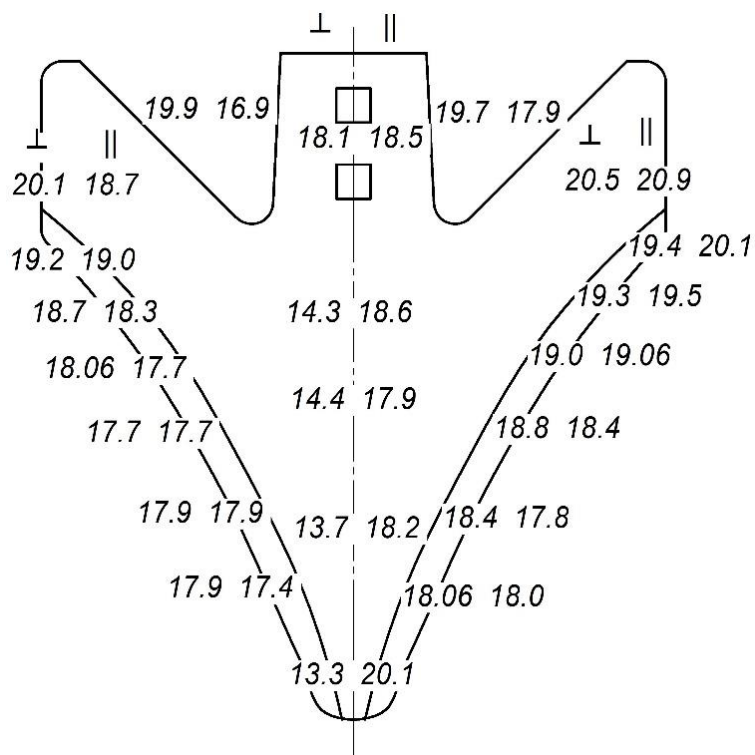
З отриманих середніх значень коерцитивної сили (рис. 3.24, 3.25, Додаток В, табл. В1 і В2) видно, що в нових лапах найбільш високий її рівень характерний для крил і зниження значень сили відбувається до носка.

Аналіз отриманих даних показав, що розкид показань по всіх вимірюваних зонах (табл. 3.3) не перевищує 3.0-9.0% (середній по всіх зонах – 6.3%). Вимірювання, попередньо виконані в новій лапі, показали, що в процесі формування профілю тиски розподіляються нерівномірно й це визначає створення локальних напружень, хоча вносити свій внесок може й напрямок розкрою листового прокату при штампуванні. Однак, судячи з результатів вимірювань коерцитивної сили, оціненої у двох напрямках (перпендикулярному й поздовжньому), внесок цього фактору в тонколистовому,

добре проробленому при прокатці металі, не вносить істотного впливу в закономірність мінливості показань H_c . На рис. 3.26 і 3.27 наведені показання коерцитивної сили в різних зонах вимірів.

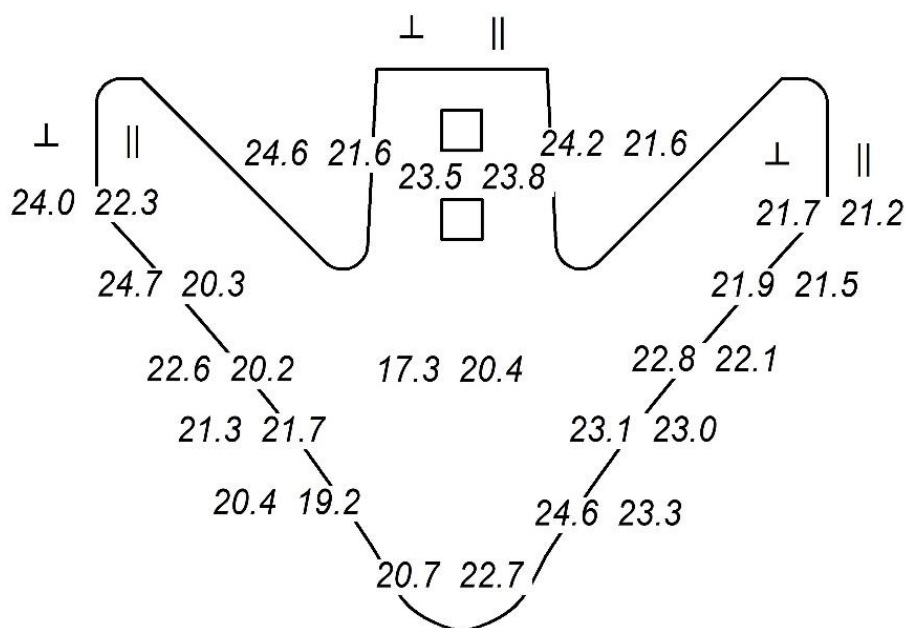


Після завершення строку експлуатації відзначається мінливість показників, що характеризується як підвищенням, так і зниженням показань коерцитивної сили, що відбиває рівень і характер напруженого стану й ступінь деградації металу виробу. Так, у лівій частині культиваторної лапи відзначається підвищення коерцитивної сили в повздовжньому напрямку на 70,0%, а в правій – її зниження, не залежно від напрямку вимірювання – на 25,0-30,0%. Спостережуване свідчить про додаткову локальну деформацію однієї із частин культиваторної лапи й істотну деградацію металу (у цьому випадку лівої). Раніше аналогічну мінливість коерцитивної сили виявили у виробих зі сталей, що працюють в умовах дії локальних деформацій [79, 256, 257].



⊥ – відповідає перпендикулярному вимірюванню, ∥ – поздовжньому

Рисунок 3.24 – Показання коерцитивної сили на новій культиваторній лапі, А/см



⊥ – відповідає перпендикулярному вимірюванню, ∥ – поздовжньому

Рисунок 3.25 – Показання коерцитивної сили на культиваторній лапі після експлуатації, А/см

Таблиця 3.3 – Середній розкид показань коерцитивної сили до-
і після експлуатації, %

Характеристики культиваторної лапи	Ліва частина лапи		Права частина лапи		Середина лапи		Зона кріплення	
	⊥		⊥		⊥		⊥	
До експлуатації								
Після експлуатації								
Розкид показань								



Рисунок 3.26 – Показання коерцитивної сили в новій культиваторній лапі

В інших зонах – середній й в зоні кріпильних отворів після експлуатації мають місце як формування додаткових локальних напружень (див. табл. 3.3 зі знаком «+»), так і розвиток деградаційних явищ «-»).

Порівняльна мінливість значень коерцитивної сили виявила, що в середньому, цей показник після випробувань зростає на 10,0-27,0% для різних зон і визначається локалізацією деформацій (табл. 3.4). Це вказує на те, що під дією локальних деформацій при експлуатації суттєво зростає деградація металу й це приводить до підвищення зношування й відповідно до зміни профілю культиваторної лапи.

Одночасно спостережуване може викликати й руйнування, особливо в середній її частині й в зоні кріпильних отворів, де рівень локальних деформацій підвищується на

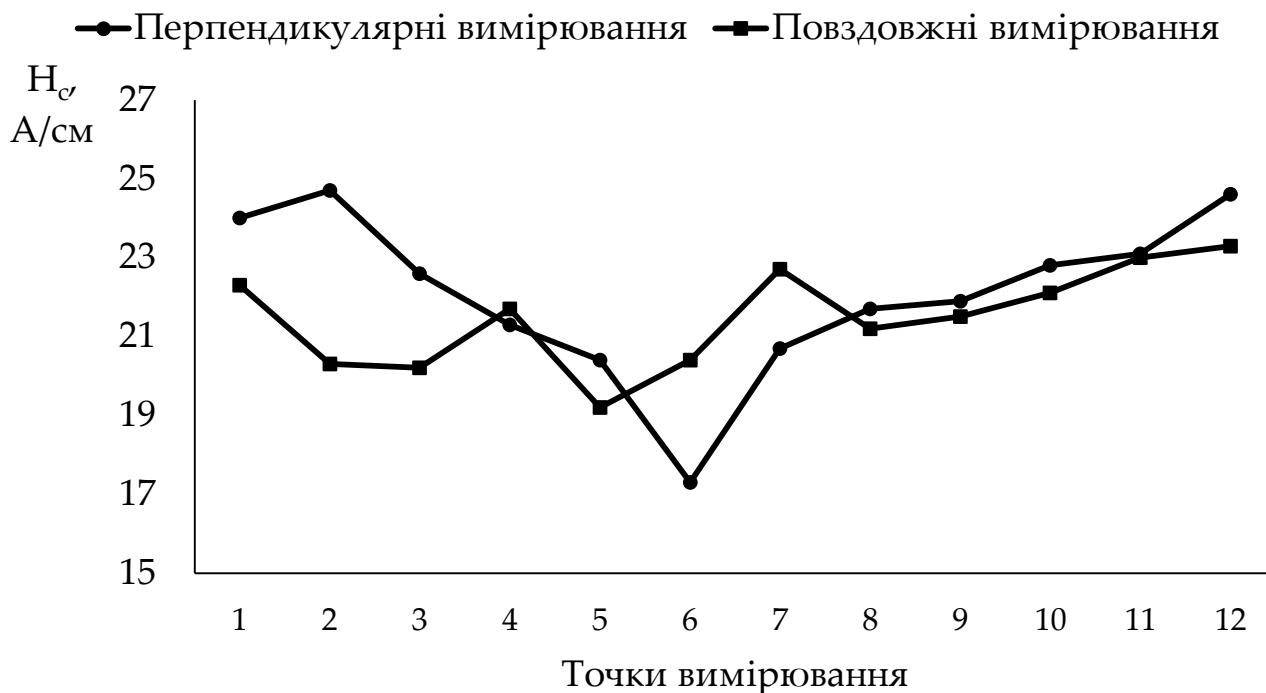


Рисунок 3.27 – Показання коерцитивної сили в культиваторній лапі після експлуатації

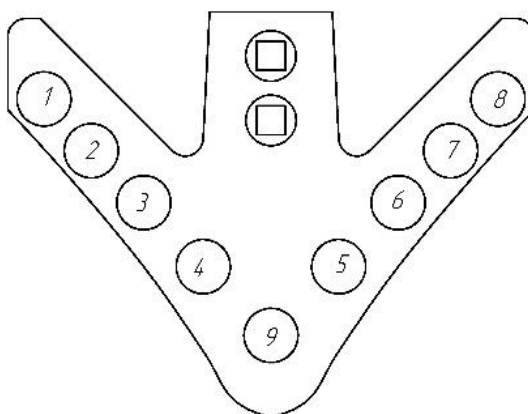
Для встановлення ролі тонкого поверхневого шару в розвитку напруженого стану додатково провели вимірювання коерцитивної сили приладом ІКС-104-ІНТЕКС у чотирьох напрямках: поверхневому горизонтальному (гпп), вертикальному (впп), оборотно-горизонтальному (огпп) і оборотно-вертикальному (овпп) положеннях перетворювача щодо ріжучої кромки лапи, згідно зі схемами вимірювання, представленим на рис. 3.28.

З отриманих середніх показань коерцитивної сили (табл. 3.5 і 3.6) видно, що спостерігається аналогічний характер розподілу значень і в поверхневих зонах, порівнювальних культиваторних лап. Помітна відмінність тільки у величині показань. Різниця у показниках коерцитивної сили посередині культиваторної лапи пов'язано з конструктивною кривизною поверхні. Датчик коерцитиметра має плоску поверхню, що впливає на ступінь їх прилягання.

Наприклад, з краю крил у новій лапі значення становлять 8,6-10,1 А/см, а у відпрацьованої – 15,7-19,3 А/см, що характеризує в більшій мері рівень напруженого стану поверхневого шару. Зміни коерцитивної сили показані на рис. 3.29-3.30.

Таблиця 3.4 – Середня мінливість показників коерцитивної сили до- і після експлуатації

Характеристики культиваторної лапи	Ліва частина лапи		Права частина лапи		Середина лапи		Зона кріплення	
	⊥		⊥		⊥		⊥	
До експлуатації, А/см								
Після експлуатації, А/см								
Розкид показань, %								



а

б

а – нової; б – після експлуатації

Рисунок 3.28 – Схеми вимірювання коерцитивної сили на стрілочастих лапах культиватора прибором ІКС-104-ІНТЕКС

Як показали раніше проведені дослідження [244] і, проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що при досягненні близьких показників даної характеристики ступінь деградаційних явищ у металі суттєво зростає й вона починається з поверхневого робочого шару. Це підтверджує й рис. 3.30, що описує показання, виявлено незначний розкид показань H_c в аналізованих зонах з використанням відповідного устаткування.

Таблиця 3.5 – Показання коерцитивної сили в новій культиваторній лапі, А/см

№ з/п зони вимірювання	Ліва частина лапи				№ з/п зони вимірювання	Права частина лапи			
	гпп	впп	огпп	овпп		гпп	впп	огпп	овпп
	10,1	8,6	8,7	8,6		9,8	9,3	9,03	9,1
	8,7	8,1	7,6	7,5		8,9	8,3	7,9	7,9
	8,5	7,6	7,5	7,3		8,5	8,2	7,8	7,85
	8,2	7,3	7,2	7,2		8,2	8,03	7,7	7,6
	8,2	7,7	7,6	7,5		8,4	8,06	7,9	7,7
	9,2	8,06	8,03	7,9		9,0	8,2	8,2	8,2
Середнє значення	8,8	7,89	7,7	7,6	Середнє значення	8,8	8,3	8,08	8,05

Таблиця 3.6 – Показання коерцитивної сили в культиваторній лапі після експлуатації, А/см

№ з/п зони вимірювання	Ліва частина лапи				№ з/п зони вимірювання	Права частина лапи			
	гпп	впп	огпп	овпп		гпп	впп	огпп	овпп
	15,7	19,3	16,03	18,2		15,8	17,1	16,5	16,03
	13,06	14,2	12,4	13,2		11,6	13,1	12,4	12,7
	10,8	11,2	10,7	10,2		10,4	11,5	10,5	11,1
	9,2	10,4	9,4	9,4		8,8	10,5	9,6	10,03
Середнє значення	12,19	13,77	12,1	12,75		10,7	11,8	11,5	11,5
					Середнє значення	11,46	12,8	12,1	12,27

На основі виконаного аналізу можна запропонувати використовувати цей фактор як бракувальні норми при відновленні зношених культиваторних лап, які можуть ще забезпечувати задовільні показники прийняті в практиці їх використання в експлуатації. У цьому випадку різні зони, що підлягають відновленню, не повинні мати підвищений рівень коерцитивної сили (>10,0%), а також суттєво більш низький

(<5,0%) з одночасно близькими показниками мінливості, що характеризує підвищений рівень необоротних структурних деградаційних змін.

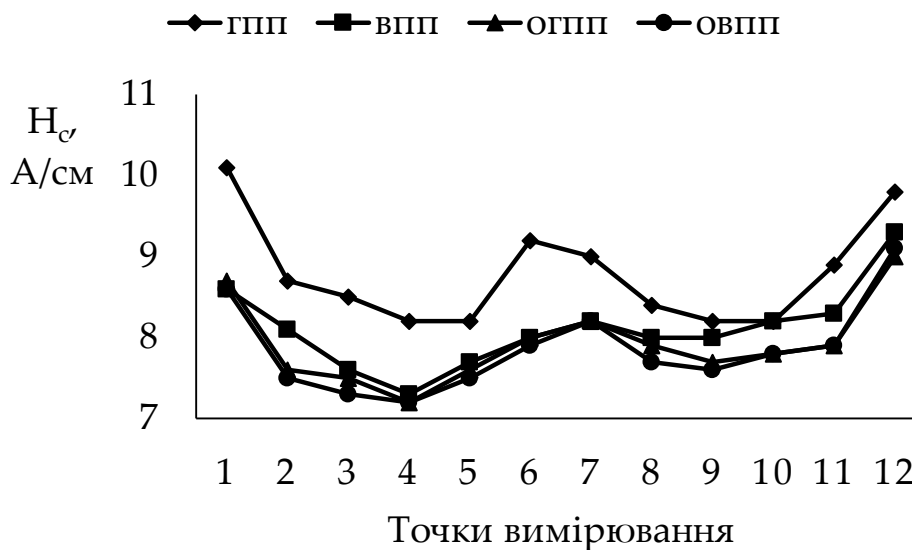


Рисунок 3.29 -Зміна показань коерцитивної сили нової культиваторної лапи (оцінені приладом ІКС-104-ІНТЕКС)

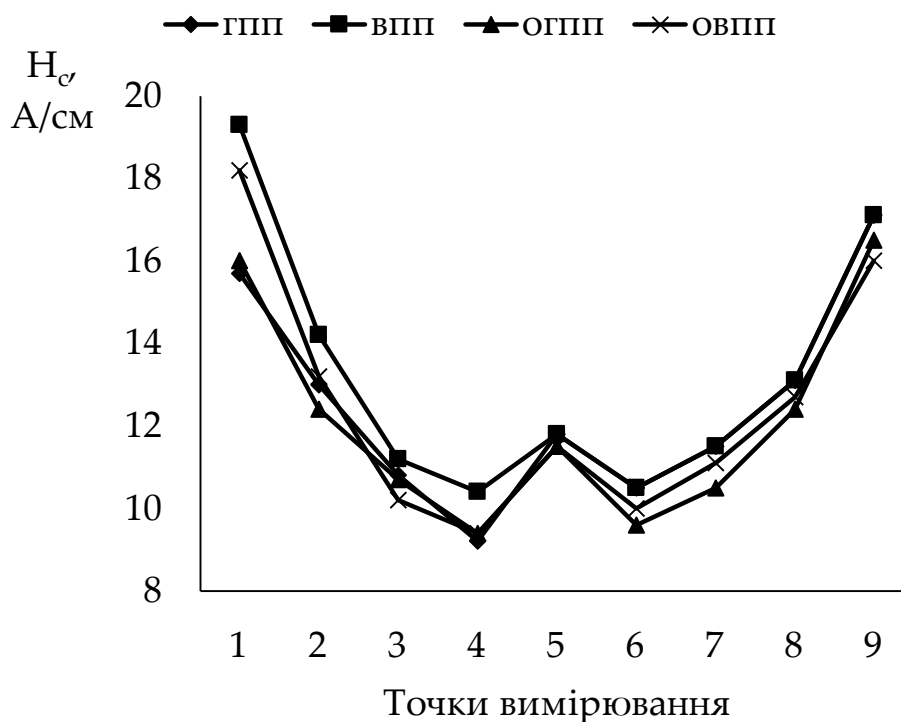


Рисунок 3.30 - Зміна показань коерцитивної сили культиваторної лапи після експлуатації

ВИСНОВКИ

В розділі виконаний аналіз причин відмов виробів, що працюють у різних умовах експлуатації для того, щоб встановити характер і причини їх пошкоджуваності та визначити шляхи, що дозволяють продовжити строк їх експлуатації.

1. Розглянутий вплив факторів структурної деградації сталі Р-110 виробництва Китаю насосно-компресорних труб газодобувної галузі на інтенсивність їх пошкоджуваності. На прикладі структурних змін, яким піддані труби в експлуатації, проаналізовані механізми деградації сталі при одночасному впливі їх розтягування й корозійно-активного середовища.

2. Виявлено, що в результаті більших деформацій у трубах колони інтенсифікуються пороутворення, дифузія вуглецю (за рахунок руйнування цементиту перлітної складової) і вуглекислотна корозія розвивається не тільки на поверхні металу, але й у глибині. При цьому, анодами можуть бути границі зерен, що містять вільний вуглець, карбідні фази й неметалеві включення, що мають різко відмінні електрохімічні потенціали й властивості міцності.

3. Встановлено, що підвищена концентрація вуглецю, пороутворення й насичення поверхні елементами, які входять до складу активно-корозійного середовища (при концентрації CO_2 у газовій фазі $\leq 0,415\%$, що обумовлює його парціальний тиск $0,11\text{--}0,12$ МПа, при $p_{\text{парц}} \geq 0,2$ МПа корозійні умови експлуатації належать до критичних, при $p_{\text{парц}} < 0,02$ МПа – середовище корозійно-безпечне; конденсації вологи в газі $3,4\text{--}3,6\%$, що достатньо для зволоження поверхні НКТ і розвитку корозійних процесів; наявності у воді хлорид-, сульфат- і бікарбонатіонів, $\text{pH} \sim 5$, що створює умови для загальної й пітінгової корозії; концентрації води в рідкій фазі до $5\text{--}6\%$; лінійній швидкості потоку 3 м/с), сприяють деградації металу НКТ при експлуатації (особливо на внутрішній поверхні), а також визначають поріг розтягувальних напружень, що ініціюють виникнення вуглекислотної корозії в добувних свердловинах.

4. На підставі аналізу отриманих даних виявлена при різному стані НКТ зона розкиду значень коерцитивної сили й визначена деградація металу по цій магнітній характеристиці залежно від характеру й ступеня його пошкоджуваності. Коерцитивна

сила в місцях корозійно-механічного пошкодження НКТ пов'язана (майже лінійно) з рівнем структурної пошкоджуваності, що дозволяє використовувати неруйнівний магнітний контроль по цьому параметру, а також діагностувати стан передруйнування.

5. Аналіз стану металу НКТ у зонах контролю дозволив умовно виділити три ступені деградації за рівнем пошкоджуваності: критична – наскрізні отвори й осередкова виразкова корозія внутрішньої поверхні в різьбовому з'єднанні; сильна – суцільна дрібновиразкова корозія внутрішньої поверхні різьбового з'єднання; помірна – рівномірна корозія внутрішньої поверхні тіла труби.

6. У сфері використання сільськогосподарської техніки запропоновано підхід до оцінки зносу й деградації металу в процесі експлуатації культиваторних лап. Виявлено, що вони зношуються нерівномірно, товщина у всіх зонах аналізу відрізняється, хоча розмірні характеристики нових лап однакові й симетричні з двох сторін. Після експлуатації вони суттєво відрізняються. Це свідчить про те, що лапи працюють в різних умовах (грунтах) і зношуються нерівномірно. Так само спостерігається перекис при закріпленні їх на стойці культиватора. Деякі лапи мають видимі потертості (у зоні кріплення лапи) основного металу, що також може свідчити про їх великий наробіток і несвоєчасну заміну при технічному обслуговуванні або ремонті.

7. Встановлено, що в нових культиваторних лапах найбільш високий рівень показань коерцитивної сили характерний для крил та їх зниження відбувається до носка, що визначається якістю штампування таких деталей. Після експлуатації відзначається мінливість, що характеризується як підвищенням, так і зниженням показань коерцитивної сили. Це відображає рівень і характер напруженого стану, а також ступінь деградації металу. Виявлено, що в лівій частині культиваторних лап частіше відзначається підвищення коерцитивної сили в повздовжньому напрямку на 70,0%, а в правій її зниження, не залежне від напрямку вимірювання, досягає 25,0-30,0%. Спостережуване свідчить про більш високу локальну деформацію правої частини культиваторної лапи й істотну деградацію металу – лівої.

8. При оцінці напруженого стану культиваторних лап вимірювальним

устаткуванням ІКС-104-ІНТЕКС показано, що близький рівень коерцитивної сили характеризує ступінь деградаційних явищ у металі, розвиток якого починається з поверховості робочого шару.

9. Запропоновано підхід до розробки бракувальних норм для відновлення зношених культиваторних лап, який може забезпечити задовільні показники для використання в практиці при експлуатації. Для відновлення можуть використовуватися культиваторні лапи, зони яких не повинні мати підвищений рівень коерцитивної сили $>10,0\%$. Не рекомендується також відновлювати ті, мінливість яких має більш низькі показники й малий їх розкид $<5,0\%$. Це характеризує підвищений рівень необоротних структурних деградаційних змін у їх металі.

РОЗДІЛ 4

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВИРОБІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ЇХ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ

Для підвищення стійкості різьбових з'єднань НКТ, які пошкоджуються в першу чергу, використовують введення в сполучення пластичних мастил. Як було показано в розділі 3, розвиток пошкоджуваності визначається розтягувальними напруженнями. Також важливу роль має захист від корозії різьбових з'єднань. Враховуючи ці фактори, розглянули можливість використання такої модифікуючої домішки, яка могла б забезпечити більш стабільну роботу й довговічність з'єднання.

Важливим є й підвищення терміну служби деталей машинобудування при їх зміцненні й відновленні тонкостінних виробів з використанням дешевих і доступних модифікуючих домішок, у тому числі, у вигляді вторинної сировини та природного походження.

4.1 Узагальнення відомих технологій і обґрунтування розробки нової для підвищення стійкості різьбових з'єднань насосно-компресорних труб

Основне призначення мастил спрямоване на зменшення зношування поверхонь тертя, що сполучаються, для продовження терміну служби деталей машин і механізмів. Поряд із цим мастила виконують й інші функції. В окремих випадках вони не стільки зменшують зношування, скільки стабілізують його, запобігаючи задири, заїдання й заклинювання поверхонь тертя. Мастила перешкоджають проникненню до поверхонь тертя агресивних рідин, газів і пару, а також абразивних часток [258].

Майже всі мастила виконують захисні функції, запобігаючи корозії металевих поверхонь. Завдяки антифрикційним властивостям мастила суттєво знижують енергетичні «витрати» на тертя, що дозволяє знизити втрати потужності машин і механізмів. Для захисту металевих виробів, машин і устаткування від корозії при їх транспортуванні й тривалому зберіганні застосовують спеціальні консерваційні мастила. Виробляють також робочо-консерваційні мастила й їх не заміняють перед

початком експлуатації техніки на антифрикційні.

Для герметизації зазорів у механізмах і устаткуванні, а також з'єднань трубопроводів та запірної арматур застосовують ущільнювальні (пластичні) мастила. Вони мають кращі герметизуючі властивості, чим різні марки масел.

Іноді до мастил висувають спеціальні вимоги, наприклад, вони повинні збільшувати коефіцієнт тертя, виконувати роль ізоляційних або струмопровідних матеріалів, забезпечувати роботу вузлів тертя в умовах радіації, глибокого вакууму й т.і. Такі мастила відносять до продуктів спеціального призначення.

Для захисту різьбових з'єднань виробники устаткування рекомендують використовувати спеціальні мастильні матеріали.

Мастила для різьбових з'єднань повинні відповідати наступним вимогам:

- забезпечувати надійний захист від корозії;
- забезпечувати неруйнуюче розбирання устаткування навіть після тривалого використання при високих температурах.

Обробка різьбових з'єднань при складанні звичайними мастильними матеріалами забезпечує тільки короткочасний захисний ефект. Із часом мастило, не призначене для конкретних умов експлуатації, втрачає свої захисні властивості, твердне й затрудняє відгвинчування. Ці фактори є основною причиною зриву різьб, обламання шпильок і болтів, що приводить до простою устаткування й дорогого ремонту.

Спеціальні мастила являють собою нафтові масла, загущені милами, твердими вуглеводнями й іншими загусниками, які забезпечують ефективну експлуатацію закритих важковантажних механізмів і для запобігання виробів від корозії.

Твердофазні модифікуючі домішки, які не розчиняються в маслах, підвищують експлуатаційні властивості, а також ефективні для стабілізації роботи різьбових з'єднань в умовах деформації й втомного навантаження при кріпленні похило-спрямованих свердловин.

Відомий спосіб застосування [259] композиційного модифікатора з домішками ультрадисперсного порошку наноалмазів у мастило. Алмазовуглецеві порошки для модифікування найчастіше одержують детонаційним синтезом, потім їх просушують,

додають до мастил, разом фільтрують і подрібнюють суміш для зменшення розміру твердих зерен і досягнення однорідного їхнього розподілу. Для забезпечення седиментаційного найбільш однорідного розподілу надтвердих зерен, підвищення протизадирних властивостей використовують додаткове введення поверхнево-активних речовин (ПАР).

Така композиція модифікуючої домішки має недостатню однорідність розподілу, що призводить до значних пошкоджень поверхні тертя з формуванням великої кількості задирів.

Відомо спосіб використання модифікуючої домішки наноалмазів додаванням у масло. При цьому використовують наноалмази, отримані детонаційним методом з наступним очищенням вуглецю випалюванням шихти [260].

Використання такої технології з виключенням графіту, уже на першому етапі експлуатації приводить до істотного пошкодження поверхні тертя й створенню задирів. Крім того, вартість цієї шихти в 4 рази більше, ніж алмазовуглецевої.

Даний розділ досліджень присвячений підвищенню експлуатаційної стійкості сполучень введенням модифікуючої домішки вторинної сировини для зменшення вартості використання модифікуючої суміші. Для реалізації цього здійснили аналіз відомих розробок, на основі яких обґрунтували й запропонували використання принципово нового підходу по застосуванню модифікуючої домішки, яка забезпечує ефективність експлуатації з'єднань.

Найбільш близьким до запропонованого ущільнюючого пластичного мастила виявлене таке [261], яке містить каніфоль (11,0-14,0%), деревні гранули, відходи (17,0-20,0%), шкіряний пил (7,0-9,0%), графіт (5,5-7,0%), мідну пудру (3,0-6,0%) і решта - мінеральне масло (до 100%).

Це пластичне мастило забезпечує герметичність при згвинчуванні з'єднань колон, однак довговічність цього складу протягом життєвого циклу його використання повною мірою не може забезпечити потреби стабільної роботи (антифрикційні й протизадирні властивості, руйнування різьб) тому, що деревні гранули й шкіряний пил не є постійними відходами виробництва за складом, а додаткове введення графіту для забезпечення його ефекту при такому мащенні

досягається тільки тоді, коли в мастилах і введених у нього компонентах є значна частка кисню, здатна формувати вторинні захисні структури.

Враховуючи вище викладене, рішенням проблеми може бути додаткове введення в ущільнююче пластичне мастило (відпрацьоване дизельне паливо+ солідол) +10-20% добавки детонаційної немагнітної фракції шихти від утилізації певного набору боєприпасів [193].

4.1.1 Вплив домішки алмазовмісної шихти на підвищення стійкості пластичного мастила різьбових з'єднань насосно-компресорних труб при експлуатації

За даними промислової статистики [262], основна кількість відмов при експлуатації НКТ відбувається через корозійні руйнування різьбових з'єднань (55%). Тому дослідження, присвячені захисту й зміцненню різьбових з'єднань НКТ, є актуальними.

Проблемі вивчення ймовірних причин деградації металу НКТ, що працюють в умовах підвищення навантажень і впливу вуглекислотної корозії свердловинного середовища були виконані автором і наведені в монографії [79]. У роботі були вивчені структурні аспекти корозійного впливу на метал різьбових з'єднань НКТ, що мали наскрізні ушкодження в з'єднаннях. Компонування досліджуваної колони НКТ було виконано, згідно із проектом, за наступною схемою: верхня її ділянка зібрана із труб групи міцності Р-110, середня – труби Е, нижня – скомпонована із труб групи міцності Д. Зовнішній діаметр труби в стані поставки – 73 мм, товщина стінки – 5,5 мм. Всі труби колони використані з металу різних груп міцності. У дослідженій свердловині мали місце корозійні пошкодження на внутрішній поверхні по типу локальної пітінгової корозії. Максимальну корозійну пошкоджуваність (наскрізні отвори по різьбі) спостерігали тільки у верхній ділянці (14 верхніх труб) колони зі сталі марки Р-110.

Виявлена підвищена концентрація вуглецю, пороутворення й насичення поверхні елементами, що входять до складу активно-корозійного середовища. Це

сформувалось при вібрації конструкції й розвитку процесів тертя в різьбових з'єднаннях, які провокують прискорену деградацію металу НКТ при їх експлуатації. Даний набір факторів визначає поріг розтягувальних напружень, що ініціюють виникнення вуглекислотної корозії різьбових з'єднань НКТ у видобувних свердловинах.

Номінальні значення граничних напружень в даному дослідженні не перевищували $0,28\sigma_T$, а, отже, не виходили за межі встановлених вимог. Разом з тим, даний рівень робочих навантажень у процесі експлуатації колони НКТ викликає розвиток корозійної пошкоджуваності різьбових з'єднань труб.

Для зниження схильності до пошкоджуваності на практиці використовують пластичні мастила на різних основах (звичайне, загущене мінеральне масло), вироблені відповідно до вимог стандарту API RP 5A3 або гармонізованого із цим стандартом документа ISO 13678:2009. Найбільше широко в техніці застосовують Li-, Ca-, Si-комплексні мастила, модифіковані для одержання заданих експлуатаційних характеристик різними домішками.

В якості таких домішок, наприклад, відповідно до ISO 13678:2009, в мастила вводять аморфний графіт, свинцевий порошок, кусочки міді, цинковий пил й дисульфід молібдену в різних комбінаціях, які зменшують вібрацію й зношування, а також суттєво знижують схильність до корозійної пошкоджуваності різьбового з'єднання.

В зв'язку із цим представляє значний практичний інтерес вивчення можливості використання для зниження пошкоджуваності різьбових з'єднань труб в процесі їх експлуатації більш дешевої ефективної вторинної сировини.

Досліджена можливість використання як домішки в пластичне мастило вторинної сировини – детонаційної шихти від утилізації боєприпасів, у яких закінчився строк зберігання, що складаються з наноалмазів, міді й невеликої частки оксидів заліза й інших компонентів. Досліджували вплив домішки на формування структури поверхні тертя, розподіл компонентів, що входять до складу мастила й домішки, для встановлення кінетики й механізму впливу на зношування такого способу модифікування.

Для реалізації поставленого завдання досліджували металографічні зображення поверхні тертя, отримані в електронному мікроскопі, а також за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу. Статистично вивчали локальний і загальний розподіл компонентів [263]. На практиці для стабілізації різьбових з'єднань найчастіше вводять графіт, але він ефективний тільки при наявності в мастилі кисню. Оскільки кисень швидко йде, то графіт стає абразивом. Тому провели дослідження із заміни графіту детонаційною шихтою, яка містить наноалмази – (3,37-3,43% С, 2,9% Fe, 3,14% Cu). Наноалмази, що містяться в детонаційній шихті, покриті окисною плівкою, оскільки детонацію проводили на повітрі. Для експериментів використовували дисперсну шихту з розміром зерен нано- і мікро. Наноалмази в детонаційній шихті мають розміри до 100нм.

Аналіз проводили на шліфах, відібраних від основного металу ушкодженої труби, виведеної з експлуатації, а також на поверхні тертя після спеціального шаржування неушкодженого зразка з додаванням в мастила «Літол-24» і детонаційної шихти в концентрації 0,5% мас.

На рис. 4.1 наведені подряпини, у яких розміром до 20мкм накопичується в 3 рази більше вуглецевмісної частки домішки, чим на поверхні у вихідному металі, а також виявлені домішки Mg, Cl, K, O, Na і Cu (табл. 4.1), де I – вміст компонентів у вихідному металі, III – вміст компонентів у подряпинах. При цьому глибина таких подряпин змінюється від 1,77 до 3,47мкм (табл. 4.2).

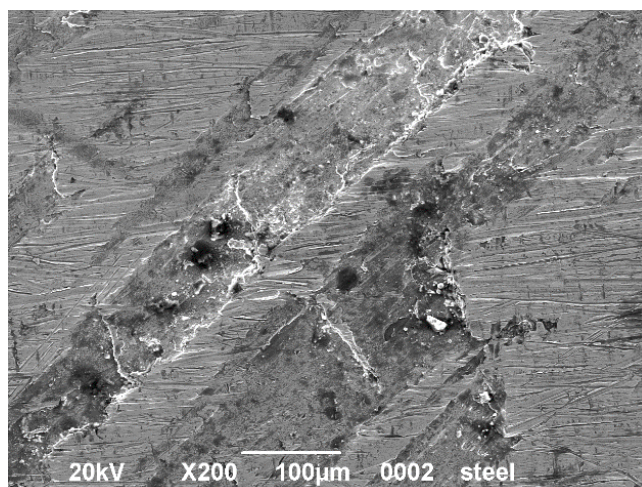


Рисунок 4.1 – Подряпини на поверхні різьбового з'єднання

Таблиця 4.1 – Хімічний склад різних зон

Компонент	Зони аналізу	Границі значень мікрорентгеноспектрального аналізу (чисельник), середнє в зоні (знаменник), %	Середнє по зонах аналізу, %	Загальний аналіз всієї поверхні тертя, %
1	2	3	5	6
S	I	$\frac{0,05}{0,05}$	0,09	0,09
	II	$\frac{0,05-0,11}{0,07}$		
	III	$\frac{0,10-0,18}{0,145}$		
Mn	I	$\frac{1,27-1,34}{1,09}$	1,09	1,18
	II	$\frac{1,04-1,12}{0,145}$		
	III	$\frac{0,79-1,06}{0,9}$		
Si	I	$\frac{0,19-0,25}{0,22}$	0,39	0,44
	II	$\frac{0,16-0,45}{0,26}$		
	III	$\frac{0,42-0,78}{0,64}$		
Al	I	$\frac{0,06-0,12}{0,1}$	0,37	0,35
	II	$\frac{0,14-1,29}{0,49}$		
	III	$\frac{0,44-0,76}{0,53}$		
P	I	0	0,034	0,03
	II	$\frac{0,04-0,19}{0,075}$		
	III	$\frac{0,02-0,05}{0,0275}$		
Cr	I	$\frac{0,23-0,27}{0,24}$	0,21	0,26
	II	$\frac{0,18-0,25}{0,21}$		
	III	$\frac{0,13-0,20}{0,18}$		

1	2	3	4	5
Mg	I	0	0,075	0,04
	II	$\frac{0-0,13}{0,032}$		
	III	$\frac{0,17-0,24}{0,195}$		
Cl	I	0	0,22	0,10
	II	$\frac{0,07-0,20}{0,13}$		
	III	$\frac{0,17-0,24}{0,2}$		
K	I	0	0,12	0,04
	II	$\frac{0,04-0,06}{0,05}$		
	III	$\frac{0,08-0,17}{0,12}$		
Ca	I	0	0,4	0,32
	II	$\frac{0,13-0,23}{0,17}$		
	III	$\frac{0,36-0,57}{0,47}$		
Ti	I	0	-	0
	II	0		
	III	$\frac{0,04}{0,04}$		
C	I	$\frac{8,51-12,11}{10,64}$	24,44	14,25
	II	$\frac{20,55-28,86}{24,47}$		
	III	$\frac{26,59-32,46}{30,2}$		
O	I	$\frac{0,53-1,12}{0,91}$	4,91	7,57
	II	$\frac{4,36-5,81}{4,48}$		
	III	$\frac{7,54-12,75}{9,35}$		
Na	I	0	0,32	0,29
	II	$\frac{0,24-0,35}{0,3}$		
	III	$\frac{0,38-0,83}{0,62}$		

Fe		Розподілено нерівномірно	$\frac{50,71-89,15}{69,47}$
Cu		<u>Розподілено нерівномірно</u>	середнє 0,12

Таблиця 4.2 – Середня частка заліза залежно від глибини подряпин

Глибина подряпин, мкм		Середня частка заліза, згідно локального мікрорентгеноспектрального аналізу, %	Середня частка заліза, згідно спектрального аналізу, %
Мінімальна	1,77	62,56	74,93
Максимальна	3,47	50,71	
Середня	2,67	56,19	

Моделювання процесу тертя проводили шаржуванням поверхні зразка протягом тривалого часу (12 год), що дозволило виконати більш точну імітацію процесу й одержати більшу площу структурних змін для подальшого аналізу в дослідженнях.

В ході досліджень у вихідному металі були виявлені: зони деформації, руйнування цементиту перліту, а також дифузія вуглецю [264].

Після шаржування поверхня тертя являла собою гладкі ділянки й подряпини, заповнені різними включеннями. Тому виконували зіставне дослідження: вихідного металу (зона I); вигладжені зони (плівки, зона II) і грубі подряпини поверхні тертя («кишені», заповнені маслом і шихтою, зона III). При цьому, вміст компонентів аналізували локальним мікроспектральним аналізом (діаметром плями зонда 3 мкм) і одночасно одержували їх загальний вміст по всій поверхні металу. Такий підхід дозволив оцінити товщину сформованих оксидних плівок у вигладжених зонах і визначити вміст у них компонентів, а також у розвиненому сформованому рельєфі (подряпинах), що представляють собою «кишені» для продуктів тертя шихти, яка вводиться.

В вигладженій зоні оцінили товщину плівки покриття по зміні концентрації Fe.

Аналізом встановлено вміст цього компонента при формуванні плівки суттєво зменшується до $\sim 20\%$ [265]. Середня товщина окисної плівки визначена із співвідношення $3 \text{ мкм} : 0,155 = 0,465 \text{ мкм}$ або 465 нм , де $0,155$ – виражений в десятковому виді вміст Fe у вигладженій зоні. Мінімальна й максимальна товщини плівки склали відповідно $0,348 \text{ мкм}$ (або 348 нм при $1,12\% \text{ Fe}$) і $0,629 \text{ мкм}$ (або 629 нм при $1,04\% \text{ Fe}$). При використанні запропонованого модифікатора, детонаційної шихти, захисні окисні плівки на поверхні тертя досягають від $0,32 \text{ мкм}$ до $1,34 \text{ мкм}$.

Загальну частку вигладжених зон і подряпин оцінювали за розподілом S, оскільки загальний і середній показники концентрації даного компонента збігалися. Аналіз співвідношення зон був виконаний за середніми показниками. Приймаючи частку гладкої поверхні за x , а грубої з подряпинами – за y , співвідносячи ці показники з відповідними концентраціями S у даних зонах ($0,07$ для гладкої й $0,145$ для грубої), одержали наступне рівняння:

$$0,07x + 0,145y = 0,09,$$

де $0,09$ – середня концентрація S по всій поверхні досліджуваного металу після шаржування. З рівняння знаходимо, що частка плівки на поверхні тертя (вигладженої зони) становить 78% , грубої поверхні з подряпинами (так звані «кишені») – 22% .

Зіставлення значень концентрації в зонах I, II і III дозволило оцінити:

- локалізацію компонентів (див. рис. 4.2-4.5);
- товщину й однорідність окисної плівки за статистичним локальним спектральним аналізом з урахуванням глибини зондування (по різниці в долі компонента в %, між I і II зонами);
- наявність шихти й мастила в дефектах (грубих подряпинах та інш.), які являють собою по суті «кишені» для їхнього утримання.

Аналіз розподілу компонентів, ілюструємія графіками на рис. 4.2-4.5, вказує на підвищену кількість мастила в плівці (вигладженої поверхні II зони) і в подряпинах (грубої поверхні III зони), про що свідчать високі концентрації C, O і більш низька Fe, Cr, що характеризують наявність цих компонентів в основному металі. Такий висновок базувався на тому, що з підвищенням концентрації внесених шихтою компонентів – O і C і зниженням частки аналізованого вмісту заліза й хрому в металі

плями спектра певного діаметра, може характеризувати зміна товщини сформованої захисної плівки.

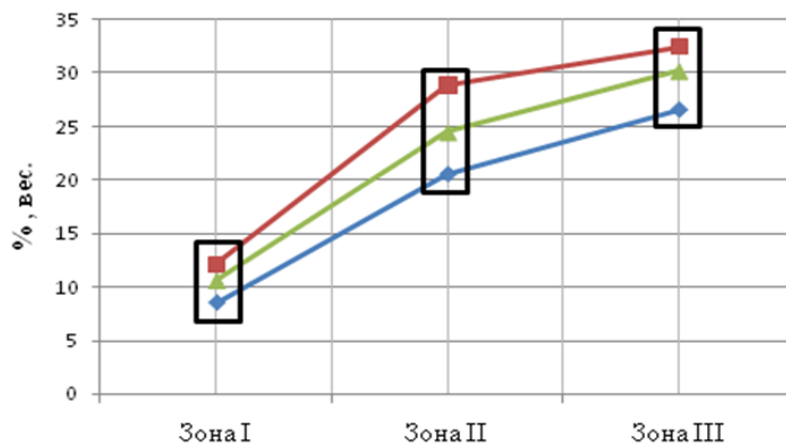


Рисунок 4.2 – Розподіл С по зонах

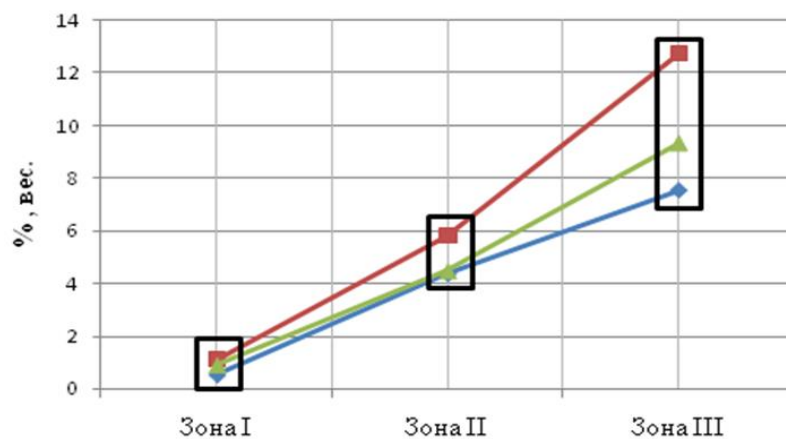


Рисунок 4.3 – Розподіл О по зонах

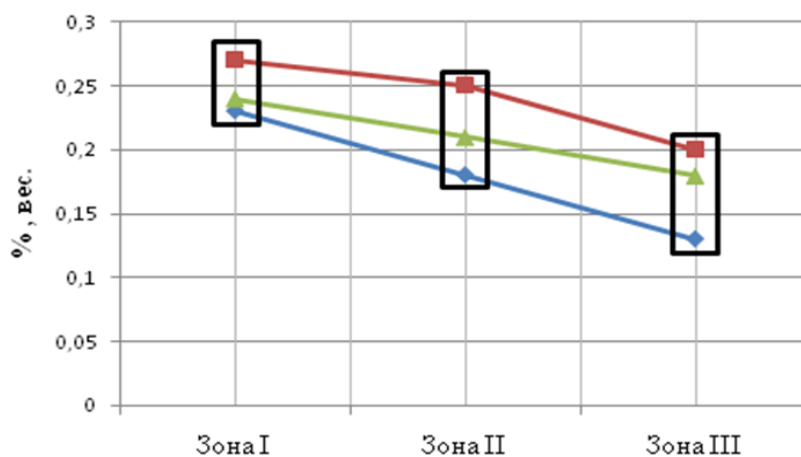


Рисунок 4.4 – Розподіл Sr по зонах

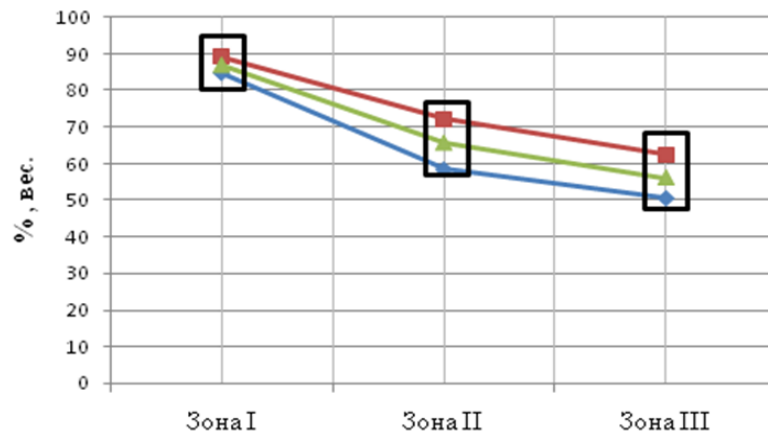


Рисунок 4.5 – Розподіл Fe по зонах

Глибину подряпин розраховували на основі вмісту заліза при мікрорентгеноспектральному аналізі й долі домішок, які розташовані в таких «кишенях» [193].

Для стабільної експлуатації різьбових з'єднань (зменшення впливу вібрацій) частка такої домішки повинна бути на рівні 20-30% від частки мастила. При введенні менш 20% мастило недостатньо загущується, і домішка легко подрібнюється, а при її долі більш 30% зростає кількість подряпин і схильність до руйнування різьбового з'єднання. Використання детонаційної шихти особливо ефективно у зв'язку з тим, що вона насичена киснем і при руйнуванні алмазної складової з формуванням графіту залишається працювати в умовах такого мащення [262]. Без достатньої частки кисню в мащенні із графітом він перетворюється в абразив і руйнує різьбове з'єднання. Крім того, використання вторинної детонаційної сировини суттєво зменшує витрати на придбання модифікуючої домішки.

4.1.2 Визначення товщини захисних оксидних плівок, сформованих при терті для прогнозування й корегування кількості використовуваної модифікуючої домішки при обслуговуванні й ремонті устаткування

Аналіз наукової, технічної й патентної інформації показав, що основна увага дослідників була зосереджена на проблемах тертя, зношування й мащення в слабонавантажених парах тертя.

У трибології встоялося уявлення про три рівні взаємодії твердих тіл при терті: макрорівень, мезорівень і нанорівень. Переважна більшість досліджень виконана на макрорівні [263]. Роботи з дослідження трибологічних процесів на мезорівні й тим більше на нанорівні одиничні. Але без таких досліджень прогрес у теорії екстремального граничного тертя неможливий.

Для розуміння різних процесів при фрикційному контакті необхідно знати вихідну товщину шару мастильної речовини, наносимої на поверхні тертя. Ясно, що в процесі тертя товщина мастильного шару зміниться в десятки раз за рахунок видавлювання, випару, деструкції мастильного матеріалу. Проте, необхідно мати знання первинної товщини мастильного матеріалу і його потоншення.

Товщину мастильних шарів вивчали багаторазово. Для виміру використовували всілякі технічні засоби контролю: індукційні перетворювачі, інтерферометри, кондуктометричні методи, а також акустичні, оптичні й механічні системи.

Відомо спосіб визначення товщини формованого шару з низькою теплопровідністю в циліндричних виробах [264]. Спосіб включає теплофізичний однобічний періодичний тепловий контроль поверхні зразка й реєстрацію зміни його температури в зонах дослідження. При цьому, визначають різницю фаз між коливаннями теплового потоку й температурою шару.

Для виміру використовують устаткування із джерелом енергії, з'єднане з модулятором теплового потоку, датчиком інфрачервоного випромінювання, потенціометром постійного струму, підсилювачем і шлейфом осцилографа. Зазначені елементи устаткування оцінюють тепловий потік, а також змінний сигнал, який є пропорційним його потужності. Показання фіксує осцилограф. Для визначення потужності інфрачервоного випромінювання використовують фотодіоди.

Спосіб спрямований на визначення товщини плівкових покриттів з металевих сплавів і може бути використаний для оцінки розмірів і складу аморфних плівок з великою часткою кисню, які формуються на поверхні тертя при експлуатації деталей в умовах мащення.

Також відомий спосіб оцінки товщини робочого шару із плівковими покриттями, заснований на використанні методу мікротвердості, що дозволяє

визначити його стан протягом усього життєвого циклу експлуатації деталей у сполученнях [265]. Для цього проводять серію відбитків мікротвердості й оцінюють їх характер у різних зонах зношування. Під впливом індентора формуються смужки, відповідні до зсуву покриття. По перетину такі смужки проявляються по гіпотенузі, і при їхнім співвідношенні до катета відбитка мікротвердості, розраховують товщину покриття.

Такий метод також може бути використаний для оцінки захисних аморфних плівок, що формуються при терті в масляному середовищі з домішками для підвищення експлуатаційної стійкості деталей у сполученні й при інших добавках модифікуючих домішок.

Найбільш ефективним для оцінки вмісту компонентів у захисних плівках, які формуються при терті, є метод мікрорентгеноспектрального аналізу [266]. При використанні його для аналізу з однаковим зондом плями аналізатора (при досить великому збільшенні об'єкта досліджень) помітно змінюється вміст й розподіл компонентів, що входять в основний метал деталі, виробу. Однак, зі зменшенням зони виміру можливо значна погрішність й істотна неоднорідність результатів по локальному розподілі компонентів.

Використовуючи пляму зонда глибиною 3 мкм (\varnothing 6мкм) при статистичному мікрорентгеноспектральному аналізу на зразку після експлуатації, можливо в різних зонах вимірів одержати як розподіл компонентів, так і розрахувати частку захисної плівки, її товщину щодо вмісту компонентів у плямі й порівняти з показниками вихідної поверхні. Забезпечити стабільність розміру плями зонда можливо при використанні однакових параметрів зондувального променю.

Об'єднавши методи рентгенівської спектроскопії й електрометалографічних досліджень [193], розрахували, що загальна частка введеної домішки (наноалмази, мідь) в мащення (відпрацьоване дизельне паливо + солідол) формує на поверхні тертя до 78% захисної плівки.

Сформована плівка при терті включає компоненти: S, Si, Al, P, Mg, Cl, K, Ca, C, O, Na (табл. 4.1). При локальному спектральному аналізі частка компонентів основного металу на поверхні із плівковим покриттям знижується тому, що зонд

відбиває зменшену концентрацію основного металу (за рахунок внеску плівки). На основі такого аналізу встановили, що найбільш стабільним показником для оцінки товщини окисної плівки, яка формується при терті, є зміна концентрації заліза [267].

Аналізом встановлено (табл. 4.3), частка заліза при формуванні плівки суттєво зменшується.

Таблиця 4.3 – Середня товщина захисних плівок залежно від зміни змісту заліза

Товщина захисної плівки, мкм		Середня частка заліза, згідно локального аналізу, %	Середня частка заліза, згідно спектрального аналізу, %
Мінімальна	0,32	72,15	74,93
Максимальна	1,34	58,55	
Середня	1,217	65,7	

Розрахунки товщини окисної плівки (вторинної захисної структури) проводили з урахуванням того, що пляма $\varnothing 3$ мкм при мікрорентгеноспектральному аналізі рівна $\frac{1}{2}$ розміру кола $\varnothing 6$ мкм, а його площа оцінюється як $\pi r^2 = 3,14 \cdot 9 = 28,26$ мкм². При цьому, $\frac{1}{2}\pi r^2 = 14,13$ мкм² відповідає площі плями зонда. Виходячи з даних спектрального аналізу металу, при якому встановлена середня частка Fe = 74,93% в площі плями, що дорівнює 14,13 мкм², розрахували середню товщину плівок. Різниця між середньою концентрацією заліза в вихідному металі становить (74,93%) і з плівкою (65,7%), а різниця між ними – 9,23% (див. табл. 4.3). Таким чином, середня товщина дорівнює 1,217 мкм. Розрахунки зміни захисних плівок також наведені в цій таблиці. Показано, що мінімальна товщина захисної плівки досягає 0,32 мкм, а максимальна – 1,34 мкм. Оцінюючи середню товщину плівки, має місце уявлення про розподіл її товщини на поверхні тертя. Оцінку можна проводити і за іншими компонентами (С, О при таких же домішках), з огляду на різницю між ними у вихідному металі і після його експлуатації (випробувань) з формуванням плівок. Оцінювати за іншими основними компонентами, які входять до складу металу, не завжди доцільно в зв'язку з тим, що вони схильні до ліквідації та формування неметалевих включень і карбідів, наприклад, Mn, Cr.

Виконані комплексні дослідження з використання детонаційної шихти, отриманої від утилізації боєприпасів, для введення в пластичне мащення різьбових з'єднань у сполученнях при компонуванні колон НКТ, показали їх більшу ефективність, чим графіту. При цьому найбільш оптимальною є фракція 10-20 мкм, яка забезпечує формування «кишень» для зберігання мастила й збільшує зносостійкість в 2 рази. Такий модифікатор для пластичного мастила також зменшує схильність з'єднань, що сполучаються, до схоплювання при експлуатації за рахунок підвищеної в ньому концентрації кисню.

У роботі запропонований метод визначення оксидних захисних плівок на основі статистичних оцінок за мікрорентгеноспектральним аналізом при зіставленні вигладжених зон, «кишень» для втримання мастила й основного металу. Встановлено, що при використанні запропонованого модифікатора захисні окисні плівки на поверхні тертя становлять від 0,32 мкм до 1,34 мкм у різних зонах і періодах експлуатації.

В результаті виконаних досліджень рекомендується спосіб оцінки товщини захисних плівкових покриттів проводити на основі визначення зміни концентрації заліза, що має місце при терті з модифікуючими домішками. Метод дозволяє оцінювати частку компонентів у плівках і ступінь їх неоднорідності, як за складом, так і за зміною товщини захисної вторинної структури.

Метод особливо ефективний для добору нових типів модифікуючих домішок до мастил, пластичних мастил і оцінки вмісту компонентів, що входять у плівки, які формуються при експлуатації деталей.

4.2 Експериментальні дослідження покриттів з використанням нано- і дисперсної алмазовмісної шихти й сировини природного походження – глини

4.2.1 Застосування нано- і дисперсної алмазовмісної шихти при наплавленні відновлювальних і зміцнюючих покриттів

Необхідні властивості відновлювальних покриттів звичайно забезпечують

легуванням і модифікуванням із введенням до складу домішки спеціальних компонентів або їх з'єднань. Існує велика кількість методів їх введення в рідку ванну. Всі ці методи й параметри при відновлювальному наплавленні визначаються ефективністю використання деталей в експлуатації.

У якості модифікуючої домішки використовували немагнітну фракцію детонаційної шихти від утилізації боєприпасів з алмазами. Така шихта, за даними хімічного аналізу включає нано- і дисперсні алмази 3,37-3,43% C, а також мідь (до 3,14%) і залізо (до 2,9%). Детонаційна шихта, що включає нано- і дисперсні алмази, які не розчиняються в рідкій фазі, можуть підвищити зносостійкість покриття завдяки зміні умов кристалізації (Додаток Е, Ж). В підсумку досліджували три різні варіанти нанесення покриття. Для цього використовували електрод Т-620 з додатковим модифікуванням його обмазкою немагнітною фракцією детонаційної шихти [251] і нанесенням шихти у вигляді шлікерного покриття на поверхню культиваторної лапи. Наплавлення зміцнюючих смуг робили на лапу вітчизняного виробництва, яка виготовлена зі сталі 65Г.

Для відновлювального наплавлення використовували карбідовмісний електрод Т-620, який стандартно застосовують на підприємствах [195-197, 268]. Хімічний склад електрода наступний, %: 3,0 C; 2,2 Si; 1,2 Mn; 22,5 Cr; 0,7 Ti; 0,8 V; 0,03 S. Такий матеріал електрода забезпечує підвищення зносостійкості відновленого шару, але характеризується більшим тепловкладенням, і використання такої технології відновлювального наплавлення на тонкостінні деталі сприяє її проплавленню й пошкодженості при нанесенні покриттів. Спостережуване знижує якість і експлуатаційні показники, що вимагає зниження температури рідкої ванни.

Раніше виконаними дослідженнями [251] було встановлено, що оптимальною часткою модифікуючої домішки є 5-7%. Використовували наступні параметри зміцнення: сила струму 160А, напруга 28В, швидкість наплавлення 17-19 м/год.

Виготовлені шліфи піддавали різному травленню. Основу травили 4% розчином азотної (HNO_3) кислоти в етиловому спирті, а наплавлене покриття – «царською горілкою» (сумішшю концентрованих азотної HNO_3 і соляної HCl).

На першому етапі була проведена оцінка структури. Для цього

використовували металографічний мікроскоп Axio Vert A1. Одночасно оцінювали й розмір сформованих неметалевих включень [269, 270], які можуть впливати на якість і властивості відновленого шару при експлуатації.

У покритті при відновлювальному наплавленні тільки електродом виявлена трохи менша кількість точечних неметалевих включень (рис. 4.6), чим при його модифікуванні шихтою (рис. 4.7, а), внесеної в рідку ванну шляхом обмазки електрода. Аналогічна картина зі збільшенням неметалевих включень спостерігається й при введенні детонаційної шихти у вигляді шлікерного покриття (рис. 4.7, б).

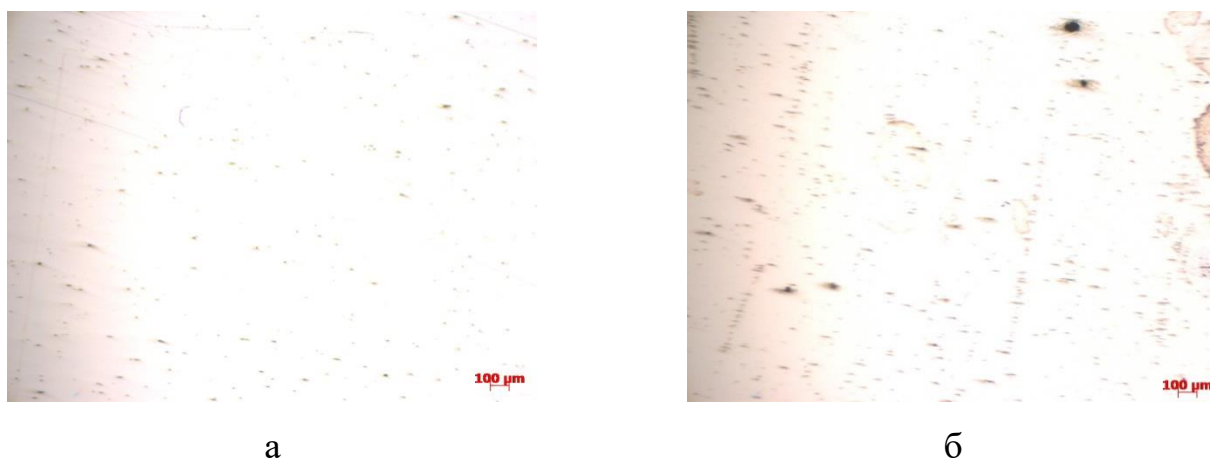


Рисунок 4.6 – Неметалеві включення в покритті відновленого шару електродом Т-620 (а) і основного металу (б), $\times 200$

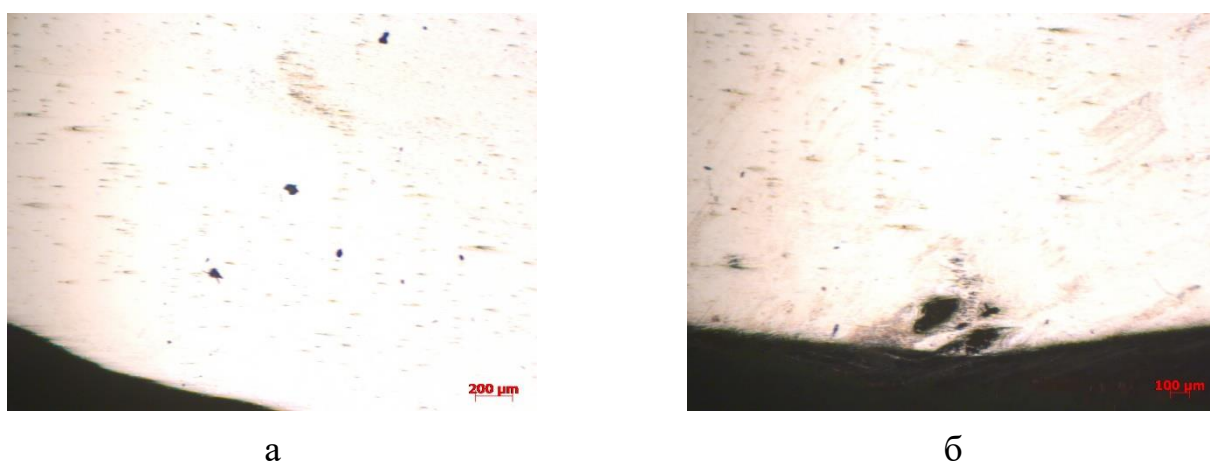
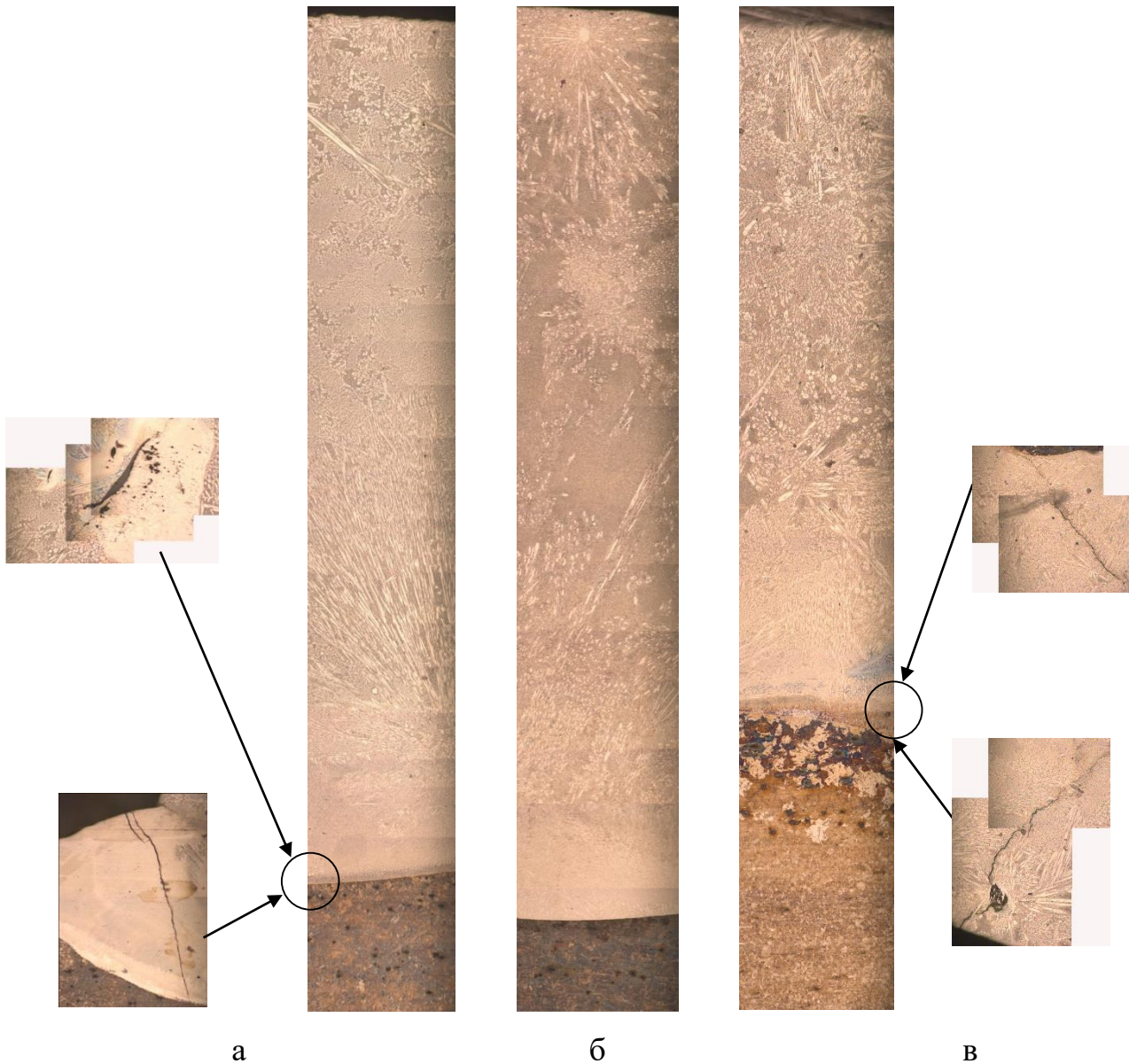


Рисунок 4.7 – Неметалеві включення в покритті відновленого шару електродом Т-620 з додатковим модифікуванням обмазкою немагнітною фракцією детонаційної шихти (а) і електродом Т-620, а у випадку шлікерного покриття (б), $\times 200$

На рис. 4.8 наведені з'ясовані панорами мінливості мікроструктур по перетину відновленого шару. При введенні модифікаторів (шихти) у рідку ванну структура металу покриття суттєво змінюється. Вона стає більш однорідною. Це пов'язане із зміною температури при наплавленні й подрібненням карбідів. Формується мартенситна структура відпуску матриці.



а – наплавлення електродом Т-620; б – наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням немагнітної фракції детонаційної шихти; в – наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти

Рисунок 4.8 – Мікроструктура по перетину зразків, $\times 200$ [251]

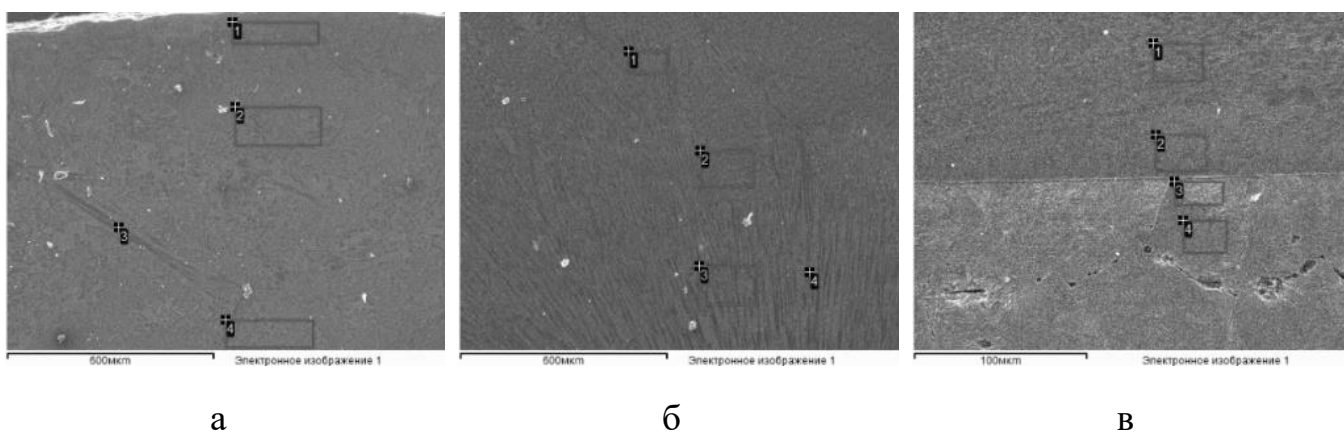
Зміцнююче покриття наносили у вигляді смуг [271, 272]. Структури при

наплавленні без модифікування й з шлікерним покриттям немагнітної фракції детонаційної шихти супроводжувалися тріщиноутворенням в зоні змінної товщини лезо-основа, а також і в інших частинах лапи.

Що стосується формування дефектів (пор, раковин і тріщин), слід зазначити, що в зоні нанесення зміцнюючих смуг при наплавленні без модифікування формується більш неоднорідна структура з формуванням зон грубих, тонких і протяжних розеток карбідів у границі сплавлення, що характеризується підвищеною мікротвердістю.

При модифікуванні детонаційною шихтою такі карбідні розетки більш рівномірно розподілені в металевій матриці, і замість протяжних тонких включень вони роздроблені, що сприяє формуванню більш однорідної структури, меншому напруженому стану перехідної зони, а також зниженню її довжини. У такому перехідному шарі повністю відсутні будь-які дефекти.

Для дослідження структуроутворення металу в покритті при більших збільшеннях, а також оцінки розподілу хімічних елементів по його зонах використовували електронну мікроскопію й локальний мікрорентгеноспектральний аналіз. Мікрорентгеноспектральним локальним аналізом (МРСА) оцінено розподіл хімічних компонентів по глибині наплавленої смуги відповідно до варіантів наплавлення – без- (рис. 4.9, табл. 4.4) і з використанням модифікуючої домішки (рис. 4.10-4.11, табл. 4.5-4.6).



а – поверхня наплавлення; б – середина; в – зона термічного впливу

Рисунок 4.9 – Електронні фотографії структури наплавлених смуг електродом Т-620 із вказанням зон МРСА

Таблиця 4.4 – Дані МРСА розподілу хімічних елементів по перетину наплавлених смуг електродом Т-620

Поверхня

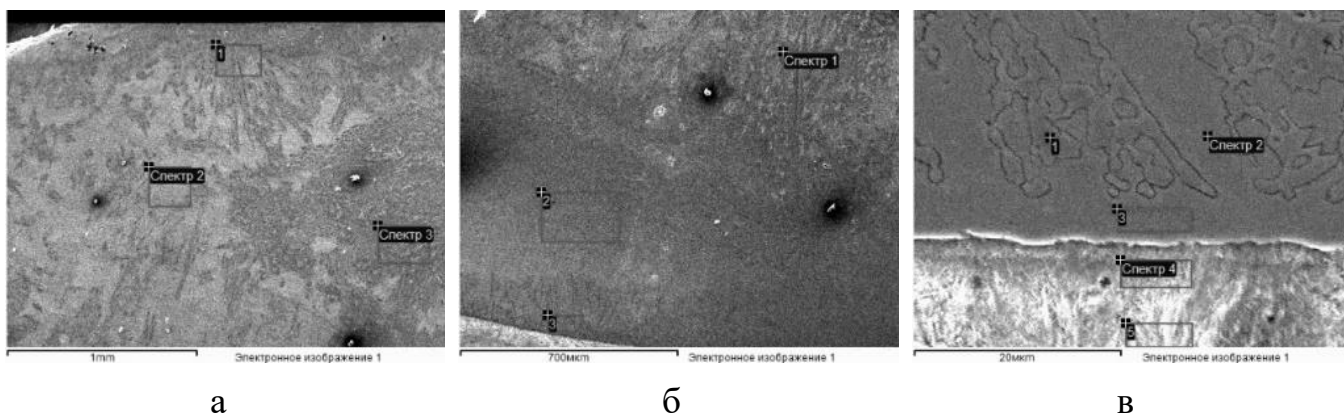
Спектр	С	О	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	8.71	3.15	0.51	1.69	22.24	5.38	55.47	0.34	2.50
2	8.91	2.78	0.19	1.48	24.05	4.96	54.61	0.86	2.15
3	10.51	-	-	0.05	42.71	5.49	39.47	-	1.77
4	7.71	2.52	0.17	1.60	23.35	5.34	56.83	0.84	1.64
Max	10.51	3.15	0.51	1.69	42.71	5.49	56.83	0.86	2.50
Min	7.71	2.52	0.17	0.05	22.24	4.96	39.47	0.34	1.64

Середина

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

Перехідна зона

Спектр	С	О	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	7.14		0.26	1.60	21.96	5.35	61.26	0.29	2.14
2	7.01	2.30	-	1.27	13.91	3.90	70.29	-	1.32
3	6.65	3.39	0.17	0.19	0.28	0.99	88.32	-	-
4	5.55	2.11	-	0.17	-	0.92	91.24	-	-
Max	7.14	3.39	0.26	1.60	21.96	5.35	91.24	0.29	2.14
Min	5.55	2.11	0.17	0.17	0.28	0.92	61.26	0.29	1.32



а – поверхня наплавлення; б – середина; в – зона термічного впливу

Рисунок 4.10 – Електронні фотографії структури наплавлених смуг електродом Т-620 з модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти із вказанням зон МРСА

Таблиця 4.5 – Дані МРСА розподілу хімічних елементів по перетину наплавлених смуг електродом Т-620 з модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної

шихти

Поверхня

Спектр	С	О	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Mo
1	12.98	2.28	0.22	1.17	17.05	3.90	61.12	1.27
2	10.78			1.28	18.19	4.12	64.15	1.47
3	14.06		0.59	1.37	19.13	4.23	58.61	2.01
Max	14.06	2.28	0.59	1.37	19.13	4.23	64.15	2.01
Min	10.78	2.28	0.22	1.17	17.05	3.90	58.61	1.27

Середина

Спектр	С	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Mo
1	13.12		1.39	18.58	4.19	61.07	1.65
2	9.28	0.47	1.45	17.06	3.79	66.54	1.41
3	9.23		1.30	15.47	3.60	68.80	1.60
Max	13.12	0.47	1.45	18.58	4.19	68.80	1.65
Min	9.23	0.47	1.30	15.47	3.60	61.07	1.41

Перехідна зона

Спектр	C	Si	Cr	Mn	Fe	Mo
1	13.61	0.55	23.14	3.66	57.77	1.27
2	10.78	1.39	7.88	2.72	77.24	
3	9.82	1.20	16.30	3.28	68.62	0.78
4	8.06	0.98	5.79	2.28	82.89	
5	11.20	0.24	0.46	1.11	86.98	
Max	13.61	1.39	23.14	3.66	86.98	1.27
Min	8.06	0.24	0.46	1.11	57.77	0.78

При модифікуванні немагнітною фракцією детонаційної шихти (рис. 4.10, табл. 4.5) металу наплавленням в смузі знижується температура рідкої ванни (наявність мікрохолодильників – алмазів) і змінюються умови кристалізації. Це супроводжується збільшенням середньої частки карбідної фази на 27% у верхній зоні, у середній на – 32% і перехідній – 70%. Крім того, однорідність розподілу вуглецевмісних фаз у наплавлених смугах більш рівномірна по перетину при модифікуванні вторинною шихтою. Так, при традиційному наплавленні концентрація вуглецю у верхній зоні змінюється в межах 2,8%, середній 1,83% і перехідній – 1,64%. У випадку модифікування відзначається більша однорідність у розподілі цього компонента в різних зонах. Це відповідає й досягнутим показникам рівня мікротвердості. При традиційному способі наплавлення відзначається значна частка кисню у всіх зонах аналізу до 1,6-3,39%. При модифікуванні вторинною шихтою (див. табл. 4.5) цей компонент виявлений тільки у верхній зоні наплавлення (2,28%).

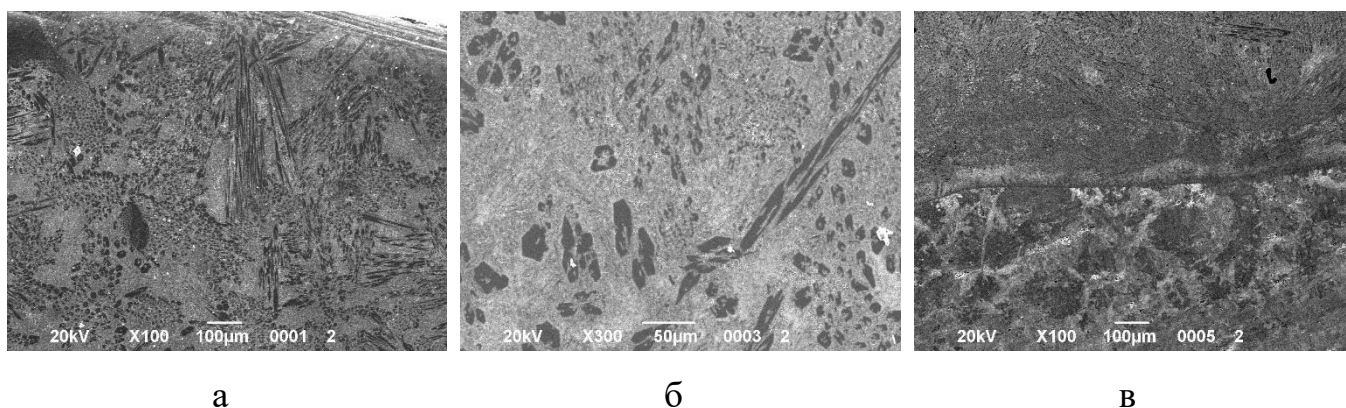
Що стосується розподілу компонентів Mn, Si, Mo, то вони близькі за концентрацією в порівнюваних варіантах. Щодо частки заліза, то його середнє значення на 8,4% більше при модифікуванні, а у верхній і середній зонах відрізняється ще більш суттєво – на 14,5%. Спостережуване можна пояснити формуванням у цих зонах більшої частки карбідів цементитного типу.

Розподіл хрому за трьома аналізованими зонами в 2,2 рази більш рівномірний при використанні модифікування з нанесенням смуг наплавленням, що досягається подрібненням карбідних фаз при кристалізації.

Незначну тенденцію підвищення Al при модифікуванні можна пояснити тим, що цей компонент входить до складу детонаційної шихти. Виявлено, що його частка в різних зонах наплавлення (верх, середина) змінюється в межах 0,17-0,51% при традиційному наплавленні смуг і – 0,22-0,59% у випадку модифікування вторинною шихтою.

Відсутність істотної різниці в змісті компонентів Al і Si, якими засмічений основний метал, може бути пов'язана зі зміною концентрації цих компонентів з урахуванням того, що при традиційному нанесенні смуг наплавленням такі включення спливають в зону покриття і її засмічують, а при модифікуванні вони в більшій мірі спливають.

При наплавленні електродом по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти (рис. 4.11, табл. 4.6) відбувається підвищення концентрації С до 18,53%. При звичайному наплавленні електродом вуглець становить максимум 9,43%. Також проявляються сліди Zr. Його концентрація коливається від 0,32 до 0,65% по всьому перетину покриття.



а – поверхня; б – середина; в – перехідна зона

Рисунок 4.11 – Електронікроскопічна структура по перетину покриття наплавленого металу електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти

Таблиця 4.6 – Дані МРСА розподілу хімічних елементів по перетину наплавлених смуг електродом Т-620 по шлікерному покриттю не магнітної фракції детонаційної

шихти

Поверхня наплавлення

Спектр	С	О	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	10.45	2.79		0.95	26.94	4.68	51.93	0.62	1.63
2	6.72	1.80	0.30	2.16	13.71	5.44	67.45	0.32	2.11
3	6.84	1.79		1.46	22.05	5.21	60.14	0.50	2.01
4	11.55	1.12			38.41	4.89	41.72	0.46	1.84
Max	11.55	2.79	0.30	2.16	38.41	5.44	67.45	0.62	2.11
Min	6.72	1.12	0.30	0.95	13.71	4.68	41.72	0.32	1.63

Середина наплавлення

Спектр	С	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	7.48	0.26	1.62	20.62	4.99	62.27	0.65	2.12
2	6.88	0.31	2.03	15.37	4.85	67.55	0.56	2.45
3	18.53		0.14	39.45	4.27	36.48		1.13
4	18.06		0.07	38.26	4.17	38.23		1.21
Max	18.53	0.31	2.03	39.45	4.99	67.55	0.65	2.45
Min	6.88	0.26	0.07	15.37	4.17	36.48	0.56	1.13

Перехідна зона

Спектр	С	О	Al	Si	S	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	6.17		0.20	1.72		19.91	4.64	65.21	0.40	1.75
2	6.32		0.28	1.59	0.45	14.64	4.41	71.71	0.60	
3	5.63	1.74	0.27	0.99		4.87	2.01	84.01		0.47
4	5.97	2.95		0.15			1.15	89.77		
Max	6.32	2.95	0.28	1.72	0.45	19.91	4.64	89.77	0.60	1.75
Min	5.63	1.74	0.20	0.15	0.45	4.87	1.15	65.21	0.40	0.47

Вміст Al у всіх зонах практично не змінюється, і становить ~ 0,275%. У середній частині наплавлення не виявлений кисень. Підвищення Cr по зонах коливається від

2,5 до 4 раз. Істотної зміни наплавлення по шлікерному покриттю не вносить. Вплив структурних змін та їх ефективність можуть бути визначені тільки при випробуваннях, що моделюють зношування, або в умовах експлуатації в машинах.

4.2.2 Застосування природної сировини – глини для модифікування покриттів

В якості модифікуючої домішки використовували бентонітову глину [251, 273-275]. Вибір цього матеріалу обумовлений тим, що використання як модифікатор глини, яка містить окисли кремнію й алюмінію, можуть добре протистояти й пручатися зношуванню з аналогічним матеріалом, що входять до складу ґрунту.

Для реалізації цього процесу на електрод наносили тонке покриття бентонітової глини. Оцінку хімічного складу такої глини виконано рентгеноспектральним аналізом на енергодисперсійному спектрометрі «Спрут» СЕФ 01 М. За результатами аналізу виявлені наступні компоненти, %: 1,65 Fe, 0,25 K, 0,15 Ca, 0,06 S, 0,2 Mg, 54,88 Si, 32,42 Al, 0,3 Na. Глину для модифікування використовували у вигляді подрібненого порошку. Його змішували з клеєм ПВА на водній основі й наносили тонким рівномірним шаром на поверхню електрода. Електрод просушували при кімнатній температурі в період 48 год. Частка наносимого модифікатора стосовно електрода становила 6-8%, тобто, %: 0,099-0,132 Fe, 0,015-0,02 K, 0,009-0,012 Ca, 0,0036-0,0048 S, 0,012-0,016 Mg, 3,29-4,39 Si, 1,94-2,59 Al, 0,018-0,024 Na. Виходячи із цього, можна чекати помітне збільшення концентрації кремнію й алюмінію. Нанесення покриття наплавленням здійснювали на стрілчасту лапу культиватора зі сталі 65Г.

Лабораторними дослідженнями зразків двох варіантів наплавлення: електродом Т-620 і з додатковим модифікуванням глиною виготовили шліфи, які піддавали різному травленню. У покритті при відновлювальному наплавленні електродом виявлена менша кількість неметалевих включень (див. рис. 4.6), чим при його модифікуванні глиною (рис. 4.12), внесеної в рідку ванну шляхом обмазки електрода. На рис. 4.13 наведені зіставні панорами мінливості мікроструктур по перетину відновленого шару. При введенні глини в рідку ванну структура металу покриття

суттєво змінюється. Вона стає більш однорідною. Це пов'язане зі зміною температури при наплавленні. В обох варіантах (див. рис 4.8, а, та рис. 4.12) формуються мартенситна структура відпуску матриці. При модифікуванні глиною не виявлене формування будь-яких дефектів.



Рисунок 4.12- Неметалеві включення в покритті відновленого шару електродом Т-620 з модифікуванням глиною, $\times 200$

Для дослідження структуроутворення металу в покритті при більших збільшеннях, а також для оцінки розподілу хімічних елементів по його зонах використовували електронну мікроскопію й локальний мікрорентгеноспектральний аналіз.

Електронномікроскопічні зображення сформованої структури по перетину покриття металу при введенні глини наведені на рис. 4.14. Виявлена відмінність, яка полягає в наступному. При наплавленні тільки електродом формується більш груба структура із протяжними голчастими виділеннями карбідної фази. При модифікуванні глиною такі включення дробляться й одночасно з'являються карбідні виділення зернистого типу, рівномірно розподілені по перетину покриття як у вигляді окремих включень, так і зон. Така мінливість гетерогенної структури забезпечує досягнення більшої однорідності в розподілі карбідної складової й меншої схильності її до пошкоджуваності при експлуатації. При введенні глини в покриття структура на поверхні й у середній його частині більш однорідна.

Спостережуване відбувається за рахунок зниження температури рідкої ванни при введенні модифікуючої домішки з компонентами К, Са, Mg, Na, що входять до складу глини. Виявлені зміни й на границі сплавлення з основним металом. Для оцінки

ступеня неоднорідності сформованої структури по перетину покриття провели електронікроскопічні дослідження, сполучені з оцінкою локальним спектральним аналізом (див. рис. 4.14 і табл. 4.7) по розподілу компонентів (Додаток Г, рис. Г.1, Г.2).

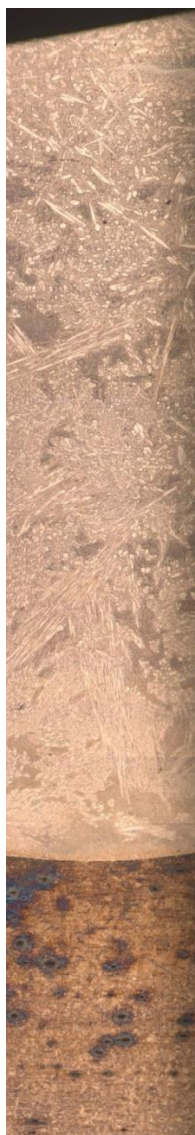
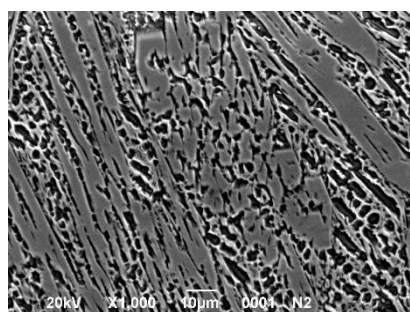
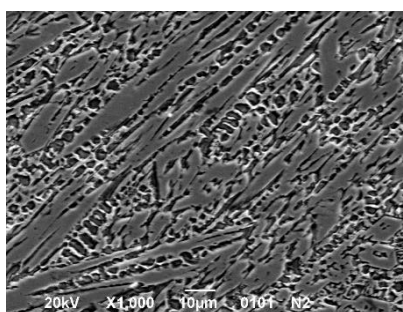


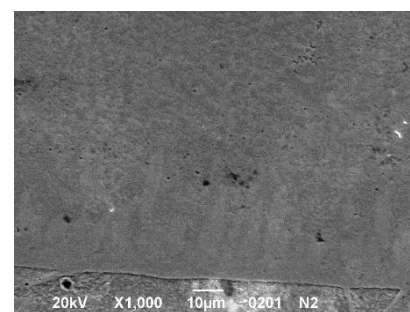
Рисунок 4.13 – Мікроструктура по перетину наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням бентонітової глини, $\times 200$



а



б



в

а – поверхня; б – середина; в – перехідна зона

Рисунок 4.14 – Електронікроскопічна структура по перетину покриття наплавленого металу електродом Т-620 при модифікуванні глиною, $\times 1000$

Таблиця 4.7 – Хімічний склад наплавленого металу електродом Т-620 з модифікуванням бентонітовою глиною, %

Поверхня покриття

Спектр	C	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	11,97	0,95	-	0,04	0,03	42,09	4,82	38,47	-	1,64
2	9,94	15,98	0,15	4,82	0,17	7,60	4,21	49,91	0,65	6,57
3	10,89	4,49	0,12	1,06	0,08	33,71	4,93	42,17	0,42	2,14
4	9,57	9,56	0,17	3,05	0,10	15,78	5,23	52,33	0,85	3,36

Середина

Спектр	C	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	13,34	0,92	0,08	0,07	-	40,00	5,13	38,86	-	1,61
2	10,90	2,23	0,43	3,49	-	8,31	4,34	69,54	0,04	0,73
3	11,42	5,91	0,32	3,82	-	9,39	4,40	63,34	0,02	1,38
4	7,01	6,49	0,17	3,22	0,10	11,70	5,24	63,12	0,33	2,63

Перехідна зона

Спектр	C	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Zr	Mo
1	5,86	0,14	1,52	0,10	19,22	4,69	66,77	-	1,69
2	5,63	0,15	1,36	-	14,11	4,11	72,39	0,70	1,54
3	4,53	0,14	1,25	-	9,24	3,28	80,94	-	0,62
4	6,41	0,10	0,14	-	0,18	1,06	92,12	-	-

Одночасно переформували ці таблиці й оцінили середні значення мінливості в розподілі компонентів порівняльно в різних зонах (табл. 4.8). Зіставний аналіз перехідної зони й термічного впливу показав, що при введенні модифікуючої домішки вони суттєво зменшуються ~ в 3 рази через зниження температури рідкої ванни. При відновленні наплавленням відносно тонкостінна культиваторна лапа практично повністю проплавляється, а при введенні модифікуючої домішки зберігається до 50% основного металу, що мінімізує схильність такого виробу до накоплення напружень, пошкоджуваності й підвищенню експлуатаційної стійкості.

Через значну гетерогенність покриття не вдається оцінити середні показники мікротвердості по зонах аналізу. Ефективною може лише бути оцінка стабільності состава карбідів і матриці (табл. 4.8), виконана методом мікрорентгеноспектрального аналізу при дослідженні електронних зображень структури. У ряді випадків не

вдалося провести аналіз всіх фаз і структурних складових через їхню дисперсність і локальної гетерогенності розподілу.

Таблиця 4.8 - Середні значення розподілу компонентів по зонах порівнюємих покриттів

Зона аналізу покриття	Тип покриття					
	наплавлення електродом Т-620			наплавлення електродом Т-620 з додатковим модифікуванням бентонітовою глиною		
	Me ₇ C ₃	Me _x C _y	матриця	Me ₇ C ₃	Me _x C _y	матриця
Верх	11,15 C; 41,24 Cr; 4,26 Mn; 42,185 Fe; 1,17 Mo	8,53 C; 1,83 O; 0,21 Al; 1,82 Si; 15,3 Cr; 4,685 Mn; 65,97 Fe; 1,65 Mo	-	11,43 C; 2,72 O; 0,06 Al; 0,55 Si; 0,055 Ti; 37,9 Cr; 4,875 Mn; 37,32 Fe; 0,21 Zr; 1,89 Mo	9,57 C; 9,56 O; 0,17 Al; 3,05 Si; 0,10 Ti; 15,78 Cr; 5,23 Mn; 52,33 Fe; 0,85 Zr; 3,36 Mo	9,94 C; 15,98 O; 0,15 Al; 4,82 Si; 0,17 Ti; 7,60 Cr; 4,21 Mn; 49,91 Fe; 0,65 Zr; 6,57 Mo
Середина	12,19 C; 0,46 O; 40,83 Cr; 4,43 Mn; 40,995 Fe; 1,09 Mo	7,67 C; 2,21 O; ; 1,70 Si; 15,73 Cr; 4,90 Mn; 65,97 Fe; 1,82 Mo	9,72 C; 2,21 O; 0,3 Al; 2,5 Si; 8,13 Cr; 3,83 Mn; 73,66 Fe; 0,63 Mo	13,34 C; 0,92 O; 0,08 Al; 0,07 Si; ; 40,00 Cr; 5,13 Mn; 38,86 Fe; 1,61 Mo	7,01 C; 6,49 O; 0,17 Al; 3,22 Si; 0,10 Ti; 11,70 Cr; 5,24 Mn; 63,12 Fe; 0,33 Zr; 2,63 Mo	11,16 C; 4,07 O; 0,375 Al; 3,655 Si; 8,85 Cr; 4,37 Mn; 66,44 Fe; 0,03 Zr; 1,055 Mo
Перехідна	-	6,80 C; 1,26 Si; 15,38 Cr; 4,13 Mn; 70,47 Fe; 0,87 Zr; 1,09 Mo	7,18 C; 2,96 F; 0,76 Si; 4,8 Cr; 2,02 Mn; 82,135 Fe; 0,125 Mo	5,86 C; 0,14 Al; 1,52 Si; 0,10 Ti; 19,22 Cr; 4,69 Mn; 66,77 Fe; 1,69 Mo	5,63 C; 0,15 Al; 1,36 Si; 14,11 Cr; 4,11 Mn; 72,39 Fe; 0,70 Zr; 1,54 Mo	5,47 C; 0,12 Al; 0,695 Si; 4,71 Cr; 2,17 Mn; 86,53 Fe; 0,31 Mo

Аналізом встановлено, що у вихідному варіанті без введення модифікуючої домішки виявлений спецкарбід Me₇C₃ містить %: 11,15-12,63 C; 40,10-42,38 Cr; 40,26-

43,16 Fe; 4,13-4,46 Mn; 1,05-1,22 Mo. Склад карбїду такого покриття у відновленому шарі є досить стабільним, оскільки частка мінливості в ньому компонентів незначна.

Менш стабільним за вмістом компонентів є карбїд типу Me_xC_y . Він містить %: 6,80-6,92 C; 1,68-2,21 O_2 ; 0,18-0,21 Al; 0,98-1,84 Si; 15,28-15,78 Cr; 3,74-4,73 Mn; 1,09-1,82 Mo; 62,56-70,47 Fe; 0,87 Zr. При цьому, середня концентрація вуглецю в ньому знижується від поверхні покриття до перехідної зони на 20%, а інші компоненти перебувають у близьких межах. В верхній, перехідній і зоні сплавлення виявлений в одиничних випадках цирконій. В середній і перехідній зонах покриття відсутній алюміній, загальна частка якого в покритті мінімальна. Наявність у поверхневій і середній зонах покриття кисню, концентрація якого змінюється по його перетину до 30%, імовірно можна пояснити недостатньо якісною підготовкою культиваторної лапи до нанесення відновлюючого покриття.

Аналіз матричної суміші фаз в середній частині покриття практично стабільний за усіма компонентами (C, O_2 , Al, Si, Cr, Mn, Mo, Fe, див. табл. 4.4). У перехідній зоні виявлений фтор, частка якого досягає 3,90-3,97% і пов'язане це з основним металом.

Інші компоненти в цій зоні змінюються в широких межах %: 4,43-8,48 C; 0,15-1,22 Si; 0,33-8,48 Cr; 1,0-2,84 Mn; 75,91-91,35 Fe.

Аналогічний порівняльний аналіз щодо розподілу компонентів у карбїдних фазах і матриці провели на деталях тієї ж партії культиваторних лап, але з додатковим модифікуванням при відновлювальному наплавленні із домішкою бентонітової глини Харківського родовища.

Встановлено, що додаткове модифікування такою глиною при нанесенні покриття практично не змінює вміст вуглецю в карбїдах і відповідає Me_7C_3 а також Me_xC_y у всіх зонах, що зіставляються (верх покриття, середина й перехідна зона). Що стосується концентрації компонентів, які вносить електрод (Cr, Mn, Ti, C), то вони розподіляються досить рівномірно як при традиційному нанесенні покриття, так і з модифікуванням. Так, у карбїдах Me_7C_3 і Me_xC_y , які визначають рівень твердості й зносостійкості, локальна мінливість цих компонентів у верхній і середній зонах покриття практично не змінюється. Різниця лише полягає в тому, що електронні мікроструктури й локальний рентгеноспектральний аналіз виявили в карбїдних фазах

включення окремих дисперсних з'єднань типу Al_2O_3 і рідше SiO_2 . Можна припустити, що такі включення стали центрами кристалізації. Компоненти Al і Si не розчиняються в карбідних фазах. Разом з тим, у ряді випадків спостерігали, що з'єднання SiO_2 розпадалося й при цьому виявляли тільки Si. Спостережуване може бути пов'язане з тим, що глини природних родовищ включають тільки Si, тому що SiO_2 – кремнезем, який розчиняється у воді [276], а глина в контакті з вологою.

Одночасна поява включень Al_2O_3 і окремих SiO_2 у покритті без введення модифікатора може бути пояснено двома причинами: впливанням окислів, погано вилучених з основного металу відновлюваної культиваторної лапи, у верхню зону покриттів і аналізом занадто тонких карбідів, при якому зондом мікроаналізатора захоплювали матричні фази. В середній і перехідній зонах наявність таких включень не виявляли. Кисень відсутній у перехідній зоні. Тому спостережуване може визначатися руйнуванням і впливанням окислів на поверхні відновлюваної деталі.

Локальний аналіз додатково виявив такі компоненти як Mo й Zr. Можна припустити, що Mo, який входить у карбідні фази як вихідного покриття, так і при його додатковому модифікуванні є компонентом електрода, а Zr, виявлений тільки при модифікуванні – до складу глини.

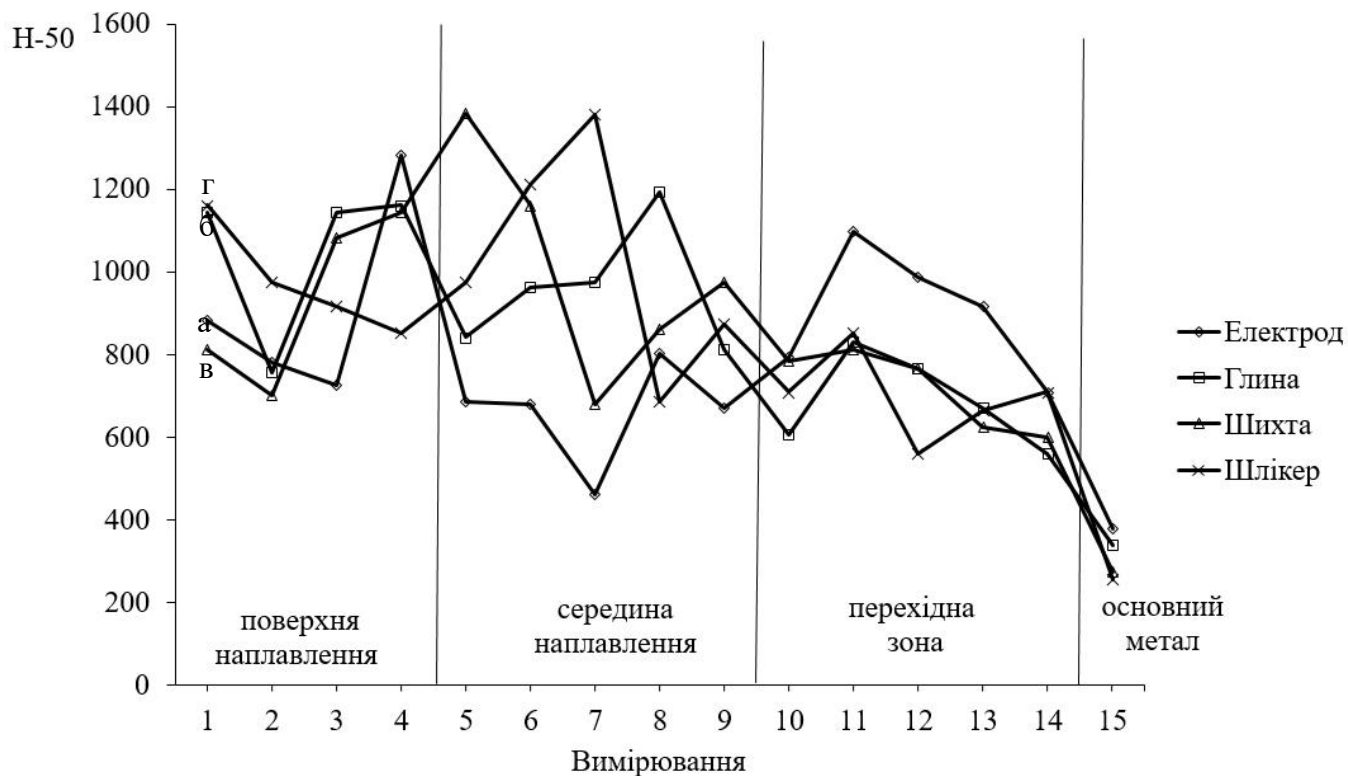
У порівняльних варіантах перехідна зона без модифікування відрізняється значним розкидом хімічних компонентів, що визначається більшим тепловідведенням і ліквідаційними процесами при змішуванні металу покриття й основи.

4.2.3 Дослідження властивостей нових покриттів

Для визначення впливу модифікування на рівень мікротвердості були проведені порівняльні дослідження варіантів зміцнення без і з модифікуванням домішками. На рис. 4.15 наведена залежність зміни середніх значень мікротвердості по глибині нанесених покриттів (Додаток В).

Якщо порівняти дані за рівнем мікротвердості й глибині покриття, то для вихідного варіанта вона, в середньому, склала HV-50-776, а модифікованого глиною

й шихтою - HV-50-960 і HV-50-958 відповідно, тобто підвищення зміцнення покриття при додатковому модифікуванні досягає 23%. При використанні немагнітної фракції детонаційної шихти в якості шлікерного покриття середнє значення мікротвердості досягає HV-50-974, тобто відзначається підвищення зміцнення на 25%. З наведеної залежності видно, що на поверхні й у середині покриття відзначається підвищення мікротвердості більшою мірою, а до основи металу лапи – її деякий спад.



а – наплавлення електродом Т-620; б – з модифікуванням бентонітовою глиною;

в – з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти;

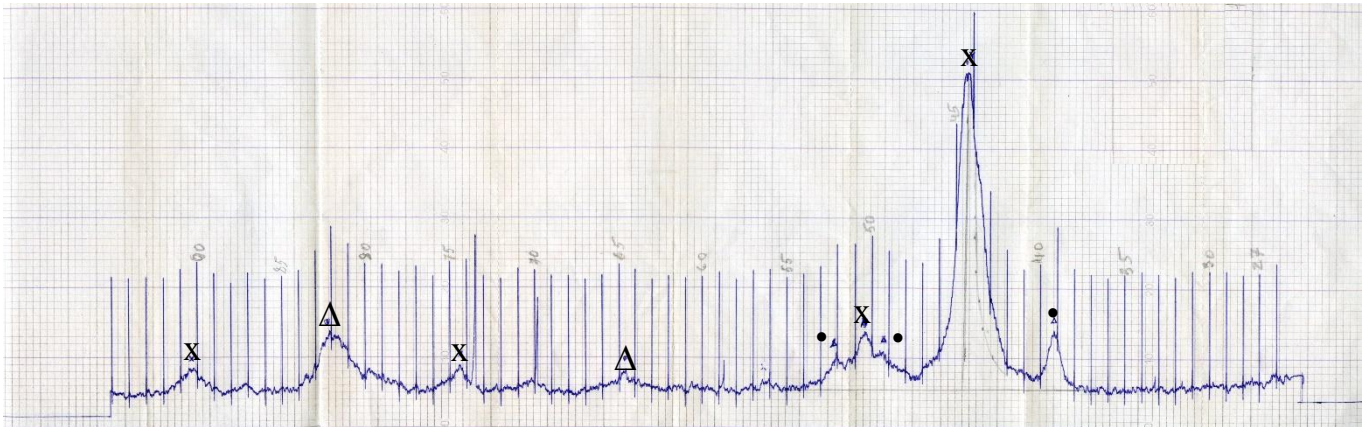
г – по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти

Рисунок 4.15 – Середні значення мікротвердості при модифікуванні відновлювального наплавлення

Проведені дослідження із впливу додаткового введення немагнітної фракції детонаційної шихти в рідку ванну [198, 188, 231, 232] і описаний сформований фазовий склад. В даній роботі інтерес представляє оцінка впливу введення бентонітової глини на фазовий склад. Для визначення фазового складу сформованого

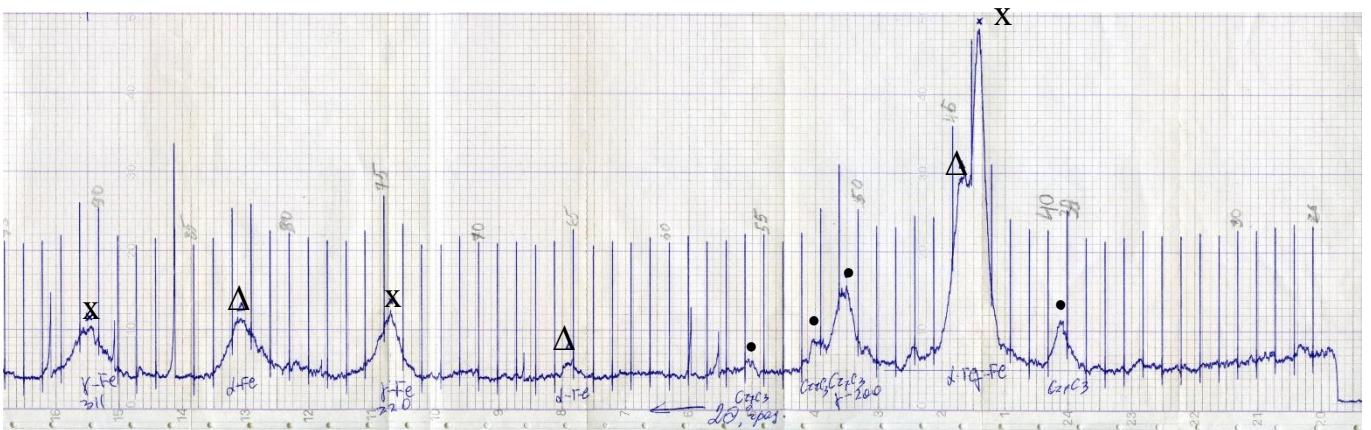
покриття при введенні бентонітової глини в наплавлення виконали рентгенозйомку (рис. 4.16, 4.17) покриттів.

Порівняльно досліджували додаткове введення глини з наплавленням тільки електродом. Розшифрування дифрактограми показало: наявність γ -fe, α -fe, Cr_7C_3 . Якісний аналіз наплавлення електродом Т-620 показав, що основною фазою є γ -fe (залишковий аустеніт), вміст якого $\sim 30\%$, а при наплавленні електродом Т-620 з обмазкою глиною – основною фазою є γ -fe (мартенсит відпуску, $\sim 70\%$).



• - Cr_7C_3 ; x - γ -fe; Δ - α -fe

Рисунок 4.16 – Дифрактограма наплавлення електродом Т-620



• - Cr_7C_3 ; x - γ -fe; Δ - α -fe

Рисунок 4.17 – Дифрактограма наплавлення електродом Т-620 з обмазкою глиною

Також були проведені дослідження з оцінки міцності зчеплення наплавленого покриття з основою, відповідно запропонованої методики (див. розділ 2).

Тому що руйнування шару (відшаровування нанесеного покриття від основи) при вимірах у перехідній зоні не настало, то міцність зчеплення оцінювали за залежністю (2.1). Провівши дослідження (Додаток Г) одержали наступні результати (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Міцність зчеплення нанесених покриттів

Варіант наплавлення	Міцність зчеплення, МПа
Електрод Т-620	0,30
	0,44
Електрод Т-620 по шлікерному покриттю не магнітної фракції детонаційної шихти	0,53
	0,34
Електрод Т-620 з обмазкою немагнітною фракцією детонаційної шихти	0,21
	0,23
Електрод Т-620 з обмазкою глиною	0,36
	0,33

Оцінивши міцність зчеплення за запропанованою залежністю, одержали, що при нанесенні покриття тільки електродом вона забезпечується на рівні 0,30-0,44МПа, а при нанесенні покриття з введенням глини 0,33-0,36МПа, при введенні шихти у вигляді обмазки – 0,21-0,23МПа, а у вигляді шлікерного покриття – 0,34-0,53МПа. При цьому, незважаючи на більш низькі показники, й у першому, й у другому випадку при введенні глини розклинення, а також яких-небудь дефектів від кінців відбитків не фіксували. При цьому завдяки стабільним показанням міцності, а значить і локальних напружень, границі текучості такий метал із модифікуючими домішками забезпечить вимоги експлуатації. Таким чином, виявлено, що додаткове введення модифікуючої домішки глини у рідку ванну знижує міцність зчеплення наплавлення з основним металом. Для перевірки даних локальних показань необхідно провести польові випробування наплавлених деталей з додатковим введенням таких домішок.

ВИСНОВКИ

Виконані комплексні дослідження зі структуроутворення, експлуатаційної стійкості виробів і конструкцій у різних галузях машинобудування.

1. Порівняльно проаналізували вплив модифікуючих домішок на основі вторинної сировини (детонаційної шихти від утилізації певного набору боєприпасів) з алмазною нано- і дисперсною фракцією й природньої – глини.

Вибір таких технологічних процесів базувався на раніше проведених дослідженнях автора, новітніх досягненнях науки й техніки, а також економічній ефективності нових технологічних рішень.

2. Встановлено, що 55% відмов при експлуатації насосно-компресорних труб (НКТ) відбувається через корозію різьбових з'єднань. Як було показано в розділі 3, таку пошкоджуваність провокують напруження, які створюються в колоні (верхній її частині, що відповідає ефекту Сен-Венана).

Для стабілізації різьбових з'єднань в експлуатації використовують пластичні мастила, в які вводять спеціальні компоненти. Однак, з відходом кисню, ряд з них стає абразивом, наприклад, графіт. Враховуючи це, в якості загущення пластичного мастила для різьбового з'єднання вводили 20-30% немагнітної складової детонаційної шихти з алмазною фракцією, покритої кисневмісними з'єднаннями. Для більш тривалого й стабільного впливу такої шихти при експлуатації на поверхні тертя формували подряпини. При цьому найбільш оптимальною є домішка фракцією 10-20 мкм, яка забезпечує формування «кишень» мащення й збільшує зносостійкість в 2 рази. Такий модифікатор мастила також зменшує схильність з'єднань, що сполучаються, до схоплювання при експлуатації за рахунок підвищеної в ньому концентрації кисню від періодичного (у міру зношування) надходження його в процесі тертя.

3. Запропонований метод визначення оксидних захисних плівок на основі статистичних оцінок по мінливості складу мікрорентгеноспектрального аналізу при порівнянні вигладжених зон, «кишень» для утримання мащення й основного металу. Встановлено, що при використанні запропонованого модифікатора товщина захисних

оксидних плівок на поверхні тертя змінюються від 0,32 мкм до 1,34 мкм у різних зонах і періодах експлуатації. Такі вторинні захисні структури руйнуються й знову формуються завдяки наявності кишень. При розрахунках враховували мінливість хімічного складу в плямі мікроаналізатора, де в якості основного компонента враховували частку заліза матриці. Метод особливо ефективний для добору нових типів, модифікуючих домішок до масел, пластичних мастил і оцінки вмісту компонентів, що входять у плівки, які формуються при експлуатації деталей.

4. При зміцненні й відновленні деталей наплавленням використовували вторинну сировину – детонаційну шихту від утилізації певного набору боєприпасів з нано- і дисперсною алмазною фракцією. Таку технологію використовували для забезпечення стабільної роботи культиваторних лап, які залежно від виготовлювача й умов експлуатації змінювалися по товщині від 6 до 5,5 мм. Зміцнення здійснювали нанесенням смуг для підвищення їх зносостійкості, самозагострювання й опору пластичної деформації.

Встановлено, що застосування електрода Т-620 при наплавленні тонкостінних виробів сприяє їх проплавленню, а також відзначається їхня підвищена схильність до дефектоутворення. Детальні комплексні дослідження показали, що ряд сформованих дефектів пов'язаний з основним металом і це відбувається за рахунок впливання неметалевих включень, а також підвищених локальних напруженнях на границі розділу покриття – основний метал. Введення модифікуючої домішки в кількості 5-7% від частки електрода усуває формування дефектів, що пов'язане зі зменшенням температури рідкої ванни за рахунок нерозчинної алмазної фракції, яка відіграє роль локальних мікроохолоджувачів. При цьому структура металу подрібнюється. Карбідна фаза виділяється у вигляді зернистих включень, більш рівномірно розподілених у матриці.

Локальну структурну й хімічну неоднорідність покриттів вивчали порівняльно методами електронної мікроскопії й рентгеноструктурного аналізу. При цьому аналізували три зони: поверхню покриття, середину й перехідну. Встановлено, що при додатковому модифікуванні помітно зростає частка карбідної фази до 27-32 % і більш рівномірно в 2,2 рази розподіляється основний компонент – Cr.

5. Запропоновано вводити домішку бентонітової глини наносили на електрод у кількості 6-8% від його частки. Порівняльні металографічні дослідження показали, що введення такої домішки сприяє формуванню більш однорідної структури практично по всіх зонах покриття за рахунок подрібнення голчастих виділень карбідів і формування їх зернистими. В обох варіантах покриттів (з введенням модифікатора глини й без неї) кристалізується мартенситна структура відпуску матриці. Додаткове модифікування в три рази знижує перетин перехідної зони. Крім того, нанесення такого покриття на тонкостінну культиваторну лапу повністю проплавляє її, а при введенні бентонітової глини зберігає її основу до 50%.

Мікрорентгеноспектральним аналізом виявлено, що крім фази Me_7C_3 проявляються включення Me_xC_y , які у відмінності від стехіометричного складу суттєво відрізняються часткою розчинених у ньому компонентів, наприклад, частка хрому знижується майже в три рази (з 41,24 - 40,83 до 15,3 - 15,74 %). Можна припустити, що частка таких карбідів нижче 7%, оскільки вони не виявлені методом рентгенівського аналізу.

6. Аналіз властивостей покриттів дозволив виявити наступне. Введення модифікуючої домішки детонаційної шихти з алмазною фракцією підвищує мікротвердість на 25%, а при використанні бентонітової глини – на 23%.

На основі вимірів мікротвердості в перехідному шарі виконана оцінка по міцності зчеплення нанесених покриттів, що дозволило виявити найбільшу однорідність цього показника, характерного для модифікуючих домішок шихти й глини, який описує локальність напруженого стану.

РОЗДІЛ 5

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ТА ОПТИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У
ВИРОБАХ З РІЗНИМИ УМОВАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

5.1 Теоретичне моделювання й експериментальне підтвердження процесів деформації при деградації структури металу в умовах експлуатації НКТ

Для трубопроводів і бурильних труб використовують різні доевтектоїдні сталі – вуглецеві й низьколеговані. В процесі експлуатації їх структура зазнає деградації за рахунок дії напружень в умовах корозійного середовища.

Визначення зон розвитку й локалізації деформацій оцінювали теоретичними розрахунками й підтверджували виявленими структурними змінами. Такий експеримент проводили для з'ясування впливу тільки пластичної деформації в зародженні й розвитку пошкоджуваності.

Вплив пластичної деформації вивчали на розривних зразках з оцінкою особливостей зміни властивостей і структури в Сталі 20пс ГОСТ 1050, яка використовується для бурильних труб, а також нафто- і газопроводів [237, 242, 265].

Відомо, що холодна пластична деформація супроводжується утворенням нових дислокацій, подрібненням зерен (формуванням субзерен), виникненням неоднорідності структури [230]. Коерцитивна сила феромагнітного матеріалу дуже чутлива до структурних змін, викликаних механічними деформаціями. В роботах [242, 277] методами оптичної мікроскопії були досліджені особливості формування мікроструктури Сталі 20 ГОСТ 1050, а також сталей 3 і X-52 після розтягування (холодної пластичної деформації) та її вплив на мінливість фізичних і механічних властивостей.

Вплив деформації також оцінювали по зміні рівня коерцитивної сили й анізотропії значень мікротвердості.

5.1.1 Розрахунки напружень у колоні різної довжини при експлуатації

Для трубопроводів нафтової й газової промисловості та бурильних труб використовують доевтектоїдні сталі – вуглецеві й низьколеговані. У розділі 3 вивчені особливості структурної деградації металу тіла й елементів різьбових з'єднань НКТ зі сталі P-110 виробництва Китаю, у процесі експлуатації яких має місце вуглекислотна корозія. Хімічний склад досліджуваного металу труб, %: 0,29C, 0,36Si, 0,72Mn, 1,1Cr, 0,1Ni.

Раніше виконаними [264, 278] комплексними дослідженнями було показано, що найбільша деградація металу має місце як у гладких ділянках труби, так і в різьбових з'єднаннях верхньої частини колони. Деградаційні явища при експлуатації металу в цих зонах розвиваються в результаті дії макро- і мікронапружень (структурних) від вібрації в різьбовому з'єднанні й розтягування під вагою колони. При розтягувальних навантаженнях, які моделювали при випробуваннях на плоских розривних зразках сталей з вмістом до 0,3% C, встановили, що особливо з краю зразка (це характерно й для внутрішньої поверхні труби) відбувається найбільш інтенсивна деформація, яка супроводжується дифузєю вуглецю за рахунок руйнування цементитної складової перліту в зоні з максимальною деформацією. Це сприяє тому, що прилягаюча до поверхні зона практично не має перліту, а стає зневуглецьованою. Одночасно в ній з'являються окремі включення менш стабільних карбідів, відповідні до складу Fe_xC_y . Крім того, такі включення видавлюються й на поверхню, створюючи локальні структурні напруження.

Що стосується різьбових з'єднань, то в результаті циклічних впливів коливань при недостатньо стабільному їх стані, інтенсивному терті у випадку використання пластичного мастила низької якості або, що швидко втрачає кисень у своєму складі, їх вторинні захисні структури (плівки) руйнуються. При цьому інтенсифікуються корозійні процеси, що повністю вражають зазначені зони.

Виходячи з аналізу деградаційних процесів, які характеризують експлуатаційну стійкість колони, необхідно вирішити дві проблеми: перша – оцінити характер напружень у верхній зоні колони для вибору найбільш стійкого до деградації

матеріалу; друга – у подальших дослідженнях запропонувати модифікатор для пластичного мастила, що вводиться для стабільної роботи з'єднання, із тривалим періодом збереження необхідних трибологічних характеристик (без формування пітінгів). Тому в даному розділі роботи оцінили характер зони локалізації напружень, що розвиваються в колоні при експлуатації.

При вирішенні поставленого завдання частково використовували методика розрахунків напружень на базі роботи [219]. В основу оцінки покладений варіаційний принцип найменшої дії зусиль, описаний в роботах з аналітичної механіки. Методика розрахунків докладно розглянута в раніше опублікованих роботах [79, 217, 279] і розділі 2.3.

При оцінці поведінки довгих стрижнів (труб в експлуатації) важким завданням виявилось знаходження довжини пластично-деформуємої ділянки, коли зовнішня сила не перевищує гранично пружну.

Невідомі переміщення деформацій в одмінних завданнях, докладно розглянутих у роботах [217, 279], хоча й визначаються за допомогою отриманих раніше залежностей, однак дають різні результати.

Ряд рішень при розрахунках на комп'ютері показали одмінні між собою результати. Імовірно це пов'язано з нерівномірним розподілом пружних деформацій по довжині стрижня.

Уточнення залежностей буде можливим лише при наявності експериментальних даних з використанням коефіцієнтів або вільних параметрів, що належать до дотичних деформацій, із застосуванням обробки даних методом найменших квадратів.

Розглянувши варіаційний принцип опису пружно пластичної системи, найцікавішим підходом до оцінки напруженого стану колони вважаємо використання диференціального рівняння без впливу зовнішньої сили в системі «пружність – пластичність». У раніше виконаних роботах [217, 279] розглядалася система:

$$F = \frac{G}{2}(l_2 - l_1)^2 + \sigma_{tek} e_{tek} V(l_1) = \min, \quad (5.1)$$

де G – задана твердість системи, кг/мм. Вона дорівнює:

$$G = \frac{Ebh}{l}, \quad (5.2)$$

де: $V(l_1)$ – обсяг пластичної деформації, обумовленою величиною l_1 (величина подовження, що залежить від пластичної деформації);

l_2 – параметр, що характеризує сумарне подовження від пружної й пластичної деформацій – задана величина;

l_1 – невідома;

e_{tek} , σ_{tek} – відповідно межа й напруження плинності;

У такій статичній системі твердість G вважали постійною величиною.

Для спрощення, як прикладу, використовували умову, при якій обсяг пластичної деформації дорівнював:

$$V(l_1) = bhl_1, \quad (5.3)$$

де b – ширина, h – висота.

Диференціюючи (5.1) по l_1 й дорівнюючи похідну до нуля, одержали:

$$-G(l_2 - l_1) + \sigma_{tek} e_{tek} bh = 0. \quad (5.4)$$

Враховуючи (5.4), одержали:

$$l_1 = l_2 - \frac{\sigma_{tek} e_{tek} bh}{G} = l_2 - \frac{\sigma_{tek} e_{tek} bhl}{Ebh} = l_2 - \frac{\sigma_{tek} e_{tek} l}{E} = l_2 - e_{tek}^2 l, \quad (5.5)$$

де l – довжина; E – модуль пружності (модуль Юнга).

Якщо в якості l_2 прийняти

$$l_2 = e_{tek} al, (0 < a \leq 1), \text{ те} \quad (5.6)$$

$$l_1 = ae_{tek} l - e_{tek}^2 l = e_{tek} l(a - e_{tek}), \quad (5.7)$$

$$\frac{l_2 - l_1}{l} = \frac{e_{tek} al - e_{tek} al(a - e_{tek})}{l} = e_{tek} a(1 - a + e_{tek}), \quad (5.8)$$

де в результаті одержуємо, що на яку б довжину не розтягували б стрижень, завжди знайдеться певна його частина, яка буде сприймати пластичну деформацію. Це відповідає принципу Сен-Венана.

У найпростішому випадку – зміна об'єму при пластичній деформації буде відповідати отриманню занижених значень пластичного подовження.

Для більш реального випадку - зміни об'єму по частині окружності - оцінимо

середні значення об'ємів при різних її радіусах:

$$\Delta h = \frac{l_d^2}{2r}; e_y = \frac{l_d^2}{2rh}; e_x = \frac{l_d}{l}; e_{tek}l \leq l_d \leq 0.094l; r = \frac{l_d^2}{2e_{tek}h}; r = \frac{l_d^2}{0.188h}; e_{tek}l\sqrt{he_y} \leq l_d\sqrt{he_y};$$

$$e_{tek}l \leq l_d \leq 0.094l; e_{tek}l \leq l_d \leq 0.094l$$

Розглянемо випадок, коли половина довжини стрижня рівна 100мм (рис. 5.1).

У роботі розглянуті й короткі зразки, половина довжини яких відповідає 50мм, а для стандартних – вона не перевищує 40мм. Тензометричні зміни для стандартних зразків покажуть тільки відношення, близьке до одиниці, тобто використовувати їх для визначення напруженого стану не доцільно [279].

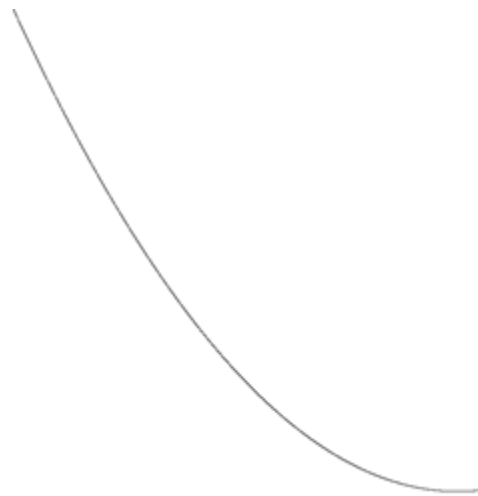


Рисунок 5.1 – Вплив деформації системи на гранично пружне переміщення для половини довжини стрижня

По горизонтальній осі відкладена величина гранично пружного переміщення $l_2 = 442,8$ мм. За умови, що твердість має постійне значення, зона пластичного деформування виявилася трохи меншої половини довжини колони, рівної 100м.

Мінімальна робота деформації описуваної системи, відповідає точці:

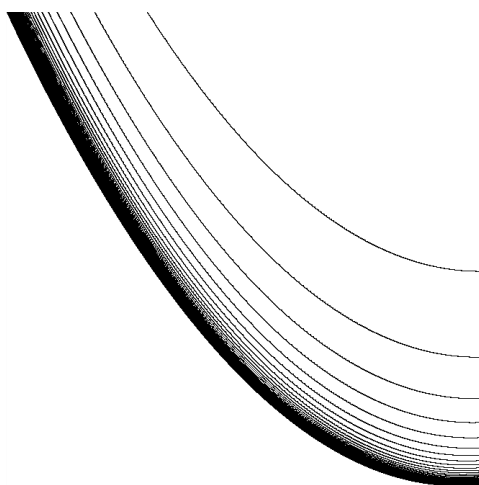
$$l_3 = 417,5 \text{ мм}, \quad \frac{l_2 - l_3}{l_2} = 0,0572 \text{ мм}. \quad (5.8)$$

Відомо, наприклад, що при прокатці дуже чітко спостерігається мінімум сумарного значення пружної й пластичної деформації [280]. У цьому випадку мінімум теж існує, але він дуже «слабкий», імовірно через те, що замість опору деформації в розрахунках використовували границю текучості. Отримана картина

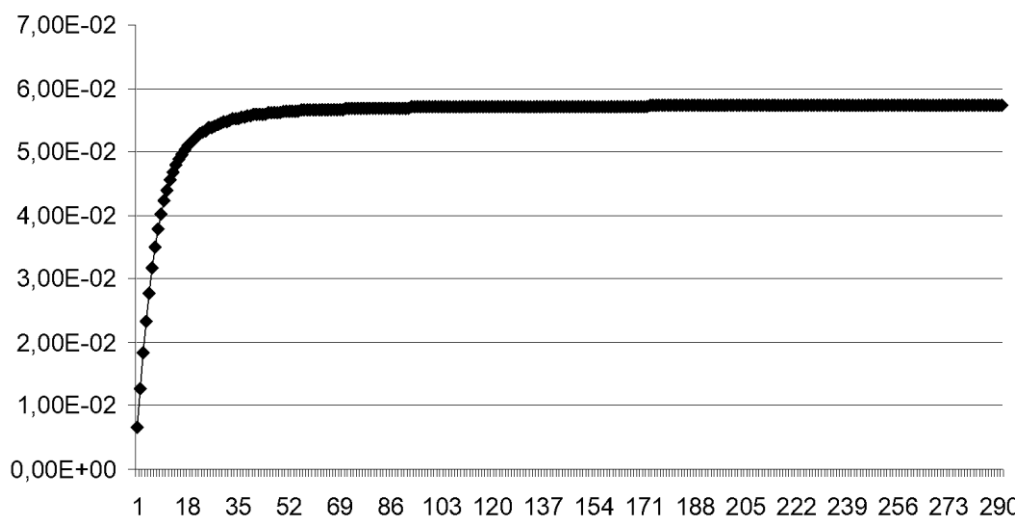
нагадує фазовий перехід, для одержання якого необхідно затратити додаткову енергію. І це підтверджує неоднозначність дотичних деформацій.

Вертикальна вісь відповідає роботі деформації системи.

Розглянувши ще кілька прикладів різних довжин від 50мм до 14,5м, дійшли висновку, що граничне значення рівне $\frac{l_2 - l_3}{l_2} = 0,0572$. При побудові подібних графіків для різних довжин, починаючи з 50мм із кроком 50мм, одержали картинку, наведену на рис. 5.2.



а



б

а – верхня крива відповідає половині довжини стрижня – 50мм; наступна – 100мм і так далі; б – опис сумарної деформації й мінімальних її значень

Рисунок 5.2 – Залежності зміни сумарної пружної й пластичної деформації

Алгоритм програми розрахунків заснований на переборі пружних і пластичних зон, а також знаходженні зон локалізації дотичних напружень.

На рис. 5.2, б по осі x кожне число потрібно помножити на 50, щоб одержати половину довжини стрижня, у мм. По осі в наведені значення $\frac{l_2 - l_3}{l_2}$.

Щоб довідатися середню довжину пластичного подовження, потрібно із гранично пружного подовження відняти гранично пружне подовження, помножене на коефіцієнт, отриманий із графіка, що залежить від половини довжини.

Починаючи з 5000мм (і навіть небагато менше) коефіцієнт із графіка рівний 0,0572.

Аналізували відомість пружно-пластичної системи до диференціального рівняння першого порядку шляхом виключення параметра l_2 . Цей параметр виключили за допомогою диференціювання.

$$\frac{dF}{dl_1} = G(l_2 - l_1) + \sigma_{tek} e_{tek} \frac{dV}{dl_1}, \quad (5.9)$$

Звідси:

$$l_2 = \left(\frac{dF}{dl_1} + Gl_1 - \sigma_{tek} e_{tek} \frac{dV}{dl_1} \right) / G. \quad (5.10)$$

Підставляємо цей вираз замість l_2 в (5.1)

$$F = \frac{G}{2} \left[\left(\frac{dF}{dl_1} + Gl_1 - \sigma_{tek} e_{tek} \frac{dV}{dl_1} \right) / G - l_1 \right]^2 + \sigma_{tek} e_{tek} V(l_1). \quad (5.11)$$

Розрахунками отримане диференціальне рівняння в неявному виді щодо функції F . Початковою умовою для нього може стати значення F при $l_1 = 0$, тобто:

$$F = \frac{G}{2} l_1^2, \quad (5.12)$$

тому, що об'єм пластично деформованого металу при цьому дорівнює нулю.

Представляє інтерес точка l_1 , у якій $\frac{dF}{dl_1}$ обертається в 0. Враховували, що об'єм

пластично деформованого металу мало залежить від радіуса.

З (5.9) одержимо два корені рівняння:

$$\frac{dF}{dl_1} = \sigma_{tek} e_{tek} \frac{dV}{dl_1} - \sqrt{2G(F - \sigma_{tek} e_{tek} V)}, \quad (5.13)$$

$$\frac{dF}{dl_1} = \sigma_{tek} e_{tek} \frac{dV}{dl_1} + \sqrt{2G(F - \sigma_{tek} e_{tek} V)}. \quad (5.14)$$

З них тільки перший, при певному l_1 може обернутися в 0. Тому рішенню підлягає тільки рівняння (5.13). Розглянемо розтягання стрижня. Спочатку необхідно визначити твердість пружної системи для цього випадку в кг/мм. Цього можна досягти, помноживши її на мм², як наведено в першому додатку (5.1), і мати роботу в кг/мм. При розтяганні це буде:

$$G = \frac{Ebh}{l}. \quad (5.15)$$

Розглянемо для початку досить спрощену модель пластичного деформування, коли:

$$V'bh l_1. \quad (5.16)$$

Тоді:

$$\frac{dV}{dl_1} = bh, \quad (5.17)$$

$$\frac{dF}{dl_1} = \sigma_{tek} e_{tek} bh - \sqrt{2G(F - \sigma_{tek} e_{tek} bh l_1)}. \quad (5.18)$$

Отримане диференціальне рівняння розв'язати можна тільки чисельним методом. У цьому випадку рівняння вирішували за допомогою методу кінцевих різниць за явною різницевою схемою з дуже маленьким кроком по координаті l_1 . У звичайно різницевій формі рівняння записується так:

$$\frac{F_{i+1} - F_i}{\Delta l_1} = \sigma_{tek} e_{tek} bh - \sqrt{2G(F_i - \sigma_{tek} e_{tek} bh l_{1i})}, \quad (5.19)$$

де Δl_1 – крок по координаті l_1 ;

l_{1i} – довжина пластично деформуємої ділянки на i -тому кроці розрахунків;

F_i – значення функції на i -тому кроці розрахунків;

F_{i+1} – значення функції на $i + 1$ кроці розрахунків.

З формули випливає, що значення функції на $i + 1$ кроці розрахунків дорівнює:

$$F_{i+1} = F_i + \Delta l_1 [\sigma_{tek} e_{tek} bh - \sqrt{2G(F_i - \sigma_{tek} e_{tek} bh l_{li})}], \quad (5.20)$$

при цьому
$$l_{li+1} = l_{li} + \Delta l_1. \quad (5.21)$$

У програмі розрахунків була реалізована класична чисельна схема Рунге-Кутти, що має 4-у ступінь точності відносно Δl_1 , але її опис більш громіздкий. Розрахунки за явною різницевою схемою практично збіглися з виконаним за цим методом.

Для визначеності рішення необхідно задати значення початкових умов, тобто:

$$l = 0 \quad (5.22)$$

і $F = \frac{G}{2} l_1^2$, згідно з формулою (5.12).

Залежність зміни величини опору деформації для 1/2 довжини стрижня 100мм наведена на рис. 5.3.

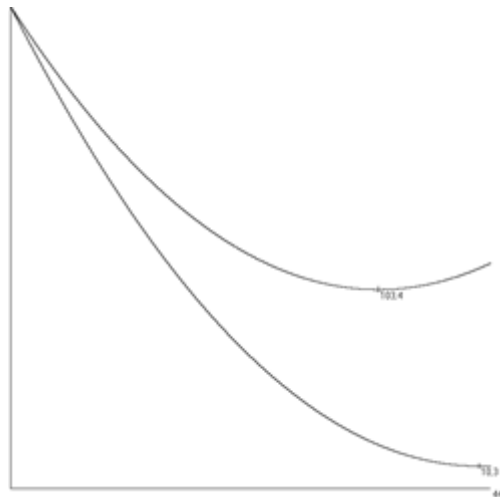


Рисунок 5.3 – Залежності зміни опору деформації для половини довжини стрижня, рівного 100м

Верхня крива відноситься до опору деформації, рівному $10\sigma_{tek}$, а нижня – до опору деформації, рівному σ_{tek} .

У стаціонарній точці мінімуму для верхньої кривої величина ділянки пластичності, рівна різниці між l_1 і абсцисою точки мінімуму відповідає 103,4 мм, у той час як для нижньої ця різниця в 10 раз менше.

Недоліком розглянутої моделі є неможливість завдання початкових даних менше мінімального значення $F(x) = \min$. Інакше рано або пізно підкореневе

вираження (5.19) стає негативним.

Зробили зведення основної умови рівноваги до диференціального рівняння першого порядку шляхом виключення параметра P , але в рівняння вводимо параметр пружного переміщення l_2 .

Через x позначили пластичне переміщення (мм). Через $V(x)$ позначили невідомий обсяг пластичної деформації. Для спрощення приймемо його рівним:

$$V(x) = bhx. \quad (5.23)$$

Через l_2 позначимо пружне переміщення в мм. У цьому випадку величина $l_2 = 442,8$ мм.

Твердість приймаємо, згідно із залежністю (5.15):

$$F(x) = P(l_2 + x) - \frac{G}{2}(l_2 - x)^2 - \sigma_{tek} e_{tek} V(x) = \min. \quad (5.24)$$

Диференціюємо й дорівнюємо похідну до нуля:

$$\frac{dF(x)}{dx} = P + G(l_2 - x) - \sigma_{tek} e_{tek} V'(x), \quad (5.25)$$

звідси
$$P = \frac{dF(x)}{dx} - G(l_2 - x) + \sigma_{tek} e_{tek} V'(x). \quad (5.26)$$

Підставляємо в (5.24):

$$F(x) = \left[\frac{dF(x)}{dx} - G(l_2 - x) + \sigma_{tek} e_{tek} V'(x) \right] (l_2 + x) - \frac{G}{2} (l_2 - x)^2 - \sigma_{tek} e_{tek} V(x), \quad (5.27)$$

звідси

$$\frac{dF(x)}{dx} = F(x) / (l_2 + x) + G(l_2 - x) - \sigma_{tek} e_{tek} V'(x) + \left[\frac{G}{2} (l_2 - x)^2 + \sigma_{tek} e_{tek} V(x) \right] / (l_2 + x). \quad (5.28)$$

Це лінійне рівняння відносно F . Його розв'язання можна знайти в явному виді.

Зазначені розрахунки мають і недолік, що полягає в тому, що крива, незалежно від початкових умов, спрямована опуклістю нагору (у попередньому випадку – униз).

У наведеній постановці неможливо виключити параметр l_2 , тому для одержання рівняння розглядали двовимірний випадок, де l_2 незалежна змінна, надалі буде позначена через y .

У цьому прикладі так само, як і в попередньому, половина довжини 100 метрів. Довжина l_2 та ж 442,8 мм. Отримана така ж довжина пластичної ділянки за рахунок

опору деформації не в 10 раз, як у попередньому випадку, а в 2,65 рази, яка перевищує границю текучості (рис. 5.4).

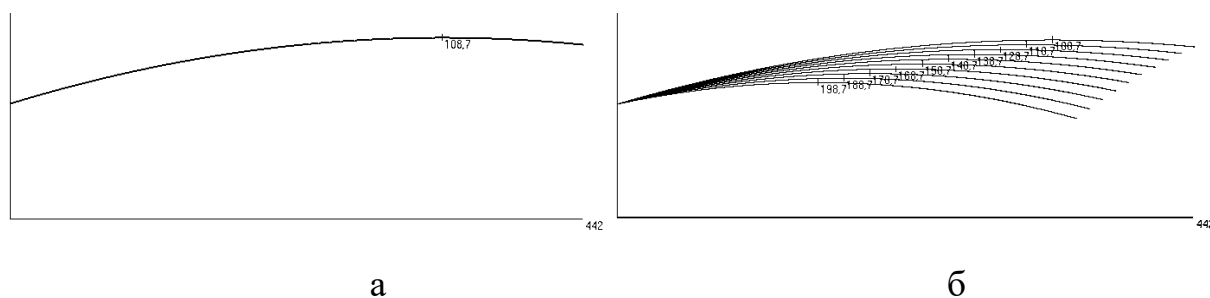


Рисунок 5.4 – Залежність зміни опору деформації для половини довжини 100м (а) і з різними значеннями l_2 (б)

Розглянутий той же приклад, але з різними значеннями l_2 (рис. рис 5.4, б). Рівномірність вихідних точок кривих, імовірно, свідчить про те, що це пов'язане з великою довжиною стрижня. При малих довжинах рівномірність може не проявлятися.

Виведення рівнянь у частинних похідних проводили методом виключення параметрів. Твердість у розрахунках вважається постійною величиною. Формула розглянута в роботі [217], методика відповідає постановці завдання:

$$F = P(\Delta l + l_1) - \frac{1}{2} E \left[\frac{\Delta l}{l - l_1} \right]^2 (l - l_1) b h - a_1 \sqrt{c l_1^2 + d} = \min ,$$

$$F(x, y) = P(y + x) - \frac{G}{2} (y - x)^2 - W(x) = \min \quad (5.29)$$

де y – пружне переміщення;

x – пластичне переміщення;

$W(x)$ – робота пластичної деформації.

Далі проводимо (5.29) диференціювання лівих і правих частин:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = P + G(y - x) - \frac{\partial W}{\partial x} , \quad (5.30)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = P - G(y - x) , \quad (5.31)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = -G - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} , \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = -G, \quad (5.33)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = G, \quad (5.34)$$

Віднімаючи з (5.30) (5.31), виключаємо параметр P :

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y} = 2G(y-x) - \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (5.35)$$

Якщо підставляємо в (5.35) замість G вираз (5.33), одержимо рівняння в частинних похідних другого порядку:

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y} = -2 \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} (y-x) - \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (5.36)$$

або, у більш звичній формі:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial y} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} (y-x) - \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (5.37)$$

Якщо підставляємо в (5.35) замість G вираз (5.34), також одержимо рівняння в частинних похідних другого порядку:

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y} = 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} (y-x) - \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (5.38)$$

або, у більш звичній формі:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial y} + 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} (y-x) - \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (5.39)$$

Рівняння (5.37) і (5.39) відрізняються за знаком других похідних. Але, якщо розглядати (5.37), при коливаннях з демпфером, знак повинен бути позитивним. В обох рівняннях, коли пластичне переміщення наближається до пружного, вплив других похідних прямує до нуля.

Ще одна критика цих рівнянь полягає в тому, що множник при першій похідній є коефіцієнтом демпфірування, який ввесь час дорівнює одиниці.

Різницева схема особливо в (5.37) буде схожа на різницеву схему рівняння теплопровідності. В (5.39) різницева схема буде не дво-, а тришарова, у відмінності від теплопровідності.

В результаті аналізу впливає, що можна, не виключаючи G , виключити з

розгляду функцію $W(x)$, що приведе до рівняння другого порядку в змішаних частинних похідних. При цьому можна припустити, що пластична деформація – функція не тільки безперервна, але, що й має безперервну похідну другого порядку.

У методі Гамільтона [281] розглядається інтеграл, при якому не потрібно безперервності.

Диференціюємо (5.35) по x :

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} = -2G - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}. \quad (5.40)$$

Із цього виразу віднімаємо (5.32):

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} = 3G. \quad (5.41)$$

Це рівняння являє собою умову коливань.

При розрахунках твердості прийняли довжину l стрижня постійної. Насправді вона небагато відрізняється й дорівнює $l - y + x$. Твердість колони залежить від складання й тому може змінюватися.

У схему підходу диференціювання включена оцінка твердості, яка залежить від x и y :

$$F(x, y) = P(y + x) - \frac{G(x, y)}{2}(y - x)^2 - W(x), \quad (5.42)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = P - \frac{(y - x)^2 \partial G}{2 \partial x} + G(y - x) - \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (5.43)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = P - \frac{(y - x)^2 \partial G}{2 \partial y} - G(y - x), \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = -\frac{(y - x)^2 \partial^2 G}{2 \partial x^2} + \frac{(y - x) \partial G}{\partial x} + G - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = -\frac{(y - x)^2 \partial^2 G}{2 \partial y^2} - \frac{(y - x) \partial G}{\partial y} - G, \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\frac{(y - x)^2 \partial^2 G}{2 \partial x \partial y} - \frac{(y - x) \partial G}{\partial x} + G. \quad (5.47)$$

У даній роботі отримані залежності й для варіанта пластично деформуємої зони у вигляді криволінійної трапеції.

Розрахунки, проведені по отриманих залежностях, показали, що для пластичної

ділянки у вигляді прямолінійної трапеції із зовнішньою силою руйнування довжина визначається його висотою. Це відповідає принципу Сен Венана.

З отриманих залежностей аналізу розтягування зразків різних довжин випливає, що зі збільшенням половин довжини їх зони до руйнування, рівень деформації мінімізується.

Згідно результатів проведених досліджень локалізація деформацій у верхній частині колони вимагає особливого підходу до вибору методики моделювання процесу й якості металу верхньої частини колони труб. Можна припустити, що ефективним для збільшення строку експлуатації верхньої зони металу колони може бути використання сталей з перлітною структурою матриці й мінімальною часткою феритної складовою, дрібним зерном і чистої по неметалевим включенням.

Докладні розрахунки із цифровим описом процесів деформації колони наведені в роботі [79].

Що стосується підвищення стійкості різьбових з'єднань, то пластичне мастило слід модифікувати домішками детонаційного походження й вони повинні мати різну фракцію порошкових композицій, які забезпечать більш тривале збереження кисню у середовищі тертя.

5.1.2 Аналіз структури вихідного стану труб та її зміни при деформації

Під час тривалої експлуатації НКТ протікають процеси старіння трубних сталей, які супроводжуються деградацією механічних властивостей. Зміна стану металу «в об'ємі» залежить від дії низки експлуатаційних чинників, зокрема, інтенсифікується за тривалого сумісного впливу механічних навантажень і корозійного середовища [282]. Для отримання інформації про розвиток деградації структури було проведено моделювання процесу розтягування металу, який відбувається у трубах НКТ під дією навантаження всієї колони.

Лабораторне моделювання проводили на зразках до й після розтягування з низьковуглецевої листової сталі товщиною 5мм (Сталь 20пс), які відповідали перетину труб. Аналізу піддавали стандартні зразки, деформовані розтяганням на

12,8% (деформацію робили циклічно). Досліджували зразки, вирізані уздовж і поперек деформації в зоні руйнування. Одночасно порівняльно аналізували зразки вихідного металу й, вирізані із зони захвату й поблизу його. Ступінь попередньої деформації обрана 12,8% для вивчення процесу деградації структури металу при розтягуванні [265, 283].

Для встановлення впливу деформації шляхом оцінки зміни рівня коерцитивної сили використовували прилад КРМЦ-К2М фірми «Спеціальні Наукові Розробки» (м. Харків). Мікротвердість визначали при навантаженнях 20 і 50г на приладі ПМТ-3. Мікроструктуру оцінювали при збільшеннях $\times 1000$.

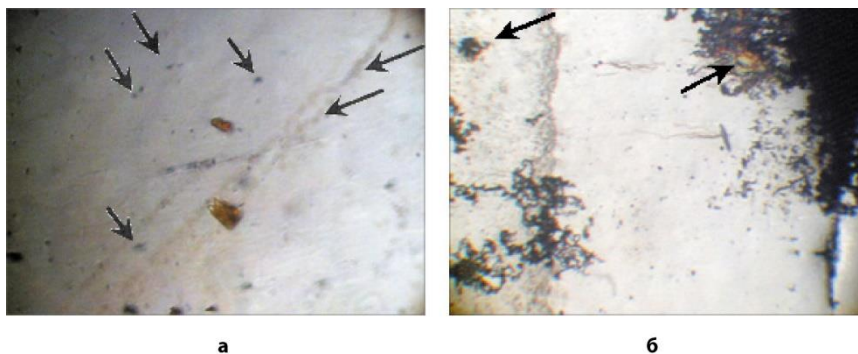
На цьому етапі вивчали якість вихідного металу. Зразкам, вирізаним з металу в стані поставки, характерний рівень коерцитивної сили (H_c) у повздовжньому й поперечному напрямках 3,3 А/см і 3,9 А/см відповідно. Коефіцієнт анізотропії склав $A=0,87$. Після деформації в поперечному напрямку коерцитивна сила склала 9,3А/см. Структура досліджуваної сталі являє собою ферит і перліт.

Вихідні зразки до травлення характеризувалися наявністю значної кількості неметалевих включень. Це окисли заліза (рис. 5.5, а), які не мають огранювання, і дрібні огранені включення. Судячи з їхніх різних відтінків і форми, вони можуть належати карбїдам і карбонитридам ванадію й титану (див. рис. 5.5, б). Крім того, виявлена й велика кількість дрібних і точкових включень темного кольору без огранювання, що характерно для алюмосилікатів (див. рис. 5.5, а). Великі включення окислів заліза при поліруванні шліфа фарбують, залишаючи слід (див. рис. 5.5, а). Наявність такої гами й кількості неметалевих включень у низьковуглецевій сталі звичайної якості свідчать про засміченість шихтових матеріалів домішками (V і Ti), поганим розкисленням металу й порушенням технологічного процесу плавки.

Вихідні зразки металу відрізняються пористістю, наявністю надривів і розшаруваннями. Прокат характеризується хвилястістю поверхні (низька планшетність), тріщиноутворенням (рис. 5.6, а, б). Після травлення шліфів 4%-вим розчином HNO_3 виявлена істотна неоднорідність металу за розподілом основних структурних складових фериту й перліту.

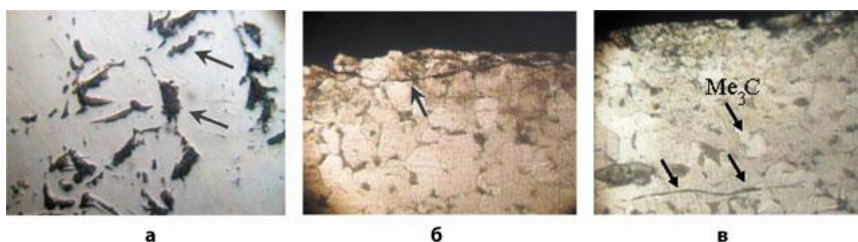
Частка перліту змінюється від 3-5% у полі зору шліфа до 20-30%. У ряді

випадків зерна витягнуті уздовж напрямку прокатки (рис. 5.6, 5.7). В зернах з мінімальною часткою перліту виявлені окремі зерна цементиту, які виділяються як у вигляді окремих включень, так і прошарків по границі феритного зерна, (див. рис. 5.6, б).



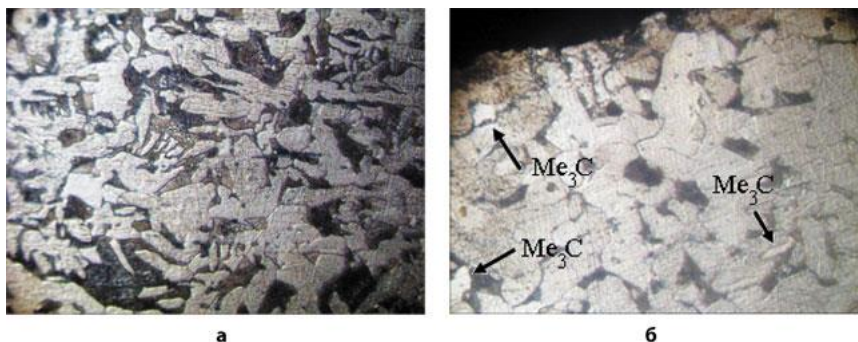
а – сліди деформації від викрашування включень, окисли заліза й алюмосилікати;
б – карбонітриди V і Ti, $\times 1000$

Рисунок 5.5 – Неметалеві включення в Сталі 20пс в стані поставки [79, 242]



а – вихідний; б, в – після травлення 4%-вим розчином HNO_3 , $\times 1000$

Рисунок 5.6 – Пори (а), надриви (б) і розшарування (в) вихідного металу Сталі 20пс в стані поставки [79, 242]



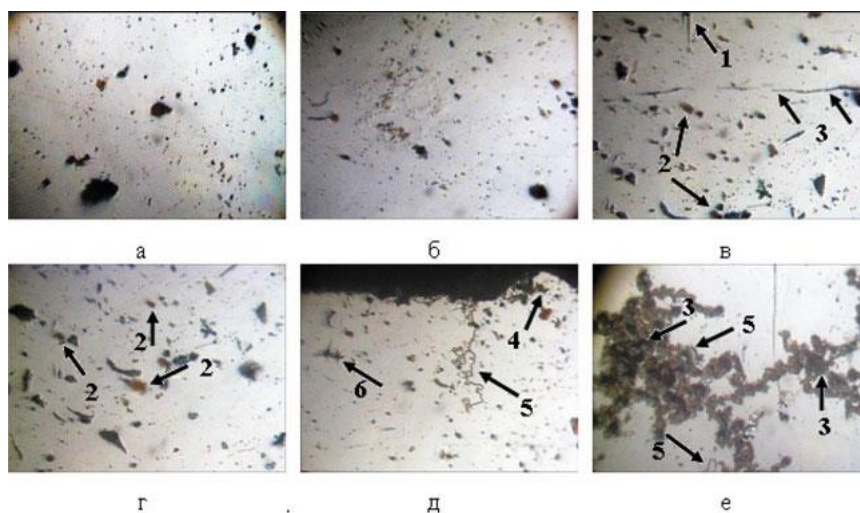
а – до 20-30%; б – 3-5% (утримується карбідна фаза цементитного типу). Травлення 4%-вим розчином HNO_3 , $\times 1000$

Рисунок 5.7 – Деформація зерен металу вздовж напрямку прокатки й неоднорідний

розподіл перліту [79, 242]

Що стосується металу аналізованих шліфів, вирізаних з різних зон (захвату зразка й місць руйнування), то вони по забрудненню не відрізняються від вихідного, що не зазнав деформації.

На нетравлених зразках, у зонах захвату й вирізаних у повздовжньому й поперечному напрямках по місцю розриву, виявлена велика кількість як нагострених, так і більших пор, а також надриви й розшарування (рис. 5.8).



1 – смуга дефектів; 2 – неметалічні включення; 3, 5 – надриви й тріщини;

4 – екструзія; 6 – надриви в місці скупчення неметалевих включень

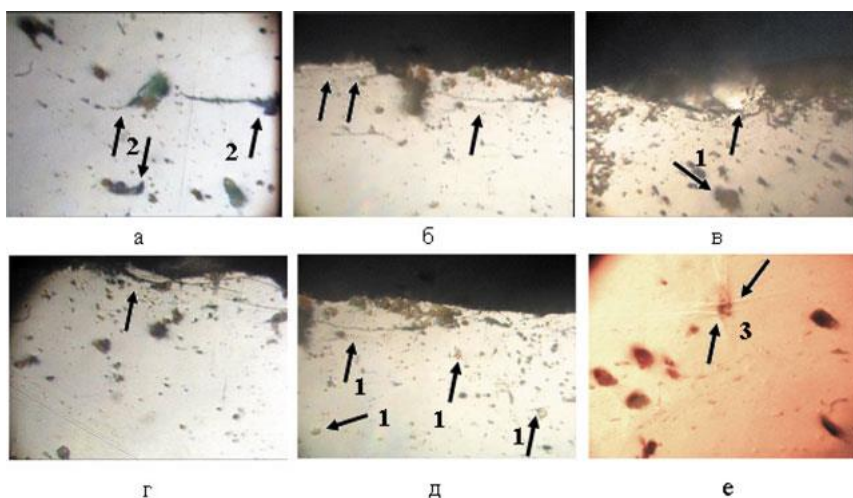
Рисунок 5.8 – Неметалеві включення (а, б, г), надриви (в, д, е) зі смугами дефектів і тріщини (д, е) у вихідному металі Сталі 20пс в стані поставки, $\times 1000$ [79, 242]

Відомо, що наявність напружень від неметалевих включень і пороутворення впливають на рівень коерцитивної сили.

При деформації поверхня зразка по місцю руйнування стає ще більш нерівною (хвилястою), особливо це проявляється на шліфах, вирізаних у повздовжньому напрямку (рис. 5.9, е).

У роботі, виконаній в 2020 р. [277], яка присвячена циклічному навантаженню при розтягуванні зразків для труб Ст 3 і Х-52, було здійснене порівняння руйнуючих і неруйнуючого методів контролю стану труб, а також оцінена анізотропія мінливості структури. При цьому було показано (рис. 5.10), що коерцитиметрія є більш надійним

методом неруйнуючого контролю при розтягуванні базових показників властивостей і структурних змін, чим випробування руйнівними методами, але для цього потрібно створити бракувальну норму, яка буде визначати період передруйнування.



1 – неметалеві включення; 2 – надриви у неметалевих включеннях; 3 – смуги ковзання у неметалевих включеннях)

Рисунок 5.9 – Тріщини, відшарування, надриви й полоси ковзання від неметалевих включень після деформації Сталі 20пс для зразків, вирізаних у поперечному (а-д) і повздовжньому (е) напрямках, $\times 1000$ [79, 242]

У всіх деформованих зразках виявлені тріщини з відшаруваннями у їх поверхні. При цьому зони металу, що відшарувалися, відрізняються найбільш білим кольором, який може відповідати як карбідній фазі, так зонам фериту, насичених вуглецем. Це може значно змінювати рівень коерцитивної сили (див. рис.5.9, а-в). На поперечних шліфах така зона виявляється й під відшаруваннями (див. рис.5.9,б). Більш інтенсивне тріщиноутворення характерне для поперечних зразків (див. рис.5.9, а,б,г,д). Воно має місце, як у його поверхні, так й за перерізом. Незалежно від місця вирізки деформованих зразків виявлені надриви й полоси ковзання від неметалевих включень (див. рис. 5.9,а,е).

На травлених шліфах також виявлена структурна неоднорідність, характерна для вихідного (недеформованого) зразка (рис. 5.11-5.13).

Всі травлені деформовані зразки, вирізані із зони захвату, у повздовжньому й поперечному напрямку, відрізняються трохи більшою щільністю перлітних зерен,

чим вихідний метал. Причому найбільша щільність цієї складової характерна для поперечних зразків (див. рис. 5.13).

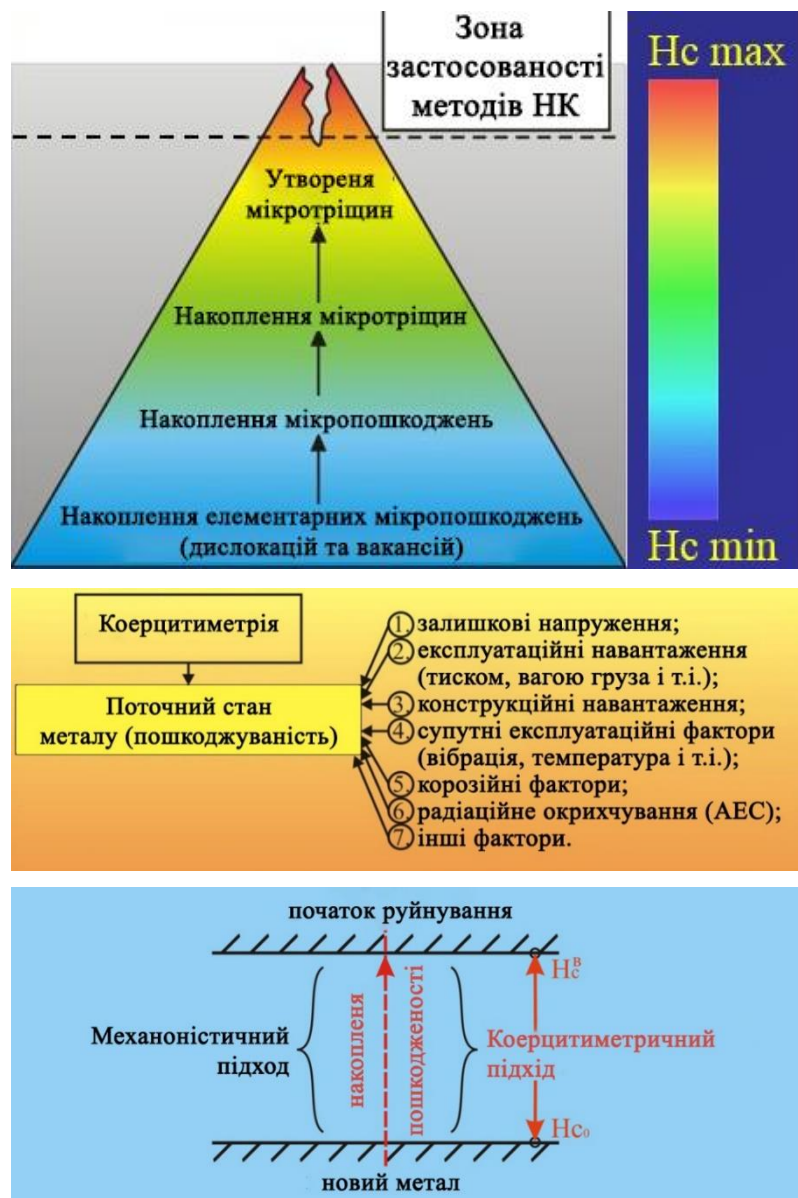


Рисунок 5.10 – Комплексний аналіз і вплив факторів, що визначають стан металу

Ст. 3 [277]

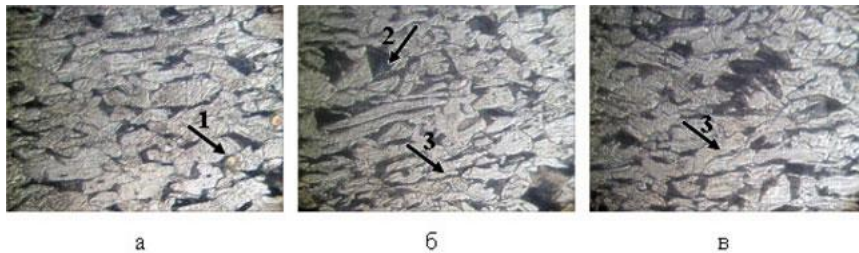


Рисунок 5.11 – Неоднорідна структура вихідного металу Сталі 20пс в стані поставки (зона захвату), що містить 8-10% (а), 18-20% (б) і 20-25% (в) перліту відповідно.

Травлення 4%-вим розчином HNO_3 , $\times 1000$ [76, 222]



Рисунок 5.12 – Неоднорідна структура вихідного металу Сталі 20пс в повздовжньому напрямку після деформації, що містить 5-8% (а), 8-10% (б) і 10-12% (в) перліту відповідно. Травлення 4%-вим розчином HNO_3 , $\times 1000$ [79, 242]



1 – неметалеві включення; 2 – перліт; 3 – смуга дефектів

Рисунок 5.13 – Неоднорідна структура металу Сталі 20пс в поперечному напрямку після деформації, що містить 8-10% (а), 12-14% (б) і 15-17% (в) перліту відповідно. Травлення 4%-вим розчином HNO_3 , $\times 1000$ [79, 242]

У всіх деформованих зразках виявляється текстура фериту у вигляді темних точок, які в ряді випадків вибудовуються в паралельно розташовані смуги. При цьому, інтенсивніше проявляються границі феритних зерен. Така структура також є неоднорідною (див. рис. 5.13, а, б, в).

Порівняльний статистичний аналіз оцінки мікротвердості при навантаженні 20 г виявив значний розкид значень:

- вихідний зразок Н-20-89÷108 (середнє значення Н-20-95),
- повздовжній, деформований у зоні руйнування Н-20-89÷125 (середнє значення Н-20-112),
- зразок поперечний, деформований в зоні руйнування Н-20-94÷135 (середнє значення Н-20-117).

Виявлено, що при наявності великої частки фрагментованої структури фериту середня мікротвердість при деформації на повздовжніх зразках підвищується на 7%,

а на поперечних – до 10%. При цьому відхилення в зміні мікротвердості у вихідному зразку не перевищують 7,5%, а в деформаційних, незалежно від напрямку їх вирізки, зростають до 16,3-16,4%.

Оцінка анізотропії фериту (відношення мікротвердості фериту поперечного до повздовжнього зразка) $A=117/112=1,04$.

Узагальнюючи результати досліджень, слід зазначити.

При деформуванні Сталі 20пс має місце фрагментація зерен фериту й вони стають сірого кольору. Можна припустити, що в процесі деформації (в зоні близької до руйнування) відбувається найбільш інтенсивне подрібнення перліту й збільшення рухливості атомів вуглецю. Це вимагає подальших досліджень з використанням сучасних та нових методик структурного аналізу.

Отримані результати досліджень свідчать про те, що при деформації розтягуванням Сталі 20пс локалізуються залишкові напруження II роду, що підтверджується збільшенням коерцитивної сили й магнітної анізотропії. Має місце анізотропія фериту (виявлена за допомогою статистичного аналізу мікротвердості). Металографічний аналіз виявив найбільші структурні зміни на поверхні зразка після деформації. Ця наявність напружень від неметалевих включень; порооутворення; неоднорідність структури; поява ізольованих включень цементиту.

Дані фактори в сукупності визначають часткову зміну рівня H_c зразка після деформації. Однак, вони повністю не пояснюють значне підвищення цієї характеристики (в 3 рази). Тому для одержання повної картини впливу деформації на такі зміни показань коерцитивної сили провели більш глибокі дослідження із застосуванням мікрорентгеноспектрального аналізу й оптико-математичного опису структурних змін. Також необхідно враховувати і якість вихідного металу. Очевидно, що тільки зміною дислокаційної структури при деформації такої різниці бути не може.

Для встановлення впливу холодної пластичної деформації (розтягуванням) на значну зміну рівня коерцитивної сили використовували мікрорентгеноспектральний аналіз і оптико-математичний опис структурних змін, для яких використовували ті ж зразки, що й для оптичного металографічного аналізу.

Дослідження проводили за раніше розробленим методичним підходом оптико-математичного аналізу структури фаз, заснованої на гідродинамічних аналогіях, із застосуванням рівнянь Нав'є-Стокса, що відбуваються при формуванні (дифузійний процес і зміна щільності аналізованих фрагментів, описуваних відповідно абсолютними величинами кінцево-різницевого показників лапласіанов і дивергенції), докладно викладеної в роботах [229, 230, 284, 285]. В результаті оцінки будували гістограми по одинадцяти групам умовних кольорів (в %) компонентів, що відрізняються вмістом. Ферит описується темним кольором, а насичений вуглецем з різними відтінками темно-сірого, карбіди – відтінками білого. При цьому насиченість вуглецем досліджуваної зони збільшується від меншого до більшого номера кольору: умовні кольори 0, 7, 8, 73, 82, 91 віднесено до фериту; 164, 246, 247 і 255 – до карбідної фази [285].

Мікрорентгеноспектральний аналіз структурних складових проводили на електронному мікроскопі-мікроаналізаторі JEOL JSM-6390LV при збільшеннях 500-10000 крат і в растровому електронному мікроскопі JSM-820 Link «JEOL» із системою рентгенівського мікроаналізу Linkan10/85S «Link analytical».

Електронномікроскопічно досліджена структура перліту й фериту (рис. 5.14). Встановлено зменшення частки перлітної складової й руйнування в ній цементитних пластин у деформованому зразку (див. рис. 5.14, б) – в деяких зонах границя зерен перліту стає розмитою, хоча рельєф її пластин зберігається (див. рис. 5.14, в, г).

Для досліджуваних фотографій отримані розподіли основних параметрів [92], що характеризують розподіл структурних складових (табл. 5.1).

Отримані результати показують (див. табл. 5.1), що частка цементитної складової (колір 255) після деформації знижується в 2 рази (з 1,61% до 0,78) на знімках загального плану ($\times 2000$). Разом з тим, відбувається перерозподіл вуглецю в зону феритних фаз: в 2-3 рази збільшується кількість зон з підвищеним вмістом вуглецю (кольори 82 і 91). В 4 рази зростає кількість структур, описуваних кольором 155, який, швидше за все, є проміжною фазою (перехідна фаза між сильно науглецьованим, в результаті деформації, феритом і цементитом - нестехіометричного складу типу FeC). Одночасно частка карбідної фази

зі зниженим вмістом вуглецю зростає (кольори 164 і 246). При аналізі зразків при збільшенні 5000 і 10000 раз (локальні зони) співвідношення фаз практично не змінюється (див. табл.5.1, рис. 5.14,в,г).

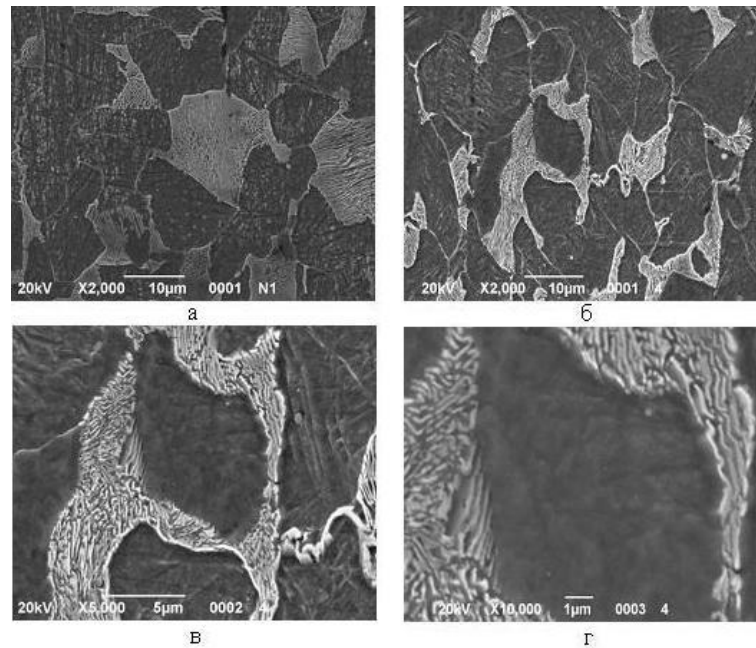


Рисунок 5.14 – Мікроструктура Сталі 20пс у вихідному стані (а), після деформації: загальний вид (б), локальні зони (в, г)

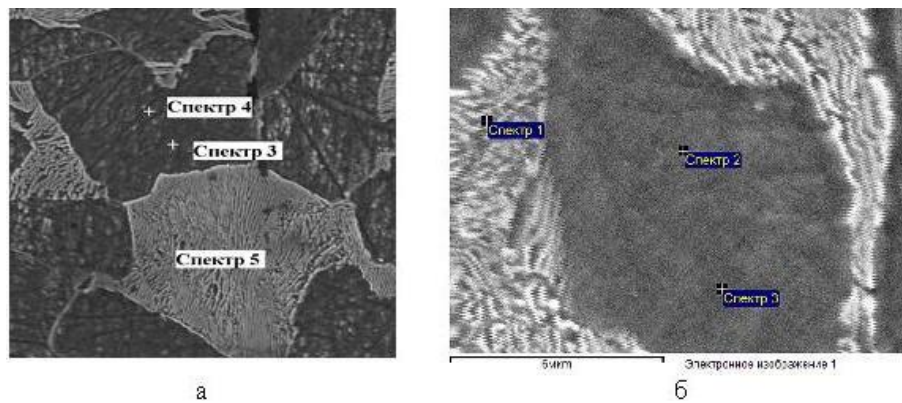
Таблиця 5.1 – Інтервали розподілу основних кольорів (відтінків) фаз, % у Сталі 20пс

0	7	8	73	82	91	155	164	246	247	255	Фото
00,00	00,00	00,00	63,66	20,02	14,30	00,41	00,00	00,00	00,00	01,61	5.9 а
00,00	00,00	00,00	02,35	44,13	46,23	04,81	01,52	00,18	00,00	00,78	5.9 б
00,11	05,54	00,98	00,01	14,74	44,43	15,22	11,37	00,72	05,99	00,89	5.9 в
00,11	05,29	00,66	00,00	19,91	41,26	10,76	13,70	00,24	07,48	00,59	5.9 г

Для детального вивчення розподілу вуглецю в зонах перліту й фериту (рис. 5.15) провели мікрорентгеноспектральний аналіз.

У вихідному зразку відзначається підвищений вміст вуглецю в зоні перліту в порівнянні з феритом. Також ідентифікується кремній (до 0,21% у перліті при загальному його вмісті 0,15%).

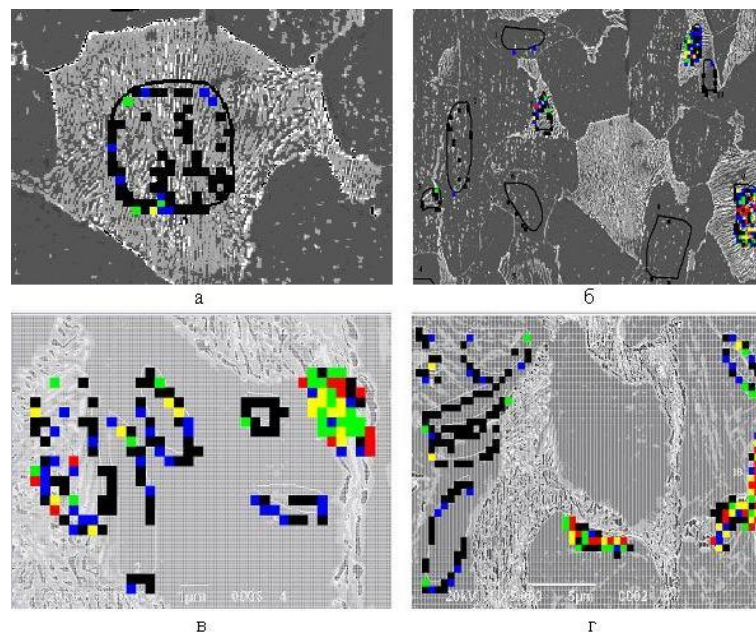
В зразку після деформації зростає вміст вуглецю в зоні фериту в порівнянні з перлітом (~ в 1,1 раз). В зоні перліту відзначається зниження концентрації марганцю в 1,6 раз (з 0,42% до 0,27% при загальному вмісті 0,63%).



а – вихідний зразок, $\times 2000$; б – після деформації, $\times 6000$

Рисунок 5.15 – Зони мікрорентгеноспектрального аналізу структур Сталі 20пс

Відповідно до отриманих даних структурних змін і мікрорентгеноспектрального аналізу побудовані гістограми розподілу зон з підвищеним вмістом вуглецю (рис. 5.16). Залежно від вмісту цих структур (%) на фрагменті зображення 10×10 пікселів, де виявили колір, згідно табл. 5.2.



а, б – вихідний зразок; в, г – після деформації

Рисунок 5.16 – Розподіл структурних складових з підвищеним вмістом вуглецю. На знімках електронних мікроструктур виділені аналізовані зони

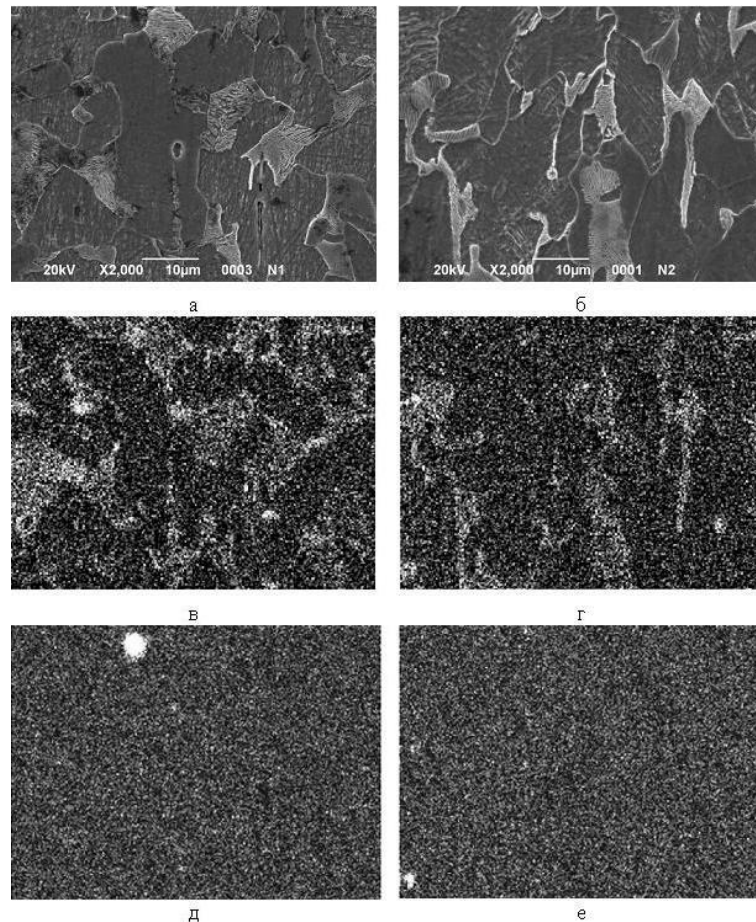
Встановлено, що кількість структур з підвищеним вмістом вуглецю після деформації зростає в зоні фериту, у порівнянні з недеформованим зразком, і в ньому

виділяються окремі зони з фазами близькими до карбіду (FeC , Fe_xC_y), але з дефіцитом по вуглецю. Механізм розпаду цементиту перліту під дією деформації в досліджуваній сталі пов'язаний із подрібненням його пластинок.

Таблиця 5.2 – Колір зображення залежно від вмісту структурних складових з підвищеним вмістом вуглецю (x, %)

x, %	x=0	$0 < x \leq 5$	$5 < x \leq 10$	$10 < x \leq 15$	$15 < x \leq 20$	x>20
Колір	-	чорний	синій	зелений	жовтий	червоний

Дослідження картини розподілу вуглецю в структурі Сталь 20пс також однозначно підтверджує перерозподіл його частки в результаті деформації (рис. 5.17,в,г).



а, в, д – вихідний зразок; б, г, е – після деформації;

рентгеноемісійний мікроаналіз: в, г – розподіл вуглецю; д, е – кремнію

Рисунок 5.17 - Мікроструктура й термоелектронна емісія розподілу компонентів у Сталі 20пс

При розпаді цементиту відбувається вивільнення атомів вуглецю, які затримуються на стінках дислокацій у границь зерен, де їх щільність підвищена [286], а також можуть утворювати фулерени та їх комплекси із залізом [243]. В результаті формується пересичена фаза, яка є проміжною (перехідною) між феритом і цементитом та за концентрацією вуглецю близька до аустеніту (колір 155 [229]). Внаслідок цього спостерігається підвищення концентрація вуглецю у фериті, і, навіть, у деяких випадках відзначається перевищення його в порівнянні з перлітними зернами. Причому, цей ефект спостерігається також і у вихідному зразку. Отже, при вивченні впливу холодної пластичної деформації на структуру маловуглецевої сталі, необхідно обов'язково враховувати якість вихідного матеріалу, частку перлітної складової та її стан.

При оптичному дослідженні [237] деформованого зразка виявлена наявність дефектів, таких як пори, тріщини, включення в металі. Проведено мікрорентгеноспектральне дослідження цих дефектів (рис. 5.18).

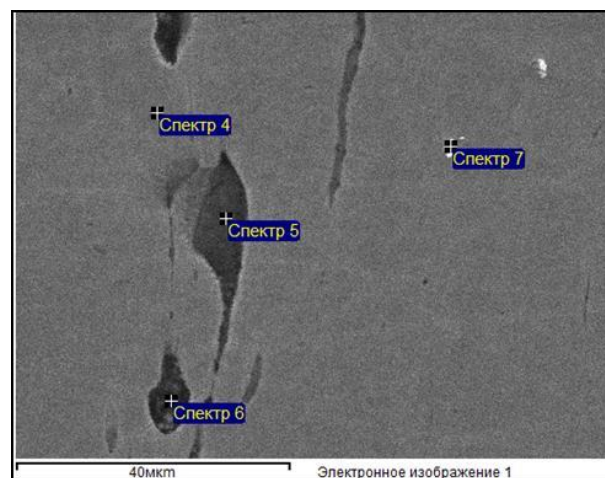


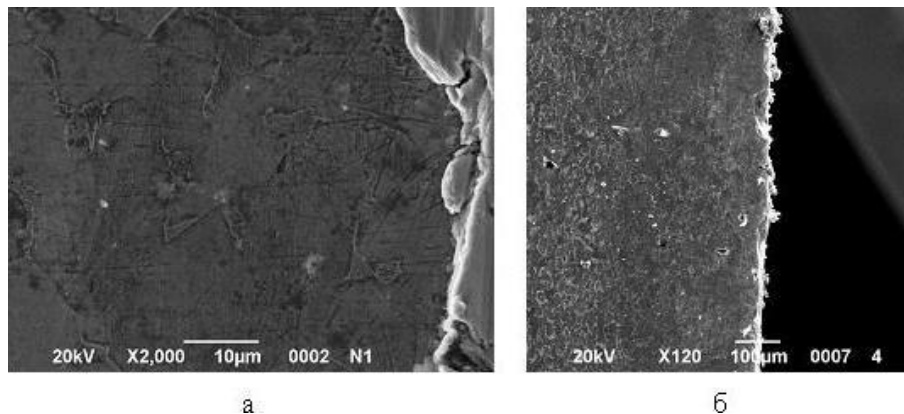
Рисунок 5.18 – Дефекти в структурі металу

Встановлено, що в таких дефектах (спектри 5 і 6, див. рис. 5.18) утримується до 17,32%С и 35,52% О. При цьому в спектрі 5 виявлено 41,66% Fe; 0,93% Si; 1,16% Ca; 1,71% Cr; 1,01% Mn. У спектрі 6 вміст заліза значно нижче – 29,37% і підвищена частка хрому – до 18,17%. Також спостерігається незначна кількість Al (0,27%); Si (0,38%); Ca (0,17%). В обох спектрах присутній підвищений вміст сірки (0,91 і 0,62%). Очевидно, це продукти оксидів, а також елементи, що потрапили в порожнечі, які слід

віднести до випадкових домішок, внесених в результаті розкислення металу при виробництві, а також підготовці зразків для металографічних досліджень.

Спектри 4 і 7 зняті в областях включень. Вони містять, крім вуглецю, заліза й кисню високий зміст хрому (24,79%, спектр 4) і ніобію (9,63%, спектр 7). Швидше за все, ці елементи потрапили із шихтою при виплавці сталі.

При електронікроскопічному аналізі виявлені зони екструзії на поверхні (рис. 5.19), сформовані в результаті пластичної деформації, як у вихідному стані (при прокатці), так і в деформованому зразку.

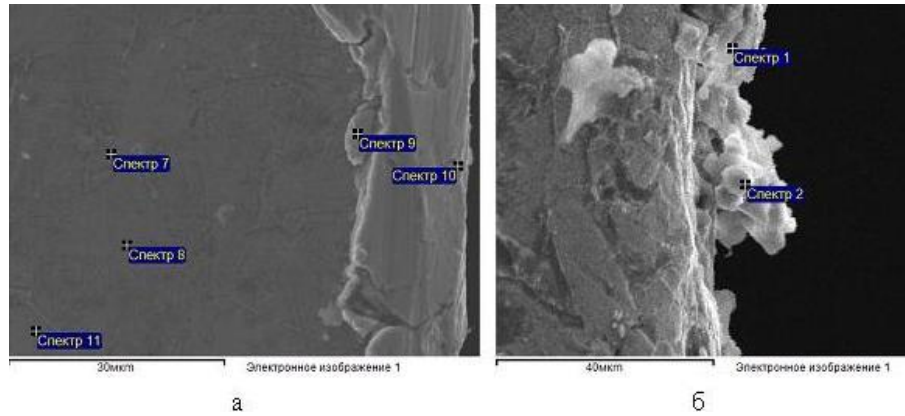


а - вихідний; б - після деформації

Рисунок 5.19 – Структура металу на поверхні зразка

Детально досліджена структура на поверхні таких зон і, що прилягають до них, методом мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 5.20). Встановлено дві відмінні зони в зоні екструзії: перша (спектр 10, рис. 5.20,а й спектр 1, рис. 5.20,б) – з підвищеною концентрацією С (36,44 і 38,13%), О (12,58 і 26,16%) з одночасно зниженою часткою Fe (49,38 і 25,14%) відповідно. Крім того, у цій зоні виявлена й невелика кількість Na (1,06 і 0,92%), Si (0,22 і 2,75%), у спектрі 10: Mn (0,32%), у спектрі 1: Zn (2,11%), Al (0,6%), Cl і Ca (1,02% кожного), Cr (0,59%), K (0,93%) і S (0,55%). Спостережуване (див. рис. 5.19, а й б), пояснюється дифузією елементів у результаті пластичної деформації, а також видавлюванням твердих неметалевих включень до краю зразка (зокрема, збільшення кремнію в зоні екструзії після деформації ~ в 3 рази й значне зниження його концентрації в перліті). Друга зона (спектр 2, див. рис. 5.20, б) належить окислам кремнію – SiO₂ (круглі мікровключення,

розміром 4-6мкм, які не деформуються в процесі прокатки (див. рис. 5.17, д) і видавлюються на поверхню за умови їх розташування поблизу її при розтягуванні). Вони містять 57,41% О з мінімальною часткою заліза (1,27%). Електронномікроскопічна картина виявила, що такі зерна облямовані прошарками феритної складовій.



а – вихідний; б – після деформації

Рисунок 5.20 – Мікроструктура на поверхні зразків

В вихідному зразку (після прокатки) досліджені приповерхні зони (спектри 7,8,9,11, див. рис. 5.16, а). Вміст вуглецю в цих зонах становить 16,25-20,49%, заліза 79,09-83,17%, марганцю 0,42-0,58%. Очевидно, що в них є частка цементиту, що утворювався в поверхні зразка в результаті деформації вже в процесі гарячої прокатки листа.

Отримані дані мікрорентгеноспектрального аналізу дають лише результати аналізу зони до 3 мкм, а зона екструзії досягає 160 мкм, тому вибіркові показники не дозволяють оцінити її повністю мікрорентгеноспектральним методом. Крім того, незрозуміло, які фази формуються в зоні екструзії і як вони розташовуються, скільки виділяється. Для їх оцінки виконали оптико-математичний опис сформованих структур у поверхневій зоні деформованого зразка. В результаті були побудовані гістограми розподілу основних параметрів [230], з використанням методики, що описує розподіл структурних складових (див. табл. 5.3) і зон з підвищеним вмістом вуглецю (рис. 5.21,а).

Таблиця 5.3 – Розподілу умовних кольорів, % у зоні екструзії

0	8	9	73	82	92	155	164	246	247	255	Виділена зона
00,0	42,6	13,0	00,4	02,4	01,8	02,0	03,9	09,4	10,2	14,1	1
00,1	15,5	01,0	00,9	05,9	08,4	13,7	28,1	00,2	21,4	04,9	2
02,3	26,9	06,9	03,4	05,5	03,6	05,4	15,3	05,5	19,9	05,5	3
02,2	16,3	11,4	02,6	03,2	02,4	03,4	19,5	18,9	10,6	09,4	4
00,0	30,8	14,1	00,0	01,3	00,2	00,0	21,9	10,4	21,0	00,2	5
00,0	15,9	04,4	00,6	10,5	12,3	10,0	18,1	03,9	11,6	12,7	6
00,6	20,7	07,6	00,3	01,6	03,0	03,7	15,3	11,9	13,6	21,7	7

Розрахунками показано, що перша зона екструзії (рис. 5.21, зона 2) складається з 31,8% фериту (максимальна частка належить кольорам 8 – 15,5% і 92 – 8,4%); 54,6% цементиту й 13,7% карбідної фази з пониженим вмістом вуглецю (колір 155). Друга зона екструзії (див. рис. 5.17, зона 5) характеризується деяким зниженням частки карбідних фаз (сумарно 53,5%), причому вміст вуглецю в них знижується, а також вона характеризується збільшенням до 46,4% фериту (його максимальна частка відповідає кольорам 8 – 30,8% і 9 – 14,1%). Математичний і рентгеноспектральний аналізи в цій зоні показують істотну розбіжність по вмісту феритної складової (46,4 і 1,27% відповідно). Ця відмінність може бути пояснене зміною кристалічних ґрат заліза при великому насиченні її вуглецем в результаті значних деформацій, при яких має місце мимовільне перетворення металу в порошок [44]. Відсутня фаза кольору 155. Виявлені структурно вільні карбіди в зонах, що зіставляються, екструзії відрізняються широкою гамою кольорів від 164 до 255, тобто окремі включення характеризуються різним вмістом вуглецю. При цьому мінімальна частка карбідних фаз належить кольору 246 для першої зони екструзії й 255 – для другої (по 0,2%). При цьому максимальний розподіл між кольорами: до 28,1% у першому випадку (колір 164) і до 21,9% і 21,0 (кольору 164 і 247) – у другому.

Додатково досліджені зони в границі з поверхневим шаром (див. рис. 5.21). У цій зоні при деформації різко скорочується частка перліту, з'являються окремі

включення цементиту. В зонах 1 і 7 формуються структури фериту з підвищеною концентрацією вуглецю, що містять в зоні 1 – 60,2% (максимальний колір 8 – 42,6%) і в зоні 7 – 33,6% (максимальний колір 8 – 20,7%), а також, 37,6% (максимальний колір 255 – 14,1%) і 62,5% (максимальний колір 255 – 21,7%) цементиту відповідно; 2-3,7% перехідної фази (колір 155). Зона 6 близька за складом до 2, 3 і 4 і вони відносяться до карбідних включень, що різняться вмістом вуглецю (див. рис. 5.21).

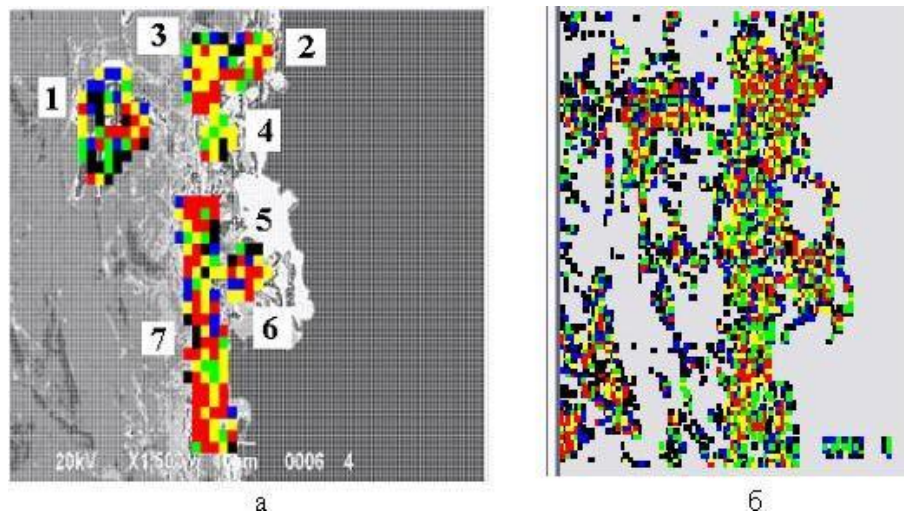


Рисунок 5.21 – Розподіл структурних складових з підвищеним вмістом вуглецю (кольори відповідно до табл. 5.3) у зоні екструзії (а) і поблизу поверхні (б) після циклічної деформації розтягуванням

Поблизу поверхні зразка (див. рис. 5.21, б) структура квазігомогенна (перліт відсутній) із точечними виділеннями карбідів (7,0%) і такою ж кількістю фериту, максимально насиченого вуглецем (колір 155). Основна частка фериту становить 86%. Однак такий ферит також відрізняється за гистограмою кольорів, тобто має різну частку вуглецю. Так, 23,5% – це ферит кольору 0; 0,7% – кольору 9; 0,2% – кольору 8; 4,8% – кольору 73; 41,3% – кольору 82 і 15,5% – кольору 92. Чим більше номер кольору фериту, тим більше в ньому вуглецю.

Виконані дослідження показали, що вже в процесі прокатки відзначаються процеси екструзії на поверхні металу, який змінює вміст компонентів і структури, а в процесі деформації такі зміни відбуваються ще більш інтенсивно, що сприяє виникненню дефектів труб верхньої частини колони, де локалізація деформацій локальна.

Щодо пошкоджуваності різьбових з'єднань, то крім впливу локальних напружень важливим є вплив корозійного середовища. Для стабілізації роботи з'єднань і зменшення впливу цього фактору на пошкоджуваність різьбових з'єднань доцільним буде додаткове модифікування пластичного мастила.

5.2 Математичне моделювання структуроутворення при наплавленні відновлювальних покриттів з використанням модифікуючої домішки бентонітової глини

Для проведення моделювання структуроутворення використовували оптико-математичний аналіз зміни структури при введенні модифікуючої домішки бентонітової глини у відновлююче покриття при наплавленні на тонкостінну культиваторну лапу сільськогосподарської техніки. Дослідження базувалися на порівняльному аналізі вихідного варіанта наплавлення та з введенням модифікуючої домішки.

Оптико-математичний аналіз структуроутворення при зміцнюючому наплавленні з використанням вторинної сировини з алмазною фракцією від детонації боєприпасів певного набору патронів бойових і освітлювальних докладно розглянуте в раніше опублікованих роботах [188, 232] і захищено патентами України [179, 233], які показали наявність стабільної фази, сформованої у вигляді нано- і дисперсних включень. Перевага використання такого модифікатора полягає в подрібненні структури (особливо включень карбідної фази) внаслідок створення додаткових центрів кристалізації й зниження температури рідкої ванни на $\sim 300^{\circ}\text{C}$ за рахунок того, що такі включення є мікрохолодильниками, тому що вони розчиняються при 4000°C , а температура плавлення електрода не вище 1600°C . Широке використання такої шихти може бути обмежене відсутністю сировини для її одержання.

В останні 2-3 року в ряді країн пройшли конгреси щодо обговорення значних матеріальних витрат на виготовлення модифікуючих домішок і провідні спеціалісти закликали вчених до пошуку нових джерел використання природних ресурсів. Враховуючи це, а також ознайомившись з останніми досягненнями науки й техніки у

світовій практиці, було виявлено патент США [287], який висвітлював використання бентонітової глини для введення модифікуючої домішки, яка знижує зношування, у мастило при експлуатації пар тертя в сполученні.

В ході саміту GMIS 2019 була висловлена думка присутніх про стратегічну можливість розвитку природних технологій як нових напрямів розвитку науки й техніки [273]. Одна з таких природних технологій може бути використана й у сільськогосподарському машинобудуванні при експлуатації робочих органів машин. Наприклад, в процесі експлуатації культиваторні лапи, працюючи із ґрунтом, який включає деяку кількість піску й глини, взаємодіє з ними й інтенсивно зношує робочий орган. Враховуючи це, може виявитися ефективним і нанесення відновлюючого покриття на зношені культиваторні лапи, для яких як модифікуюча домішка буде використана природна глина.

За критерієм Колмогорова порівнювали гістограми кольорів фотографій. Аналізували 15 варіантів розрахунків [288]. Виявлені несхожі знімки (наприклад, поверхня й середина, див. розділ 4 рис. 4.9 і рис. 4.14), але із практично близькими гістограмами. Відмінними гістограмами вважали ті, у яких третє число в списку менше 0,5, а за критерієм Колмогорова воно 0,28. Фотографії мікроскопа дозволяють у цьому випадку визначити тільки 16 кольорів, хоча їх 256 (розбивали на 15 інтервалів). Розглянемо відмінність таблиці по змінах мікроструктури (табл. 5.4), яка відбиває їх на всіх фотографіях.

Для нанесення покриттів був обраний низьковуглецевий електрод (табл. 5.5), щоб можна було простежити за впливом легуючих компонентів покриття й дифузії компонентів з підложки.

Виконано розрахунки частки фаз, % (див. Додаток Д, табл. Д.1). Розрахунки зроблено для фрагментів 3×3 пікселі.

Як показав аналіз таблиць, у різних ділянках частка феритної складовій без модифікатора змінюється від 82,6 до 56,6% (середнє 73,5%), бейніту 9,4-4,9% (середнє 6,0%), карбідної 0,7-1,6% (середнє 1,3%). Кількість комбінації фаз характерно як для парних, так і потрійних взаємодій. При комбінації ферит-бейніту воно змінюється від 4,0 до 18,0% (середнє 9,6%), бейніт карбіди 0,4-1,1% (середнє

1,0%), ферит-бейніт-карбіди 2,7-17,7% (середнє 8,2%). Отримані дані свідчать про те, що якість металу покриття без додаткового модифікування відрізняється істотною неоднорідністю.

Таблиця 5.4 – Оцифровані фотографії структур з оцінкою зон аналізу
(оцінювали як 3 з 5 балів)

Фотографії структур, які порівнювали (див. рис. 4.9 і рис. 4.14)		Значення за критерієм Колмогорова	Коментар
1 (рис. 4.9, а)	2 (рис. 4.9, б)	0,939	Поверхня 1 і середина 1 схожі
1 (рис. 4.9, а)	3 (рис. 4.9, в)	0,157	Поверхня 1 і проміжний шар 1 несхожі
1 (рис. 4.9, а)	4 (рис. 4.14, а)	0,447	Поверхня 1 і поверхня 2 несхожі
1 (рис. 4.9, а)	5 (рис. 4.14, б)	0,986	Поверхня 1 і середина 2 схожі
1 (рис. 4.9, а)	6 (рис. 4.14, в)	0,011	Поверхня 1 і проміжний шар 2 схожі
2 (рис. 4.9, б)	3 (рис. 4.9, в)	0,823	Середина 1 і проміжний шар 1 несхожі
2 (рис. 4.9, б)	4 (рис. 4.14, а)	0,923	Середина 1 і поверхня 2 схожі
2 (рис. 4.9, б)	5 (рис. 4.14, б)	1,0	Середина 1 і середина 2 схожі
2 (рис. 4.9, б)	6 (рис. 4.14, в)	0,175	Середина 1 і проміжний шар 2 несхожі
3 (рис. 4.9, в)	4(рис. 4.14, а)	0,475	Проміжний шар 1 і поверхня 2 несхожі
3 (рис. 4.9, в)	5 (рис. 4.14, б)	0,434	Проміжний шар 1 і середина 2 несхожі
3 (рис. 4.9, в)	6 (рис. 4.14, в)	0,805	Проміжний шар 1 і проміжний шар 2 схожі
4 (рис. 4.14, а)	5 (рис. 4.14, б)	0,984	Поверхня 2 і середина 2 схожі
4 (рис. 4.14, а)	6 (рис. 4.14, в)	0,144	Поверхня 2 і проміжний шар 2 несхожі
5 (рис. 4.14, б)	6(рис. 4.14, в)	0,052	Середина 2 і проміжний шар 2 несхожі

При модифікуванні покриття бентонітовою глиною картина співвідношення й частка фаз змінюється.

Кількість фериту збільшується до перехідного шару, і його частка змінюється від 62,7 до 89,4% (середнє 75,7%), бейніту 6,4-2,7% (середнє 4,7%), карбідів 6,9-0,9%

- середнє 3,7%.

Таблиця 5.5 – Розподіл фаз у покриттях, що зіставляються, %

Покриття	Аналізовані фази та їх з'єднання					
	Ф	Б	К	Ф+Б	Б+К	Ф+Б+К
Без модифікатора	82,6*)- 56,6	9,4-4,9	0,7-1,6	4,0-18,0	0,4-1,1	2,7-17,7
Середні значення	73,5	6,0	1,3	9,6	1,0	8,2
З додаванням бентонітової глини	62,7-89,4	6,4-2,7	6,9-0,9	8,5-4,3	4,1-0,5	11,2-2,0
Середні значення	75,7	4,7	3,7	6,6	2,4	6,5

Примітка: *) перші цифри в межах значень відображають верх покриття, а другі – перехідну зону.

Взаємодія фаз при введенні бентонітової глини відповідає: ферит-бейніт 8,5-4,3% (середнє 6,6%), бейніт-карбіди 4,1-0,5% (середнє 2,4%), ферит-бейніт-карбіди 11,2-2,0% (середнє 6,5%).

Виходячи із порівняльного аналізу (табл. 5.5), середні показники нанесення покриття без модифікуючої домішки і з її введенням (бентонітової глини) характеризуються тим, що розглянутий новий технологічний процес не змінює частки й розподілу феритної складової, однак на 21,6% знижується бейнітна частка, а з'єднання ферит-бейніт-карбіди, в середньому, нижче на 20%. Одночасно підвищується середня частка карбідної складової в модифікованому покритті на 84%, а ферито-бейнітної знижується на 31%. Крім того, виявлена цікава залежність, що характеризує взаємодію фаз ферит-бейніт-карбіди в перехідній зоні, і підвищена кількість групи фаз, яка досягає 17,7% у вихідному металі з покриттям, що в 8,8 раз більше, ніж при модифікуванні. В цій зоні без модифікування збільшується й частка чистої карбідної фази – до 2,2 раз, що сприяє тріщиноутворенню в тонкостінному виробі при наплавленні культиваторної лапи товщиною 5-6мм. Спостережувана зміна структурного стану може бути також пов'язана й зі збільшеними локальними напруженнями в покритті без введення модифікуючої домішки і більш високою

температурою рідкої ванни, а також інтенсифікацією дифузії з підложки, що й підтверджують дослідження в розділі 4.

На підставі розрахунків комбінації кольорів взаємодії фаз структури (для випадків більше 1%) отримані характерні зображення. Таких комбінацій отримано 32 для кожної зони покриття. Аналогічна комбінація кольорів виконана для кожного варіанта оцифрування покриття (верх, середина, перехідна зона), знімки мікроструктур яких приведені в розділі 4.

На рис. 5.22,а-5.23а й у Додатку Д наведені структури комбінацій з 1 по 19. Інші на рис. 5.22,б-5.23,б. Головним чином це феритні комбінації (01-09) і тільки п'ять включають бейніт (10), три карбидні FeC (11) й інші також не стехіометричного складу Fe_xC_y (12, 13). Нумерація зображень зліва направо, зверху вниз. В самому верхньому лівому куті наведене вихідне зображення структури, яке піддавали обробці оптико-математичним методом.

Представлені зображення повною мірою відображають металографічну картину розподілу теоретично оцінених фаз та їх комбінацій, які підтверджують мінливість структуроутворення.

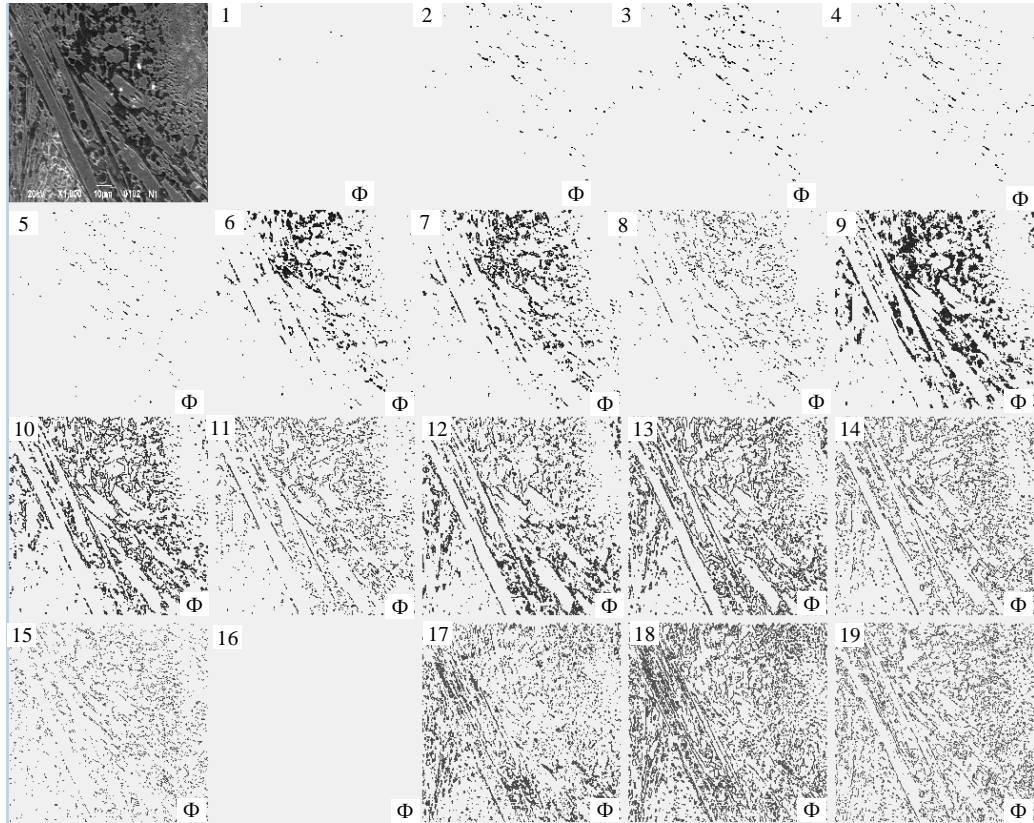
На рис. 5.22 і 5.23 наведені вибірково лише порівняльні дані середньої зони нанесених покриттів.

Аналізом мікроструктури показано, що існують помітні відмінності не тільки в долі фаз, але й між розподілом порівнювальних варіантів нанесених покриттів. Це характерно для всіх зон покриттів без модифікуючої домішки. В цьому варіанті границя сплавлення більш груба, стовщена з карбідними витягнутими пластинчастими включеннями вздовж відводу тепла в основний метал відновлюваної деталі.

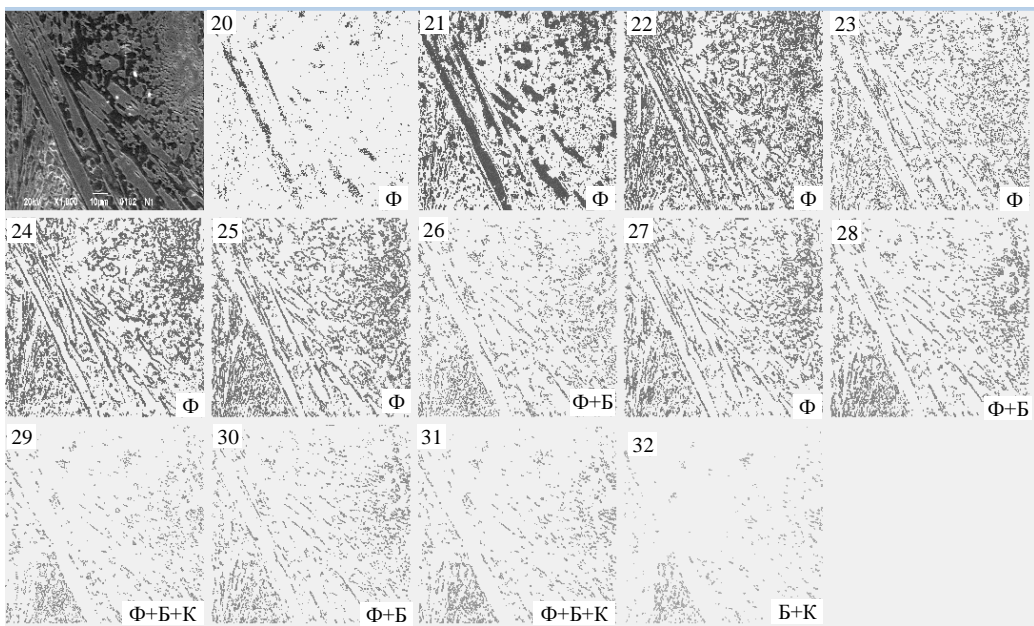
При модифікуванні структура покриття більш однорідна й вона характеризується безліччю точечних включень карбідів, виділених як по границях окремих роздроблених пластинчастих виділень, так і між ними.

Виходячи з отриманих результатів, слід оцінити вплив й інших типів глини різних родовищ, які можуть відрізнятися хімічним складом, зернистістю, ступенем вологості, наявністю шкідливих домішок і мікродомішками. Такі дослідження будуть

достатніми при аналізі складу глини, мінливості структури, можливості використання для тонкостінних виробів при зміцненні культиваторних лап при виробництві та їх відновленні при експлуатації.

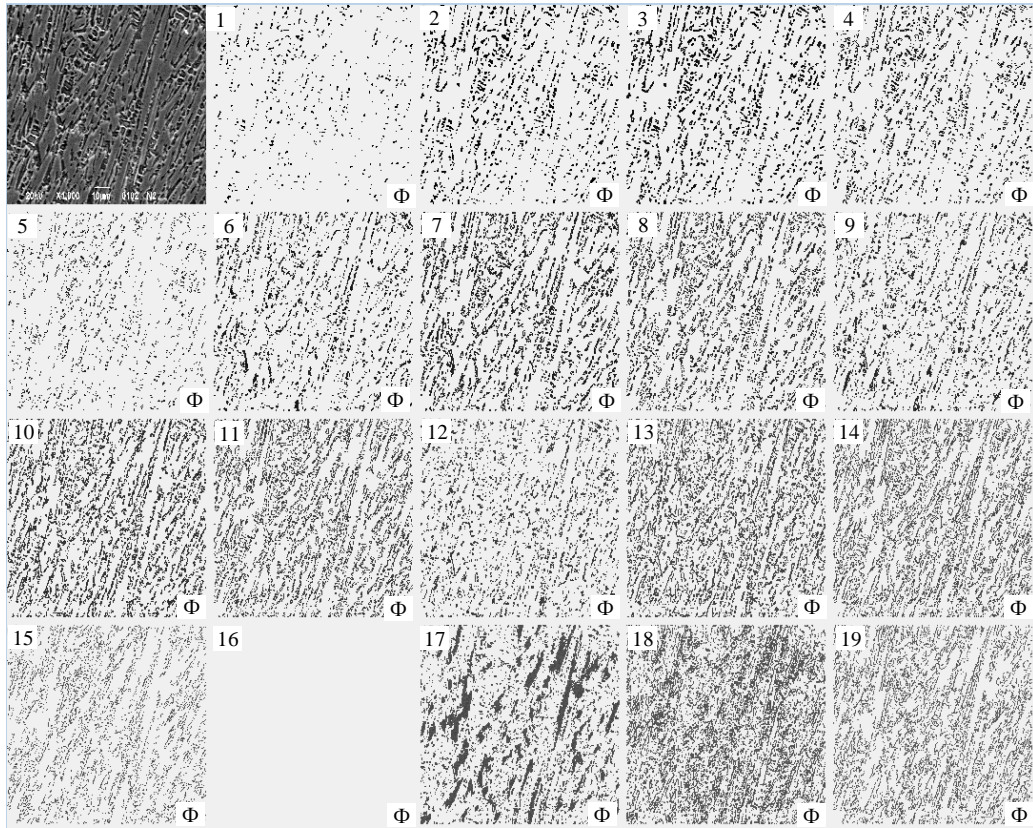


а

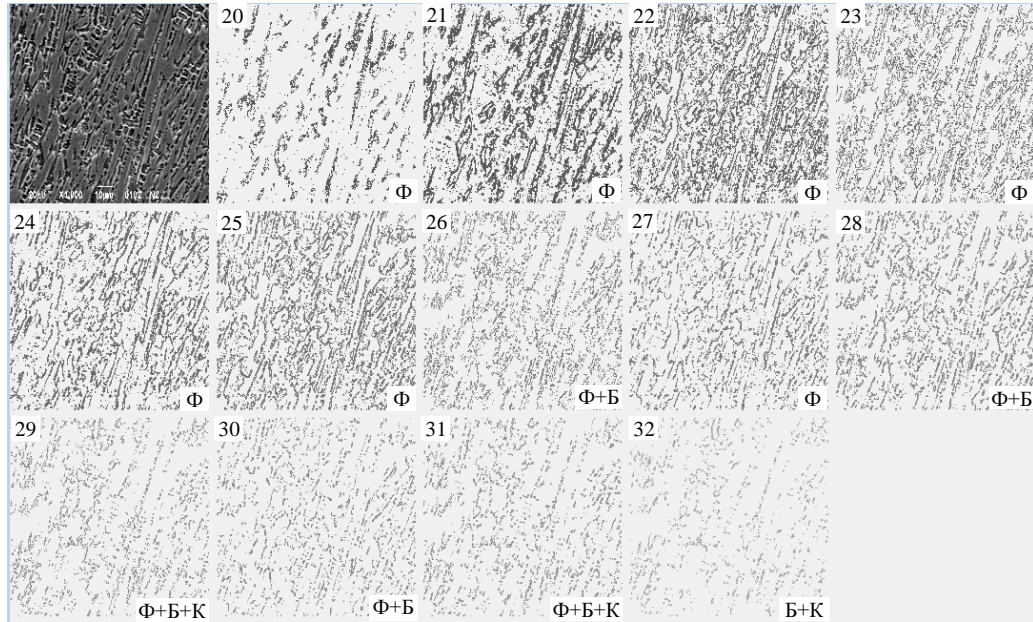


б

Рисунок 5.22 – Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз в середині покриття без модифікування



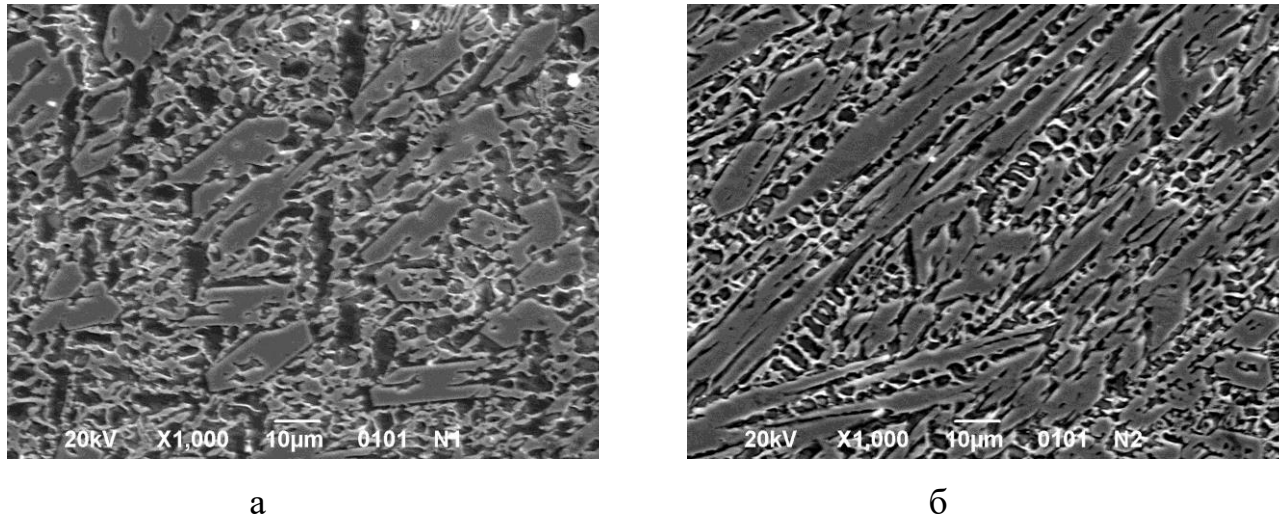
а



б

Рисунок 5.23 – Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз в середині покриття з введенням модифікатора бентонітової глини

Для повноти картини було вирішено провести детальний аналіз зображень середньої зони наплавлення (рис. 5.24).



а – електродом; б – з додатковим модифікуванням бентонітовою глиною

Рисунок 5.24 – Сформована структура при наплавленні

Також порівняльно аналізували мікроструктури, що формуються, оптико-математичним методом, які описали в цифровому форматі .bmp [289, 290]. При цьому виділяли мінливість відтінків кольорів від 0 до 255. Фази ділили на чотири групи з 16 інтервалами (умовними кольорами). Умовні кольори були прийняті відповідно: 01-09 – ферит, 10 – бейніт, 11-16 – карбіди (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Кількість кольорів, які відповідають 16 інтервалам, %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Рис. 5.24а	12.7	17.9	10.2	10.5	10.0	10.3	09.7	08.6	01.7	01.4	04.3	00.7	01.4	00.4	00.1	00.0
Рис. 5.24б	17.5	08.1	11.6	06.3	06.1	11.4	08.8	06.6	07.6	06.0	03.0	02.8	02.0	01.4	00.7	00.1

З отриманих даних випливає, що при додатковому модифікуванні рідкої ванни глиною відзначаються відмінності в кристалізації частки феритних фаз, підвищується і частка бейнітною складової, а також карбідів нестехіометрического складу №12-14. За фотографіями (див. рис. 5.24) також виявляли показники середню нейтральність. Різними методичними підходами оцінювали лапласіан і дивергенцію, середню однорідність структури, а також різні функції (табл. 5.7 і 5.8), які можуть найбільш повно характеризувати особливості в структуроутворенні порівнюваних різних

варіантів нанесення покриттів і при наплавленні без модифікування. Така методика оцінки докладно викладена в роботах [188, 226-230, 285].

Судячи з наведених розрахунків табл. 5.7 і 5.8, видно, що аналізовані параметри не вносять істотного внеску в структуроутворення при додатковому модифікуванні глиною. Далі аналізували вміст фаз та їх взаємодію (табл. 5.9).

Таблиця 5.7 – Узагальнені показники структуроутворення (без угруповання на 16 інтервалів)

Середня нейтральність

Фото	Лапласіан основна функція	Лапласіан під 90° *) до основного	3-го лапласіана	4-го лапласіана	Дивергенції
Рис. 5.24, а	0.784	0.777	0.644	0.610	0.872
Рис. 5.24, б	0.768	0.760	0.628	0.597	0.855

*) Примітка: лапласіан під кутом 90° характеризує щодо основної його функції – анізотропію.

Середня однорідність

Фото	По строкам	По стовбцям
Рис. 5.24, а	0.649	0.633
Рис. 5.24, б	0.670	0.651

Середні функції 1

Фото	Колір	Середнеквадратичне відхилення	Узагальнений градієнт	Лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Рис. 5.24, а	73.0	35.4	39.2	129.7	214.2	411.0	70.4
Рис. 5.24, б	86.9	37.9	41.7	134.7	22.8	426.6	73.6

Середні функції 2, значення яких більше 255

Фото	Дивергенція	Лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан
Рис. 5.24, а	82.5	138.8	224.8	420.9
Рис. 5.24, б	86.9	145.0	234.2	437.2

Середні функції 3 – середні відхилення до кольору

Фото	Узагальнений градієнт	Лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Рис. 5.24, а	1.4	5.2	8.2	16.0	2.7
Рис. 5.24, б	1.3	4.5	7.0	13.5	2.4

Таблиця 5.8 – Узагальнені показники структуроутворення
(з угруповання на 16 інтервалів)

Середня нейтральність

Фото	Лапласіан основна функція	Лапласіан під 90° *) до основного	3-го лапласіана	4-го лапласіана	Дивергенції
Рис. 5.24, а	0.792	0.788	0.659	0.627	0.816
Рис. 5.24, б	0.774	0.768	0.641	0.614	0.795

Середня однорідність

Фото	По строкам	По стовбцям
Рис. 5.24, а	0.782	0.771
Рис. 5.24, б	0.802	0.790

Середні функції 1

Фото	Колір	Середнеквадратичне відхилення	Узагальнений градієнт	Лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Рис. 5.24, а	4.8	2.1	2.3	7.8	12.8	24.6	4.2
Рис. 5.24, б	5.6	2.2	2.4	7.8	12.9	24.8	4.3

Середні функції 2, значення яких більше 255

Фото	Дивергенція	Лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан
Рис. 5.24, а	16.6	18.5	23.7	35.1
Рис. 5.24, б	16.2	19.5	24.7	36.0

Середні функції 3 – середні відхилення до кольору

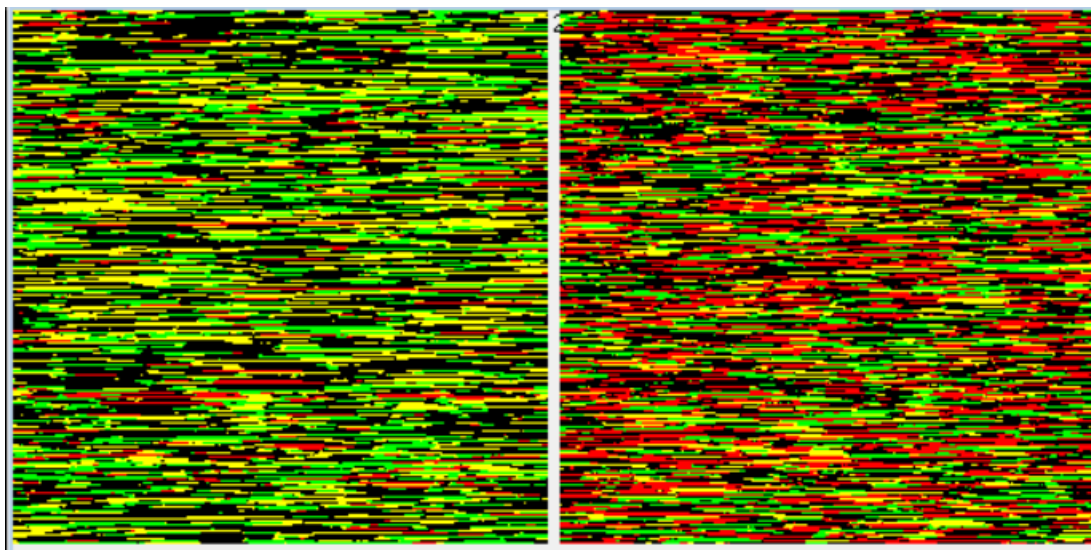
Фото	Узагальнений градієнт	Лапласіан	3-й лапласіан	4-й лапласіан	Дивергенція
Рис. 5.24, а	0.5	1.8	3.0	5.6	1.0
Рис. 5.24, б	0.5	1.6	2.6	5.0	0.9

При обробці результатів цієї таблиці скануванням комірки 3×3 пікселі виявили тільки дві окремі фази фериту і карбідів. Відсутній аустенит і парна взаємодія ферит-карбіди при модифікуванні. Максимальна частка фаз відповідає фериту (33,8%) з різним вмістом вуглецю і взаємодії ферит-аустенит-карбіди (48,62%). При модифікуванні такою глиною зростає майже в 8 разів взаємодія ферит-аустенит. В два

рази знижується частка феритних фаз, але підвищується в два рази взаємодія – ферит-аустеніт-карбіди.

Таблиця 5.9 – Відсоток фаз у фрагментах 3 на 3 (фото рис. 5.25)

Перша фотографія (рис. 5.24, а)	Друга фотографія (рис. 5.24, б)	Фази и їх взаємодія
63,92	33,80	Ферит
0	0	Аустеніт
0,60	1,76	Карбіди
2,31	15,70	Ферит-аустеніт
0,89	0,12	Аустеніт-карбіди
7,37	0	Ферит-карбіди
24,91	48,62	Ферит-аустеніт-карбіди



а

б

а – електрод; б – з додатковим введенням бентонітової глини

Рисунок 5.25 – Сформовані фази при наплавленні

Поєднання кольорів близькі один до одного. У той же час відсотки фаз відрізняються. Це свідчить про те, що поруч з фрагментом 3×3 є інший фрагмент з відмінною фазою, і таких, різних пар досить багато.

У даній роботі позначені кольори (див. рис. 5.25): чорний ферит – для всіх 9 точок фрагменту 3×3 пікселя - фаза номер 1; друга фаза – аустеніт для всіх 9 точок – відсутня; синій колір – третя фаза карбід у всіх дев'яти точках; зелений колір – фаза номер 4 – ферит-аустеніт; жовтий колір – фаза номер 5 – аустеніт-карбід.

Поєднання фаз ферит-карбіди номер 6 відсутні на обох фотографіях; червоний колір – взаємодія фаз номер 7 – ферит-аустеніт-карбіди.

На основі даних табл. 5.9 можна припустити, що з введенням модифікуючої домішки бентонітової глини істотно буде змінюватися і кристалічна решітка карбідних фаз. У ряді випадків при металографічних дослідженнях було виявлено поділ грубоголачастих виділень карбідів нестехіометрического складу на більш тонкі, що формуються при кристалізації, а також їх більш інтенсивне подрібнення. Частка таких карбідів при модифікуванні зростає в 2 рази. Бентонітова глина створює складну кристалічну структуру карбідів.

ВИСНОВКИ

У розділі виконано експериментальне й математичне моделювання технологічних процесів використання додаткового модифікування при експлуатації виробів у різних умовах.

1. Розроблено модель розтягування довгих стрижнів для уточнення підходу по оцінці напружень при експлуатації. Встановлено, що без зовнішньої сили розв'язання пружно-пластичних завдань виходять набагато більш стійким, але розроблена модель не повинна суперечити принципу мінімуму ентропії. Основою створення моделі є порівняння робіт пружних і пластичних деформацій. Алгоритм заснований на переборі довжин пружних і пластичних зон, а також знаходженні зони дотичних деформацій. Розрахунки проведені для криволінійних поверхонь і трапецій. У процесі проведення розрахунків розглянули різницю відносин пружної деформації всього стрижня до гранично пружної. Вона на порядок менше для коротких, чим для довгих стрижнів.

Отримані відношення пружної деформації до границі текучості для довгих

стрижнів – постійне, для стандартних зразків (половина довжини стрижнів 40мм) тензометричні виміри показують відношення близьке до 1 та для них використовувати модель для оцінки не доцільно. З отриманих залежностей аналізу розтягування зразків різних довжин впливає, що зі збільшенням половин довжини їх зони до руйнування, рівень деформації мінімізується.

2. Встановлено, що найменше вивчений підхід до аналізу пружно-пластичного завдання розтягання довгого стрижня полягає в одночасному виключенні двох параметрів. Це завдання зводиться до рівнянь у частинних похідних. При цьому, вдається виключити зовнішню силу й роботу пластичної деформації та одержати рівняння другого порядку в частинних похідних, схоже на стаціонарне рівняння коливань. При виключенні роботи пластичної деформації існує більша ймовірність появи стрибка ентропії. У цьому випадку завдання слід вирішувати за допомогою узагальнених функцій. Оцінка також включає врахування схованої енергії пластичності. Аналогом може служити процес кристалізації. Виходячи з викладеного, у подальших дослідженнях ефективним є розробка підходу до моделювання й прогнозуванню процесів розвитку напруженого стану при експлуатації шляхом вибору ефективних, якісних матеріалів колони й стабільного її стану.

3. Розрахунки, проведені по отриманих залежностях, показали, що для пластичної ділянки у вигляді прямолінійної трапеції із зовнішньою силою руйнування довжина визначається його висотою. Це відповідає принципу Сен Венана.

Встановлено, що згідно результатів проведених досліджень локалізація деформацій у верхній частині колони вимагає особливого підходу до вибору методики моделювання процесу і якості металу верхньої частини колони труб. Ефективним для збільшення строку експлуатації верхньої зони металу колони може бути використання сталей з перлітною структурою матриці й мінімальною часткою феритної складовою, дрібним зерном і чистої по неметалевим включенням.

Що стосується підвищення стійкості різьбових з'єднань, то пластичне мастило слід модифікувати домішками детонаційного походження й вони повинні мати різну фракцію порошкових композицій, які забезпечать більш тривале збереження кисню у

середовищі тертя.

4. Експериментальне моделювання зміни структури проводили з наступним теоретичним аналізом фаз оптико-математичним методом.

Експеримент деформацію циклічним розтягування на 12,8% стандартних зразків листової Сталі 20пс товщиною 5мм дозволив встановити вплив тільки пластичної деформації, яка вносить істотний вклад у деградацію металу верхньої частини колони НКТ.

Проведення експериментів супроводжувалося оцінкою анізотропії властивостей і структури по коерцитивній силі. На основі досліджень встановлено, що до деформації вона становила 0,87, а після 0,36, і це свідчить про істотну деградацію металу. По значенню анізотропії можливо відслідковувати стан устаткування при його обслуговуванні.

5. Металографічними дослідженнями в процесі розтягування виявлено формування тріщин, надривів від неметалевих включень, а також відшарування металу від поверхні зразка.

Встановлено, що в процесі пластичної деформації особливо інтенсивно подрібнюються перлітні зерна а феритні – витягнуті поперечно. Відзначається зменшення частки перлітної складовій. Одночасно феритна складова стала більш темною (з'явилася структура в ній) і границі чіткі.

Вимірами мікротвердості показано, що при наявності великої частки фрагментованої структури її показання на поперечних зразках після деформації підвищуються на 10%, а в повздовжньому – на 7%.

У поверхні деформованих зразків виявлені найбільші структурні зміни після пластичної деформації з формуванням зон екструзії.

6. Для опису сформованих фаз та їх мінливості при пластичній деформації використовували оптико-математичний аналіз, який на підставі рівнянь Нов'є-Стокса дозволяє оцінити дифузійні процеси, що відбуваються, і щільність фрагментів. Така оцінка базувалася на абсолютних величинах кінцево-різницевого показника лапласіанів і дивергенції. За результатами оцінки будували гістограми по 11 групах умовних кольорів 0;7;8;73;82;91 – віднесені до фериту різного ступеня насиченості

вуглецем і 164, 241, 247 і 255 – до карбідів. Локальним рентгеноструктурним аналізом встановлено, що частка цементитної складової (колір 255) після деформації знижується в 2 рази (з 1,61 до 0,78%). Це супроводжується перерозподілом вуглецю. І в зоні феритних фаз його концентрації зростає в 2-3 рази, збільшуючи число зон з підвищеним вмістом вуглецю (кольори 82 і 91). При цьому виявлені окремі випадки появи в них виділень, близьких до карбідів типу FeC та Fe_xC_y з дефіцитом по вуглецю. При цьому частку мінливості концентрації вуглецю підтверджували описом оптико-математичним методом по мінливості кольорів. Ці результати добре узгоджуються з даними термоелектронної емісії.

7. Дослідженнями встановлено, що в процесі пластичної деформації формуються різні дефекти в металі - тріщини, пори й деградації структурних складових. Аналіз дефектів виявив, що пори і тріщини насичені різними компонентами, і це пов'язано з якістю металу, підготовкою зразків для досліджень та ліквідацією.

Показано, що поверхня вихідних (після прокатки) і деформованих зразків відрізняється наявністю незначних зон екструзії поверхні, а після пластичної деформації вона суттєво зростає і є джерелом пошкоджуваності.

Комплексні дослідження зон екструзії виявили формування нових фаз, а також неметалеві включення переміщених їх з приповерхневих шарів.

Оптико-математичним аналізом таких фаз показано, що вони включають ферит з підвищеним вмістом вуглецю до 25% (типу 8 і 92), до 55% цементиту й 14% карбідної фази зі зниженою часткою вуглецю (колір 155). Більш низька частка цих структурних складових характерна для прилягаючого, до описаного вище шару. В цих зонах структура перліту відсутня.

8. При модифікуванні проведено оцінка структурних змін в покритті з модифікування його бентонітовою глиною оптико-математичним аналізом фаз та їх часток щодо вихідного стану.

Порівняння гістограм кольорів зображень за критерієм Колмогорова по 15 інтервалах показало більшу однорідність в розподілі фаз при модифікуванні бентонітовою глиною.

Отримано зображення на фотографіях повною мірою відображають структуроутворення при модифікуванні покриттів, де можна простежити не тільки форму й розподіл найбільш твердої карбідної фази, але й оцінити кількість і взаємодію всіх структурних складових.

9. При описі оптико-математичним методом виявили відсутність аустеніту і парної взаємодії ферит-карбіди при модифікуванні. При цьому максимальна частка фаз відповідає фериту (33,8% – знижується в 2 рази) і взаємодії ферит-аустеніт-карбіди (48,62% – підвищується в 2 рази), при модифікуванні зростає майже в 8 разів взаємодія ферит-аустеніт.

Встановлено, що введення модифікуючої домішки бентонітової глини істотно змінює кристалічну решітку карбідних фаз. При металографічних дослідженнях виявлено поділ стрілчастих виділень карбідів нестехіометричного складу на більш тонкі, що формуються при кристалізації, а також їх більш інтенсивне подрібнення. Частка таких карбідів при модифікуванні зростає в 2 рази.

РОЗДІЛ 6

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ АНАЛІЗУЄМИХ ВИРОБІВ

У розділі розглянуто вплив модифікуючих домішок на підвищення експлуатаційних властивостей зміцненої поверхні та її формування. Для цього використовували результати виконаних досліджень з модифікування немагнітною часткою вторинної сировини від утилізації боєприпасів, а також бентонітовою глиною.

Одержана більш розширена інформація про можливість використання інших природних домішок – глини різних родовищ районів України.

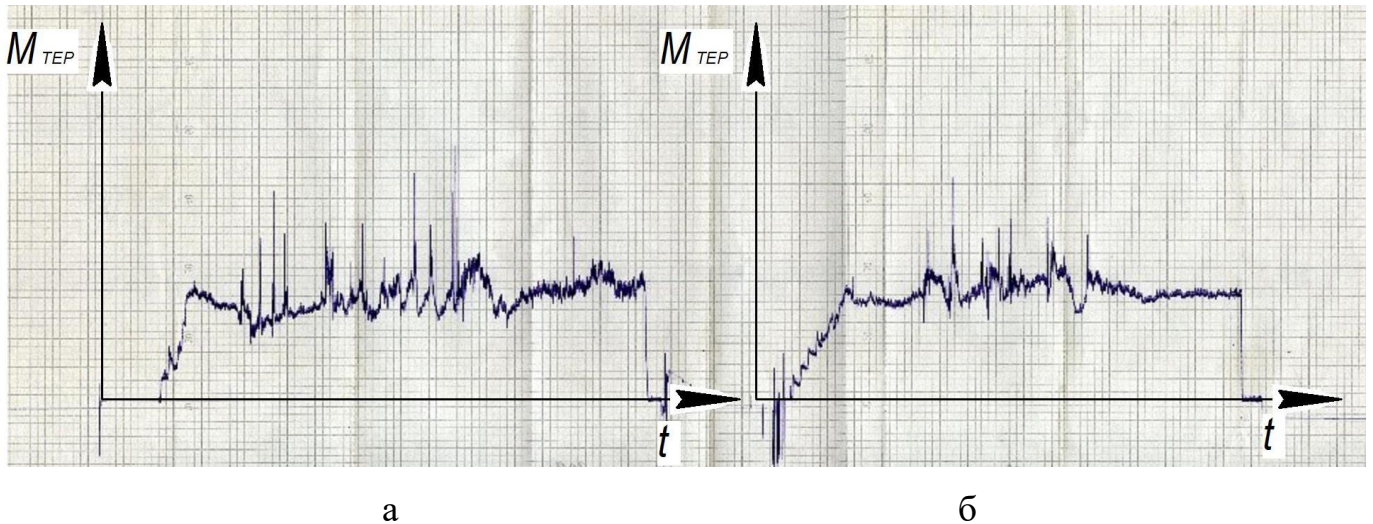
6.1 Вплив алмазовмісної немагнітної частини шихти на стабільність в експлуатації сполучень

Запропонована технологія [193] розглядається для використання введення шихти в пластичне мастило різьбових з'єднань труб газо- і нафтовидобувного виробництва.

Випробування проводили за схемою «диск-колодка» на машині тертя СМТ-1. Диск та колодка виготовлені зі сталі Р-110. У зону їх контакту подавалось пластичне мастило. Оскільки детонаційна шихта також включає компоненти, які мають вплив на зносостійкість і формують вторинні захисні плівки при терті, то це істотно зменшує можливість задирів і руйнування поверхонь в сполученні. Результати порівняльних стендових досліджень наведені в табл. 6.1 і рис. 6.1 [262].

Таблиця 6.1 – Випробування на знос пластичного мастила з введенням графіту і детонаційної шихти

№ за/п	Пластичне мастило	Знос, г		$f_{\text{тер}}$
		диска	колодки	
1	З додаванням графіту	0,0518	0,0077	0,34
2	З детонаційною шихтою	0,0260	0,0052	0,30



а – знос з введенням графіту, б – з домішкою детонаційної шихти

Рисунок 6.1 – Зношування пар тертя з пластичним мастилом. Піки характеризують наявність локальних задирів і їх інтенсивність при навантаженні 0,05-045 кН

Пластичне мастило включає такі компоненти: мастило «Літол-24» з додатковим введенням частки немагнітної фракції детонаційної шихти на рівні 20-30% від його частки (Додаток И).

Ефективною є домішка, яка частково містить фракцію шихти розміром 10-20мкм. При використанні детонаційної порошкової суміші з розміром включень менш, ніж 10 мкм, зносостійкість зростає не суттєво. Підвищення відмічається тільки у перший період випробувань та це пов'язано з тим, що наноалмази формують на поверхні тертя неглибокі подряпини, в яких відкладається незначна кількість домішок та мастила, і вони швидко переходять до контактуючих поверхонь тертя і завершують свій вплив на зменшення зношування. Найбільший вплив мають домішки порошку розміром 10-20 мкм, які сприяють формуванню подряпин, що є кишнями для накопичення компонентів та мастила. В процесі тертя та зношування вони поступово подають до контактуючих поверхонь домішки та підвищують експлуатаційну стійкість з формуванням захисних плівок.

Встановлено, що модифікування пластичного мастила детонаційною шихтою від утилізації боеприпасів зменшує задир при експлуатації в різьбових з'єднаннях до 2 разів. При цьому коефіцієнт тертя зменшується несуттєво.

Випробуваннями на зношування при навантаженнях 0,05-0,45 кН встановлено, що при використанні добавки детонаційної шихти істотно зменшуються задири і вони наступають тільки при навантаженні 0,45 кН. Введення графіту впливає до 0,35 кН, а без використання модифікаторів не вище 0,25 кН. За рівнем пошкоджуваності використання детонаційної шихти також забезпечує зменшення цього показника.

У процесі тривалого зносу, коли відбувається схоплювання, відзначається повне видалення мастила та детонаційної шихти з подряпин і вони набувають рельєф тертя (рис. 6.2). У цьому випадку вдалося спостерігати і підвищену кількість модифікуючої домішки, розташованої біля границі подряпини.

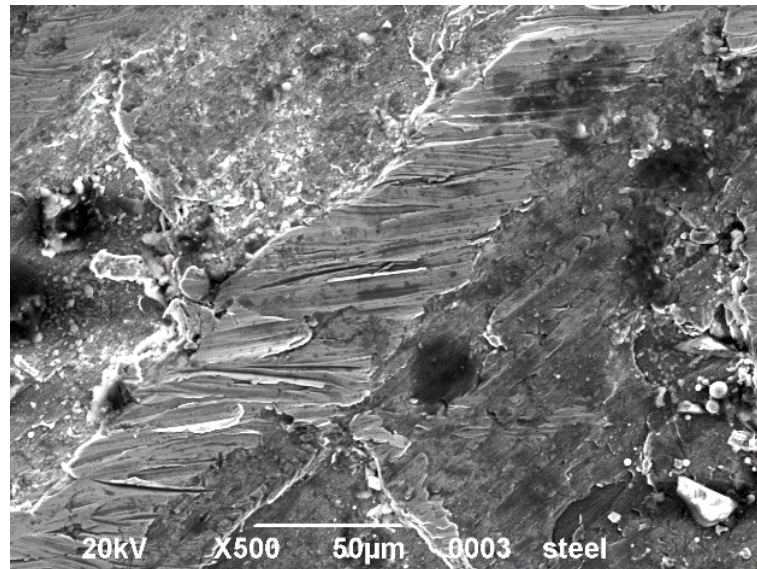


Рисунок 6.2 – Поверхня подряпин після повного видалення мастила і детонаційної шихти і зони, які розташовуються поруч

6.2 Підвищення експлуатаційної стійкості культиваторних лап сільськогосподарської техніки

Проаналізувавши особливості зносу, виявлені способи відновлення і зміцнення культиваторних лап, найбільш ефективними є два варіанти підвищення їх стійкості: заміна ріжучої частини на зношених лапах і зміцнення нових лап наплавленням з модифікуванням покриттів домішками.

6.2.1 Розробка технологічного процесу відновлення і зміцнення стрілчастих лап культиваторів вібраційним методом

На першому етапі, на основі теоретичних, експериментальних досліджень [291-295] спільно з фахівцями Полтавської державної аграрної академії розроблений технологічний процес відновлення і зміцнення стрілчастих культиваторних лап вібраційним методом [296, 297].

Схема технологічного процесу відновлення і зміцнення стрілчастих лап культиватора вібраційним методом представлена на рис. 6.3.



Рисунок 6.3 – Схема технологічного процесу відновлення і зміцнення стрілчастих лап культиватора

Зношену частину леза лапи культиватора слід видаляти шліфувальним відрізним кругом А24SBF за допомогою кутової шліфувальної машини МШУ - 2-230.

Кутову пластину (рис. 6.4) виготовляли шляхом вигину під кутом 60° зі смугової сталі 45 товщиною 5 мм за допомогою преса КД2128К. Зусилля преса становило 630 кН, частота ходу повзуна – 140 хв^{-1} .

Ріжучу частину пластини заточували під кутом загострення $i=14^\circ$ на універсально-заточному верстаті 3Д642Е.

Заготівку (кутову пластину) приварювали до відновлюваної лапи суцільним швом електродуговим зварюванням дротом $\varnothing 2\text{мм}$ Св-08ГС за допомогою зварювального напівавтомата при наступних параметрах: напруга – 20В; сила зварювального струму - 180А; швидкість подачі дроту – 160 м/год.

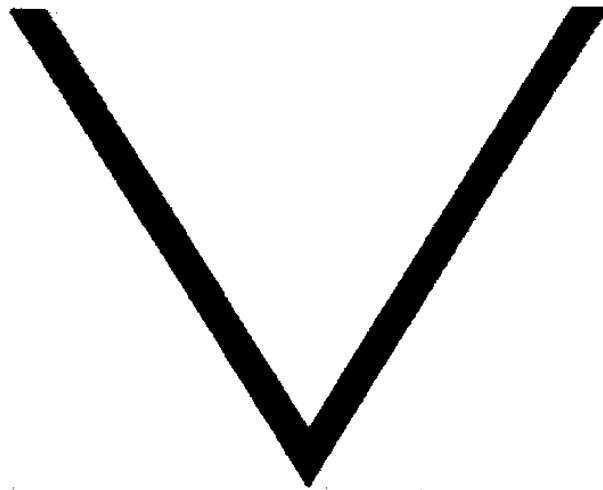


Рисунок 6.4 – Кутова пластина зі сталі 45 товщиною 5 мм

Підвищення напруги призводить до незначного збільшення глибини проплавлення основного металу, а його зменшення від оптимального - погіршує якість зварного шва. Зварювання з силою струму менш 180А не забезпечує необхідне зварювання, а при більшій - сприяє прожогам відновлюваного виробу. Збільшення або зменшення швидкості подачі дроту від оптимального – 160 м/год, знижує і стабільність горіння дуги, що супроводжується значним погіршенням якості зварного шва. При наплавленні порошком Сормайт-1 необхідно перевірка паралельності встановлення основи лапи на верстаті, після чого слід виконувати заточку її ріжучої кромки.

Подальше зміцнення поверхні лапи рекомендується виконувати вібраційним методом на виготовленій вібраційній установці в умовах Полтавської державної аграрної академії при використанні наступних параметрів: тиск обробки 12,5-15,2 кН; амплітуда коливань – 0,75 мм; час зміцнення – 30с. Збільшення амплітуди коливання призводить до нерівномірного збільшення ширини ріжучого елемента лапи по довжині на 0,55-1,10мм, а зменшення – знижує величину деформації по товщині. Вібраційне деформування забезпечує рівномірну і дрібнозернисту структуру металу, а також характеризується більш однорідним розподілом фаз на глибину до 150...220мкм. При зменшенні тиску менше 12,5 кН не досягається однорідності зміцнюючої поверхні, а більш ніж 15,2 кН – має місце локальне пошкодження фаз сплаву із зародженням субмікротріщин.

На рис. 6.5 і 6.6 приведена схема відновлення стрілкової лапи культиватора, а також її зовнішній вигляд після відновлення.

Як показали випробування, відновлення стрілкових лап культиватора з використанням наплавлення зношеного шару сормайт-1 і подальшим вібраційним зміцненням забезпечує збільшення їх життєвого циклу на 68%.

Відновлені та зміцнені стрілкові культиваторні лапи (рис. 6.6) повинні відповідати наступним вимогам:

- твердість обробленої поверхні ріжучого елемента лапи після зміцнення повинна бути 53...55 HRC;
- радіус кромки леза після заточування повинен бути не більше 0,3 мм.

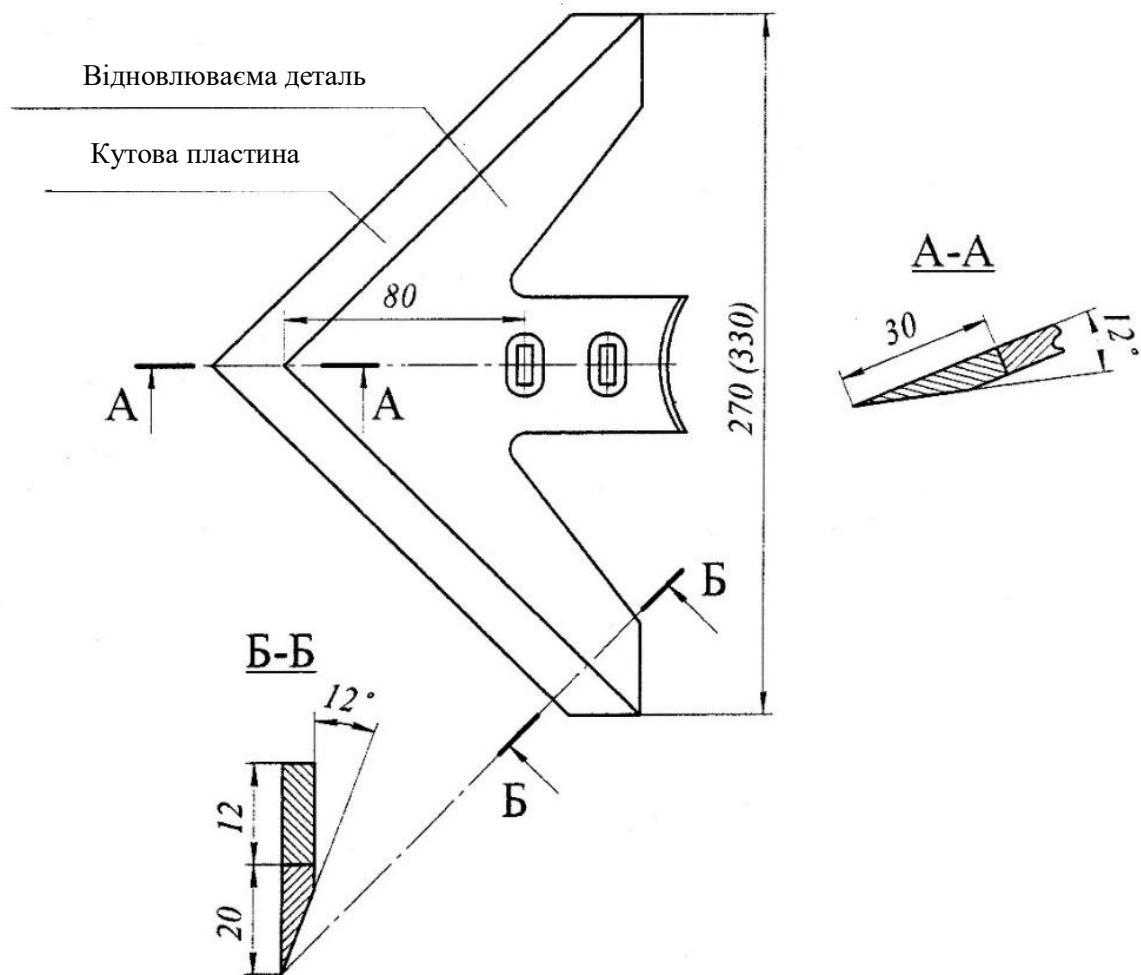


Рисунок 6.5 – Схема відновлення стрілкової лапи культиватора [113]

В результаті відновлення розробленим комплексним методом відносний знос лап культиваторів зменшується в 1,68 разів у порівнянні з новими деталями.

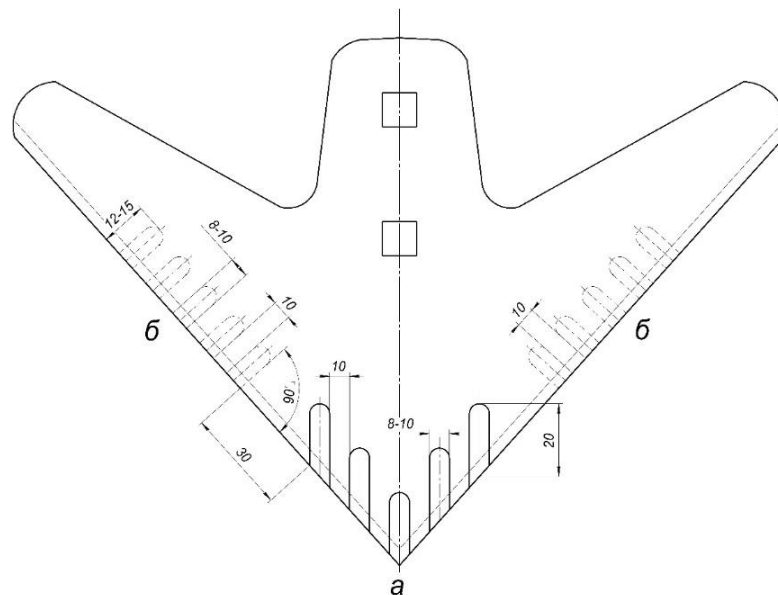


Рисунок 6.6 – Відновлена культиваторна лапа за запропонованою технологією

6.2.2 Спосіб зміцнення культиваторних лап наплавленням зміцнюючими смугами

На другому етапі, вивчивши характер зносу лап культиватора, запропоновано новий спосіб їх зміцнення по периметру робочої поверхні [271, 272]. Спосіб полягає в наплавленні на поверхню лапи зносостійких смуг (валиків) з введенням модифікуючої домішки з нано- і дисперсними алмазами. Смуги на стрілочастій лапі культиватора формували згідно рис. 6.7, з урахуванням інтенсивності та характеру її зносу. Згідно характеру зношування, зміцнюючим покриттям будуть сформовані смуги носка довжиною 20мм, а крил – 12-15мм з відстанню між ними не менше 10мм, щоб запобігти перекриття зон термічного впливу.

Оптимальні розміри смуг визначені з умов формування напруженого стану при наплавленні електродом, а також якістю покриття і схильністю металу до пошкоджуваності при зміцненні. Важливим є враховувати і виникаючі напруження в ріжучих кромках і перехідній зоні основи лапи – лезо, крилах при експлуатації. З урахуванням максимального зносу і деформації крил, зміцнюючі смуги в цих зонах наносили на протилежну поверхню щодо носку (рис. 6.7).



а – носок; б – крила

Рисунок 6.7 – Схема наплавлення зміцнюючих смуг на поверхню стрілкової лапи культиватора

Для оцінки впливу модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів провели їх випробування на зносостійкість [251, 272, 298, 299]. Стендові випробування на зносостійкість проводили на машині тертя СМТ-1 на підприємстві ДП «Завод ім. В.О. Малишева». Відносну зносостійкість зразків, зміцнених різними способами відновлення поверхні деталей проводили і оцінювали за п'ятьма варіантами: 1 – вихідний матеріал культиваторної лапи - сталь 65Г; 2 – нанесенням покриття електродом Т-620 з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти шляхом обмазки електрода; 3 – наплавка електродом Т-620 з використанням розплавлення шлікерного покриття немагнітної фракції детонаційної шихти; 4 – нанесення покриття електродом Т-620; 5 – наплавлення електродом Т-620 з його обмазкою бентонітовою глиною. Результати попередніх випробувань наведені в табл. 6.2.

З результатів випробувань слідує, що найкращі показники при оцінці зносостійкості показали зразки з додатковим введенням глини і немагнітної фракції детонаційної шихти з алмазними включеннями. Наплавлення по шлікерному покриттю істотних змін не вносить і за коефіцієнтом тертя вона знаходиться на рівні звичайного наплавлення електродом.

Таблиця 6.2 – Випробування на зношування в умовах абразивного середовища

№ з/п	Варіант зміцнення	Знос, г	Відносний коефіцієнт зносу, %
1	Вихідний матеріал культиваторної лапи – сталь 65Г	0,0145	1,0
2	Наплавлення обмазкою електродом Т-620 з введенням немагнітної фракції детонаційної шихти	0,0044	0,30
3	Наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю з немагнітної фракції детонаційної шихти	0,0092	0,63
4	Наплавлення електродом Т-620	0,0090	0,62
5	Наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням бентонітової глини	0,0066	0,45

При введенні глини або шихти в відновлювальне покриття, зносостійкість підвищується в 1,3-2,0 рази відносно до нанесення його електродом без модифікування і в 2,0-3,0 рази – до звичайного матеріалу культиваторною лапи.

Для подальшого аналізу провели додатково порівняльні випробування на зношування при різних умовах тертя (сухе, сухе з подачею кварцового піску фракцією 0,25-0,40мм; з подачею кварцового піску й води) та оцінили мінливість коефіцієнтів тертя (табл. 6.3 і рис. 6.8). При даних випробуваннях також використовували сполучення деталь «диск» з фторопласту Ø50мм. Швидкість ковзання при цьому становила 0,78 м/с.

На рис. 6.8 наведені діаграми випробувань на зношування нанесених покриттів. Деяке зниження коефіцієнта тертя при випробуванні наплавлених покриттів зразків без модифікування (див. рис. 6.8, б №4) пов'язано з процесом схоплювання, що знизило період випробувань.

З отриманих даних випливає, що найбільш низький коефіцієнт тертя характерний для сухого тертя, а також - гідроабразивного в зразках з додатковим модифікуванням глиною і детонаційною шихтою. При подачі абразиву коефіцієнт тертя знижується в зразках з наплавленням покриття електродом і модифікування

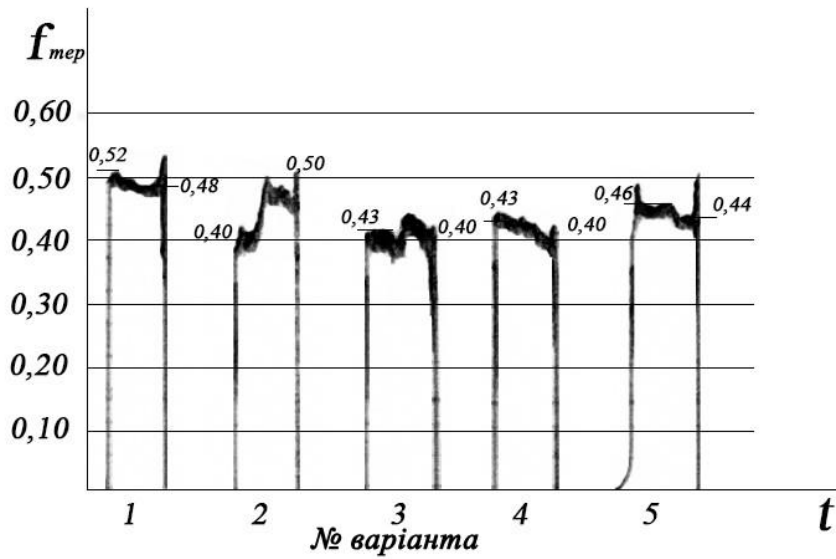
немагнітною фракцією детонаційної шихти.

Таблиця 6.3 – Випробування на зношування різних типів покриттів

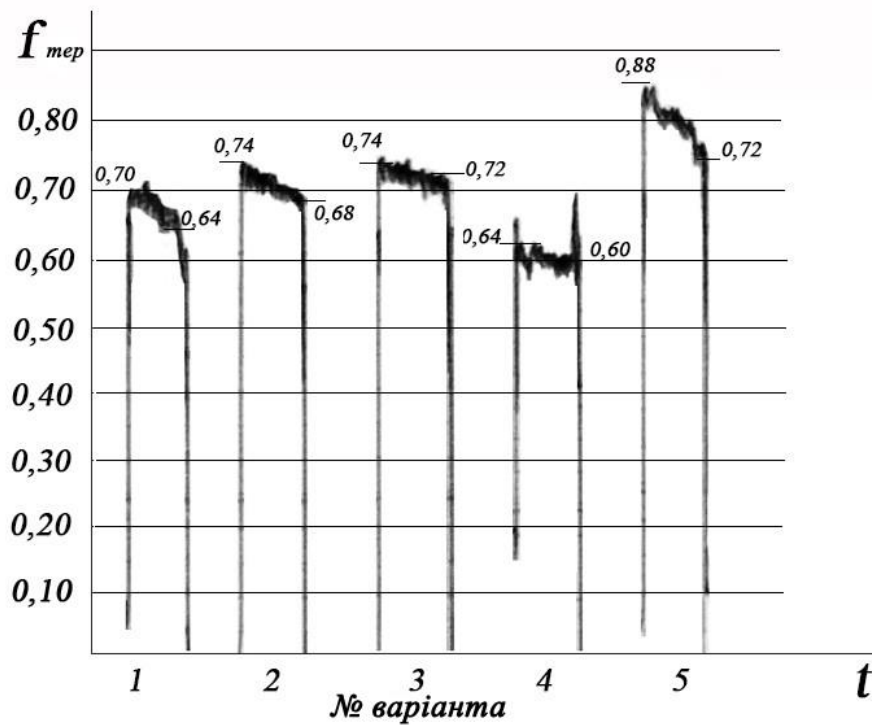
№ варіанту	Значення $f_{\text{тер}}$ за умов випробування		
	P=50Н*	P=50Н**	P=200Н***
1. Вихідний матеріал культиваторної лапи сталь 65Г	0,48-0,52	0,64-0,70	0,38-0,42
2. Наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням немагнітної фракції детонаційної шихти	0,40-0,50	0,68-0,74	0,38-0,42
3. Наплавлення 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 модифікуванням бентонітовою глиною	0,44-0,46	0,72-0,83	0,34-0,36

Умови випробувань: * сухе тертя; ** сухе з подачею кварцового піску фракції 0,25-0,40мм; *** з подачею кварцового піску та води.

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



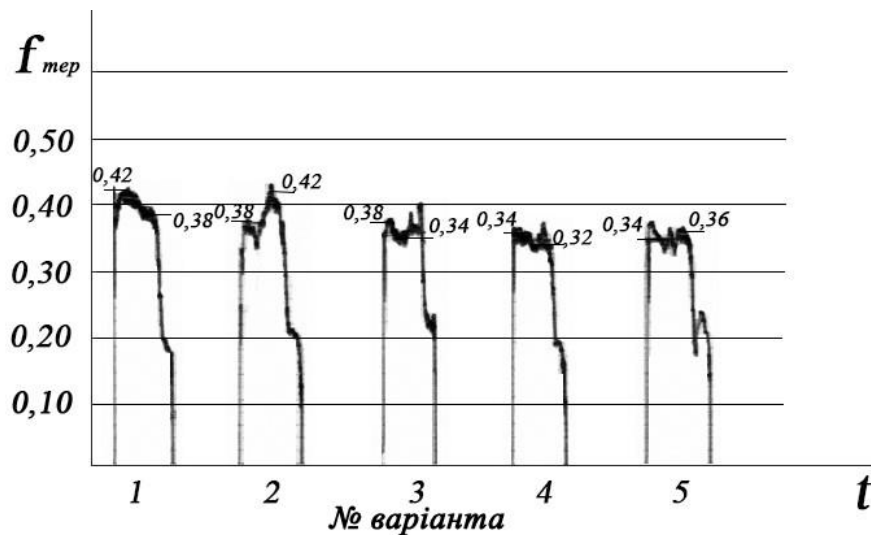
а



б

1 – вихідний матеріал культиваторною лапи сталь 65Г; 2 – наплавлення електродом Т-620 з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти; 3 – електродом Т-620 по шликерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти; 4 – електрод Т-620; 5 – електрод Т-620 з додатковим введенням глини

Рисунок 6.8 – Діаграми випробувань на зношування покриттів в режимі сухого тертя (а), з подачею кварцового піску фракції 0,25-0,40мм (б) та в гідроабразивному середовищі (в)



В

Продовження рис. 6.8

Не завжди в умовах ремонтного підприємства сільськогосподарської техніки є можливість застосувати бентонітову глину. На території України безліч місць з видобутку глини. Вивчено можливість використання також глин інших родовищ. Для прикладу вибрали глини Куп'янського та Прилукського родовищ [300, 301]. Кожна глина має свій специфічний склад. Перед використанням необхідно провести хімічний аналіз вмісту компонентів і підготувати її до використання (дробити, сушити) також, як і - бентонітову.

За результатами дослідження хімічного складу видно, що в глині з Куп'янського родовища (табл. 6.4) в ній присутній значний вміст кальцію – 56,455%. Тому глина з даного родовища має високу гігроскопічність і схильність до збирання в грудочки під час подрібнення в кульовому млині. У табл. 6.5 наведено хімічний склад глини Прилукського родовища. Помітно підвищений вміст кремнію – 73,243%. Глина Прилукського родовища мала хорошу сипкість і добре подрібнювалася в кульовому млині. У табл. 6.6 наведено вміст речовин в наплавленому електроді без обмазки.

Одночасно були проведені випробування на зношування для цих видів обмазки електродів і наплавлення їх на Сталь 45 (табл. 6.7). Нанесення покриттів на Сталь 45 виконували для того, щоб оцінити розподіл хімічних компонентів, що містяться в покритті при використанні електрода E432 і різних домішок глини.

Таблиця 6.4 – Хімічний склад глини Куп'янського родовища, %

Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Si	P	S	Cl
5,225	1,129	6,551	0,623	56,455	0,341	19,2	8,5	1,0-1,5	7,0

Таблиця 6.5 – Хімічний склад глини Прилукського родовища, %

Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Si	S
0,815	0,586	8,822	1,179	1,405	1,917	73,243	2,5

Таблиця 6.6 – Хімічний склад наплавленого шва електродом Е46- Моноліт-РЦ-УД (Е432 (3) -РЦ11), %

Mn	Si	З	P	S
0,40-0,65	0,15-0,40	0,11	0,035	0,030

Таблиця 6.7 - Випробування на зношування покриттів

Зразок	Значення $f_{тр}$		Величина зносу, г (сумарна)
	при сухому терті, P = 50Н	з H ₂ O, P = 100Н	
Наплавлення електродом Е46 - Моноліт	0,28	0,217	0,0928
Наплавлення електродом 3 додатковим введенням глини Прилукського родовища	0,25	0,130	0,0678
Наплавлення електродом 3 додатковим введенням глини Куп'янського родовища	0,256	0,213	0,1242

З табл. 6.7 випливає, що найкращий результат досягається в варіанті з використанням глини Прилукського родовища в якості додаткової модифікуючої домішки. Знос такого зміцнення зменшується на ~ 27%. При введенні глини

Куп'янського родовища знос збільшився. Це пов'язано і з хімічним складом самої глини, і його впливом на підвищення стійкості покриттів. При цьому коефіцієнт тертя в умовах сухого в цей час знижується. Крім того, в такій глині велика частка глинозему SiO_2 , який легко розчиняється у вологому середовищі в ґрунті та забезпечує краще засвоєння цього компонента. Перед використанням глини в якості модифікуючої домішки і для забезпечення підвищення стійкості покриттів необхідно проводити хімічний аналіз введеної домішки. Також на якість покриття впливає і частка введеної домішки та її стан.

6.3 Польові випробування зміцнених культиваторних лап

В розділі аналізуються результати стендових та промислових випробувань зміцнення культиваторних лап бентонітовою глиною [275]. Раніше була зроблена спроба використання природної речовини – шунгіту для модифікування [302, 303]. Але вона знаходиться в одному родовищі та це ускладнює процес модифікування.

За запропонованою схемою наплавлення зміцнюючих смуг на робочу поверхню стрілчастої лапи культиватора (рис. 6.7) наносили різну конфігурацію (рис. 6.9) смуг. Наплавлення проводили з урахуванням наступних параметрів: $I=180-200\text{A}$, $U=68\text{В}$. На рис. 6.9 представлені лапи, які досліджували.

Проведено аналіз впливу зміцнюючої домішки бентонітової глини в наплавлення на зміну напружено-деформованого стану по коерцитивній силі [254]. Для цього були проведені вимірювання на новій культиваторній лапі, а потім після зміцнюючого наплавлення робочої поверхні валиками, згідно схеми [271]. Аналізуючи отримані дані (табл. 6.8), слід зазначити, що наплавлення з додатковим модифікуванням глиною знижує рівень коерцитивної сили на 26-42%. Це може істотно змінити процес зношування і деформації культиваторних лап. Проведені стендові випробування в умовах виробництва ДП «Завод імені В.О. Малишева» показали підвищення зносостійкості модифікованих покриттів глиною в $\sim 2,5$ рази.



а



б



в



г



д



е

а, б – нова лапа вітчизняного виробництва; в, г – зношена лапа зарубіжного виробництва; д, е - нова лапа зарубіжного виробництва

Рисунок 6.9 – Зовнішній вигляд зміцнюючих смуг, нанесених на культиваторні лапи

Таблиця 6.8 – Зміна коерцитивної сили на порівнюваних культиваторних лапах Tiger Mate II до і після зміцнення електродом з введенням глини

зразок	Умовний номер вимірювання																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Нова лапа верх (носок)	20,1	19,2	18,7	18,06	17,7	17,9	17,9	13,3	18,0	17,8	18,4	19,06	19,5	20,1	20,9	13,7	14,4	18,1
Середні значення	18,5							13,3	19,1							15,4		
Після наплавлення верх (носок)	20,2	19,7	22,0	12,2	13,1	12,7	11,8	9,3	12,1	15,3	11,0	11,1	20,7	19,6	20,8	11,6	16,0	15,7
Середні значення	15,9							9,3	15,8							14,4		
Після наплавлення низ (крила)	20,0	20,5	20,9	14,9	14,0	12,5	11,8	12,7	10,6	12,1	12,3	13,0	20,0	19,7	18,6	12,3	18,9	20,0
Середні значення	15,8							12,7	15,18							17,06		

Апробація технології нанесення покриттів електродом Т-620 і додатковим модифікуванням бентонітовою глиною в польових умовах має позитивні результати. На польовий культиватор Case Tiger Mate II (рис. 6.10) фірми CNH Industrial America LLC було встановлено 15 зміцнених за розробленою технологією культиваторних лап, які пройшли випробування на підприємстві СТОВ «Мрія» Харківської області.

Напрацювання склало 3185 га (Додаток К). Середнє напрацювання в звичайний період складає 1200-1500 га. Зношення базової культиваторної лапа та зміцненої представлені на рис. 6.11, а зміна їх розмірних характеристик в табл. 6.9. Культиватор працював на ґрунтах Харківської та Сумської областей.



а



б

Рисунок 6.10 – Польовий культиватор Case Tiger Mate (а, б) зі стандартними (в) і зміцненими розробленим способом (г) культиваторними лапами



В



Г

Продовження рис. 6.10



а

б



в

г

Рисунок 6.11 – Базова (а, в) та зміцнена (б, г, е) культиваторні лапи після напрацювання 3185 га та одержана різниця в розмірах при їх накладенні (д)



д

е

Продовження рис. 6.11

В результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених, згідно схеми та технології ХНТУСГ, ресурс становить 3185 га на один робочий орган, величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм, при цьому стандартно виготовлені лапи змінюють цей показник від 39 до 86 мм та мають більш високі за рівнем значення в $\approx 2,5$ рази відповідно. Рис. 6.11, д вказує на променевидний знос поверхні лапи. Поверхня тертя формується у вигляді пилки. З отриманих результатів виходить, що зношена зміцнена культиваторна лапа може працювати й надалі.

Оцінено зміну напружено-деформованого стану по коерцитивній силі після експлуатації (табл. 6.9). Нанесення зміцнюючих смуг вносить зміни в рівень коерцитивної сили і вона зменшується на одному крилі на 4,3-6,3%, а на іншому збільшується 7,8-17,0%. На носовій частині коерцитивна сила підвищується на 26,0% при вимірюванні зверху лапи, та на 12,6% – з нижньої. Щодо базових культиваторних лап, то коерцитивна сила змінюється та вона стає меншою за рівнем на 9,0-13,5% по крилах та 9% на носку. З рис. 6.11 видно, що базову лапу для подальшого використання недоцільно застосовувати, а зміцнена – забезпечує запас міцності й розміри для подальшого використання. Аналізуючи рівень деформації по розміру А

(табл. 6.9) виявили, що у зміцнених культиваторних лап він змінюється на 1 мм – 0,42%, а у базової на 3 мм – 1,28%. У 3 рази змінилася деформація крил культиваторної лапи і це свідчить про стабільність роботи зміцненого покриття. В усіх досліджених культиваторних лапах відсутня пошкодженість ріжучої кромки.

Таблиця 6.9 – Зміна коерцитивної сили на зношених базових і зміцнених культиваторних лапах (згідно рис. 3.22, б)

Зразок	Умовний номер вимірювання											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Зношена зміцнена (носок)	20,6	20,5	11,5	11,2	12,3	11,8	12,1	11,9	18,7	21,5	21,0	15,4
Середні значення	15,22					11,8	17,04					15,4
Зношена зміцнена (крила)	20,5	20,0	12,3	10,7	10,5	14,3	12,1	14,0	19,6	21,4	21,7	21,7
Середні значення	14,8					14,3	17,76					21,7
Зношена базова (носок)	17,2	17,4	17,2	16,4	16,1	14,5	15,8	16,4	16,7	16,9	16,8	13,0
Середні значення	16,85					14,5	16,52					13,0
Зношена базова (крила)	17,7	17,1	16,8	16,4	15,8	17,0	15,7	16,0	16,9	17,4	17,8	16,6
Середні значення	16,76					17,0	16,76					16,6

У носку лапи відбувається деформація нанесеного покриття, форма його змінюється (рис. 6.11, б).

Виходячи з отриманих експлуатаційних результатів, можливо встановлення зміцнених культиваторних лап через одну з базовою новою. Це буде сприяти мінімізації зносу базових, так як зміцнені візьмуть на себе більше навантаження при обробках ґрунту.

Виконано додатково й проведено спеціальний аналіз при збільшенні ріжучої частини крила з максимальної поверхні тертя та виявлена її особлива структура і деформація (рис. 6.11, е, вид зверху). Після обробки 3185 га вона має вигляд «лапи птиці», де зміцнюючі смуги мали «кігтики» та це створилося за рахунок значних навантажень на мало зношену культиваторну лапу. Розмір її змінився менше ніж базової.

У подальших дослідженнях має інтерес зміцнення поверхні культиваторної лапи азотистою плазмою [304]. Застосування плазми на тонкостінних ножах для

переробки з подрібнення цукрового буряка виявило значний ефект.

6.4 Оцінка економічної ефективності розробок

Як було показано в роботі, використання додаткового модифікування рідкої ванни при нанесенні покриттів або зміцненні нових культиваторних лап використанням детонаційної шихти немагнітної фракції і бентонітової глини забезпечує підвищення експлуатаційної стійкості деталей в 2,5 рази. Це досягається за рахунок зміни умов кристалізації, подрібнення зерна, зниження напружень і формування вторинних захисних структур при терті. Одночасно спостерігається підвищення перехідної зони за рахунок формування хвилястої структури в зоні переходу покриття - основа.

Випробування зміцнених стрілочастих лап проводили на культиваторі CASE Tiger Mate господарства СТОВ «Мрія». Напрацювання склало 3185 га, згідно договору з підприємством. Зміцнені нові і звичайні культиваторні лапи встановлювались на культиватор через одну. Це було зроблено для виявлення місць однакового зношування.

В результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених, згідно схеми та технології ХНТУСГ, ресурс становить 3185га на один робочий орган. Величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм, при цьому стандартно виготовлені лапи від 39 до 86 мм. Стандартні культиваторні лапи мають більш високі за рівнем значення \sim в 2,5 рази відповідно аналогічних, де використовували зміцнені вироби на інших машинах.

Економічну ефективність [305-309] розробленої технології розглядали на прикладі зміцнення стрілочастих лап культиваторів типу Case Tiger Mate із застосуванням нової технології модифікування електродом з обмазкою бентонітовою глиною (Додаток Л).

Економічну ефективність від застосування і впровадження розробленої технології зміцнення лап культиваторів можна визначити за формулою:

$$E_3 = \left(\frac{Ц_H}{P_H} - \frac{Ц_3}{P_3} \right) P_3 \cdot N_G, \quad (6.1)$$

де E_3 – економічна ефективність від зміцнення лап, грн.;

$Ц_H, Ц_3$ – ціна нової і зміцнених лап відповідно, грн.;

P_H, P_3 – напруцювання нової і зміцнених лап відповідно, га;

N_G – обсяг досліджених зміцнюємих лап.

Ціну реалізації зміцненої з використанням розробленої технології стрілкової лапи приймає рівною собівартості її зміцнення, тобто:

$$Ц_3 = C_3 + C_H, \text{ грн.} \quad (6.2)$$

де C_3 – собівартість зміцнення лапи культиватора, грн.

Собівартість зміцнення стрілкової лапи визначають за формулою:

$$C_3 = ЗП + C_M, \quad (6.3)$$

де $ЗП$ – заробітна плата (основна і додаткова) виробничих робітників з нарахуванням, грн.;

V_M – вартість, що використовуються у їх зміцненні, грн.;

V_H – вартість нової деталі, грн.;

Заробітна плата виробничих робітників визначали:

$$ЗП = \left(\frac{T_{H1} \cdot C_{P1}}{60} + \frac{T_{H2} \cdot C_{P2}}{60} + \dots + \frac{T_{Hi} \cdot C_{Pi}}{60} \right) \cdot K_{II} \cdot K_D \cdot K_C, \quad (6.4)$$

де $T_{H1}, T_{H2}, \dots, T_{Hi}$ – норми часу на проведення операцій технології зміцнення в розрахунку на одну лапу культиватора, хв.;

$C_{P1}, C_{P2}, \dots, C_{Pi}$ – годинні тарифні ставки необхідних розрядів робіт на виконання операцій зміцнення, грн.;

K_{II} – коефіцієнт, що враховує доплату премій ($K_{II} = 1,1 \dots 1,4$);

K_D – коефіцієнт, що враховує заробітну плату (додаткову) ($K_D = 1,1 \dots 1,5$);

K_C – коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальне страхування ($K_C = 1,302$).

Розрахунки наведені в таблиці 6.10.

Таблиця 6.10 – Заробітна плата виробничих робітників при зміцненні лапи
культиватора

№ операції	Найменування операції	Норма часу на виконання, год	Годинна тарифна ставка, грн.	Заробітна плата на операцію, грн.
Підготовка електроду				
05	Термічна	1,5	50,18	3,75
10	Виготовлення суміші	0,1	37,5	3,75
15	Нанесення суміші на електрод	0,1	37,5	3,75
20	Сушильна	24	-	-
25	Термічна	1,5	50,18	3,75
Всього:				15,00
Операція зміцнення				
30	Слюсарна (зачищення й розмічення)	0,2	63,67	12,7/3
35	Зварювальна (наплавлювальна)	0,1	76,20	7,62/3
Всього:				6,77
Разом:				21,77

Вартість модифікуючих матеріалів визначали за формулою:

$$B_M = \sum_{i=1}^{\lambda} g_i \cdot C_i, \quad (6.5)$$

де g_i – норма витрати i -го матеріалу на одну лапу при зміцненні;

λ – кількість матеріалів, що застосовуються при зміцненні, шт.;

C_i – ціна 1 кг i -го матеріалу, грн.

Для полегшення розрахунків склали таблицю 6.11.

Таблиця 6.11 – Вартість матеріалів, що застосовуються при зміцненні

Найменування матеріалу	Норма витрат, гр (шт.)	Ціна 1 кг (шт.) матеріалу, грн.	Витрати на матеріали, грн.
1. Бентонітова глина	1,375	109,00 (1 кг)	0,15
2. Клей ПВА	1,875	18,30 (200гр)	0,17
3. Електрод Т-620 Ø5мм	1/3	150,00 (25,00 грн/шт)	8,34
Разом			8,66

Таким чином, ефективність впровадження розробленої технології зміцнення (1) в розрахунку на одну стрілчасту лапу складе:

$$E_3 = 162,75 \text{ грн.}$$

За даними підприємств Харківської області на її території знаходиться не менше 10 культиваторів типу Case Tiger Mate (121 лапа на одному агрегаті). Таким чином, річна (мінімальна) програма зміцнення даних деталей складе не менше 1210 шт.

Тоді економічна ефективність впровадження розробленої технології зміцнення в розрахунку на дану кількість зміцнюємих лап складе:

$$E_3 = 162,75 \cdot 1210 = 196927,5 \text{ грн.}$$

Термін окупності капітальних вкладень визначається за формулою:

$$T_{OK} = K / E_3, \quad (6.6)$$

де K – капітальні вкладення на обладнання, включаючи витрати на його доставку, монтаж і налагодження, грн.

$$T_{OK} = 52000 / 196927,5 = 0,26$$

Показники оцінки розробленого технологічного процесу зміцнення стрілчастих лап культиваторів типу Case Tiger Mate зведені в таблицю 6.12.

Таблиця 6.12 – Показники оцінки розробленої технології зміцнення стрілчастих лап культиваторів

Найменування показників	Позначення	Розглянутий варіант	
		нова лапа	зміцнена
1	2	3	4
1. Річний обсяг зміцнюємих лап, шт.	$N_{Г}$	-	1210
2. Ціна нової лапи, грн.	$Ц_{Н}$	192,2	-
3. Собівартість зміцнення лапи, грн.	$С_{З}$	-	52,88
4. Ціна зміцненої лапи, грн.	$Ц_{З}$	-	245,1
5. Напрацювання нової лапи, га	$P_{Н}$	1500	-
6. Напрацювання зміцненої лапи, га	$P_{З}$	-	3185
7. Економічна ефективність, грн.	$E_{З}$	-	196927,5
8. Термін окупності капітальних вкладень, років	$T_{ОК}$	-	0,26

ВИСНОВКИ

1. Модифікування пластичного мастила детонаційною шихтою від утилізації боєприпасів зменшує задири при експлуатації в різьбових з'єднаннях в 2 рази, збільшуючи їх експлуатаційну стійкість. Випробуваннями на знос при робочих навантаженнях 0,05-0,45 кН встановлено, що при використанні добавки детонаційної шихти істотно зменшується не тільки число задири, а й вони з'являються тільки при 0,45 кН. При модифікуванні мастила графітом задири фіксували при навантаженні до 0,35 кН, а без використання модифікаторів – вже при 0,25 кН. За рівнем розвитку пошкоджуваності використання детонаційної шихти також забезпечує зменшення цього показника.

2. В результаті проведених досліджень розроблений і запропонований новий спосіб зміцнення культиваторних лап. Спосіб полягає в нанесенні зміцнюючих смуг на носок з лицьового боку лапи і з тильної – на її крилах. Згідно аналізу процесів зношування, оптимальним є нанесення наплавленням зміцнюючих смуг на носок

розміром 20 мм, а на крила – 12-15 мм з відстанню між ними не менше 10 мм, щоб запобігти перекриття зон термічного впливу.

3. Порівняльними стендовими випробуваннями на зношування показано, що модифікування покриттів в процесі їх нанесення немагнітної фракцією детонаційної шихти забезпечує зниження напружень, розмір зерна, подрібнення фази карбіду і формування хвилястої міцнішої зони покриття – основа.

4. Встановлено, що наплавлення з додатковим модифікуванням рідкої ванни бентонітовою глиною також знижує рівень напружень, що формуються в покритті і значення коерцитивної сили на 26-42%.

5. Показана можливість використання для модифікування природного продукту – глини і вторинної сировини – немагнітної фракції детонаційної шихти з алмазної фракцією від утилізації боєприпасів. При введенні глини і шихти в покриття методом наплавлення, зносостійкість підвищується в 1,3 і 2 рази відносно покриття, виконаному тільки електродом, а також відносно вихідного матеріалу культиваторної лапи в 2 і 3 рази відповідно.

6. В результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених згідно схеми та технології ХНТУСГ, напрацювання досягає 3185 га на один робочий агрегат. Величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм, при цьому стандартно виготовлені лапи від 39 до 86 мм. Стандартні лапи мають більш високі за рівнем значення в $\approx 2,5$ рази. Це забезпечується за рахунок зміни структури, фізико-механічних властивостей (мікротвердість, коерцитивна сила, міцність зчеплення покриття з основою), зменшення напружень на 26-42% та формування принципово нової структури, яка утримує стабільну роботу ріжучої кромки при деформації в процесі тертя. Однак формування особливої структури деформації на ріжучих кромках з двох сторін зміцненої лапи у вигляді «птичих лап з кігтями» з часткою покриття в зоні тертя забезпечує досить стабільну структуру в експлуатації.

7. Розрахунок економічної ефективності по НКТ відсутній, оскільки ефективність визначається виключенням витрат на додаткове введення графіту в пластичне мастило. При цьому не враховується ціна модифікатора, він є вторинною

сировиною (детонаційна шихта від утилізації боєприпасів). Економічна ефективність впровадження розробленої технології зміцнення в розрахунку на 1210 шт. лап складе 196927,5 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені нові науково обґрунтовані експериментальні та теоретичні результати, промислові випробуваннями, які узагальнюють і забезпечують вирішення поставленої актуальної науково-технічної проблеми – підвищення стійкості виробів різного призначення із застосуванням модифікуючих домішок.

В роботі розглянуто напрями використання домішок: у спряженнях на прикладі НКТ та введенням їх у рідку ванну при наплавленні покриттів для культиваторних лап.

1. Узагальнено інформацію, нормативно-технічну документацію на виробництво НКТ. Показано, що рекомендовані марки сталей у процесі виробництва труб слід піддавати прискореному (спрейерному) охолодженню у валках редуційного стану шляхом уповільненої швидкості їх обертання. Отримані результати досліджень базувалися на закономірностях взаємозв'язку параметрів структури металу: морфології феритних зерен, оцінки частки структурних складових (фериту, перліту, карбідів, бейніту), а також мінливості щільності дислокацій і механічних властивостей. Важливими напрямками підвищення корозійної стійкості НКТ зі сталі Р-110 є аналіз впливу на середовище й умови експлуатації.

Витрати на ліквідацію аварій досягають 30% від видобутку газу й нафти. Згідно даним статистики, кількість аварійних ситуацій у ряді випадків досягає 80% від загального числа відмов. При цьому, найбільша частка аварій припадає на різьбові з'єднання (втрата герметичності, руйнування, корозія), яка досягає 50%.

У літературі відсутній аналіз структурної деградації металу НКТ та напружень, який здійснювали контролем його неруйнівним методом.

2. Для підвищення працездатності й економічної ефективності експлуатації сталевих стрілочастих лап сільськогосподарської техніки і НКТ – зі спеціальної, використовували різні методи зміцнення як на стадії наплавлення заготовки, так і їх виготовлення при нових конструктивних та технологічних рішеннях в машинобудуванні.

Для методів зміцнення та відновлення культиваторних лап використовували металографічні дослідження та оцінювали фазовий склад, розподіл компонентів і фізико-механічні властивості. Теоретично розглядали взаємодію фаз та їх вплив на деградацію в процесі експлуатації.

Для підвищення експлуатаційних властивостей деталей такого призначення, запропоновано використовувати однакову для двох напрямів досліджень детонаційну домішку при їх виробництві, обслуговуванні та експлуатації.

Для застосування порошкову композицію просівали через сито з комірками до 10-20мкм, а потім використовували. Частка порошкової суміші стосовно мастила є оптимальною при її введенні +20-30% до мастила, а у зміцнююче покриття культиваторних лап 6-8% від частки електроду.

3. Для модифікування рідкої ванни при наплавленні досліджували вплив немагнітної фракції детонаційної шихти та природного матеріалу – бентонітової глини. Для цього використовували електроди Т-590, Т-620. Встановлено оптимальну частку введення домішок, яка складає 6-8%. Детонаційна шихта, яку оцінювали локальним спектральним методом, складається з дисперсних та наноалмазів (3,37-3,43% С) й інших компонентів (S, Ca, Mg, K, Na, Fe, O) сумарно до 10%. Хімічним аналізом всієї частки шихти виявлено, що найбільшу концентрацію мають компоненти С, Cu (3,14%) та Fe (2,9%). Частка модифікатора глини (6% домішки) при наплавленні становила, %: 0,099-0,132 Fe, 0,015-0,02 K, 0,009-0,012 Ca, 0,0036-0,0048 S, 0,012-0,016 Mg, 3,29-4,39 Si, 1,94-2,59 Al, 0,018-0,024 Na.

4. Показано, що істотну роль, в експлуатації відіграє розвиток напруженого стану у верхній частині колони НКТ, що призводять до деформації (розтягування) труб у цій зоні.

У результаті значних деформацій в трубах колони інтенсифікуються пороутворення, дифузія вуглецю (за рахунок руйнування цементиту перлітної складової) і вуглекислотна корозія, які виявляються не тільки на поверхні металу труб, але й по їх перетину. При цьому, анодами можуть бути границі зерен, що містять вільний вуглець, карбідні фази й неметалеві включення, що мають відмінні електрохімічні потенціали та міцність.

Підвищена концентрація вуглецю, пороутворення й насичення поверхні елементами, що входять до складу активно-корозійного середовища, призводять до деградації металу НКТ особливо на внутрішній поверхні, а також визначають поріг розтягувальних напружень, що ініціюють виникнення вуглекислотної корозії в добувних свердловинах.

Зношування ріжучих кромок лап культиваторів є необоротним процесом під час взаємодії із ґрунтом при виконанні робіт. Величина й характер зношування визначаються зміною розподілу напружень на робочих поверхнях. Культиваторні лапи зношуються нерівномірно та товщина у всіх зонах відрізняється. Це пов'язано з тим, що вони працюють у різних умовах, ґрунтах. Спостерігається їх перекіс при закріпленні на стійці культиватора. Деякі лапи мали потертості у зоні кріплення.

5. Для контролю деградаційних явищ та напруженого стану рекомендовано використовувати магнітний неруйнівний контроль згідно показників за коерцитивною силою. Для цього розроблено спеціальну систему вимірювань, яка базується на статистичних дослідженнях коерцитивної сили (H_c), і зі зміною часу та параметрів відбувається розвиток деградаційних явищ. Такі виміри статистично проводили для макро- і мікрозон зміцненого та вихідного стану.

Дослідженнями встановлено, що неоднорідність деградаційних явищ в НКТ відбувається у 14 верхніх трубах, а у стрілчастих лапах у різних напрямках до 25-30% та 70%. Результати досліджень дозволили визначити межу бракувальної норми, яка становить 10% зміни показань H_c . При цьому вище цього рівня підвищуються напруження, а нижче відбуваються деградаційні зміни, що не дозволяють використовувати додаткове відновлення наплавленням робочої поверхні.

6. Виконані комплексні дослідження з використання детонаційної шихти, отриманої від утилізації боєприпасів, для введення в пластичне мащення різьбових з'єднань у спряження та при компонуванні колон НКТ, показали їх більшу ефективність, ніж графіту. При цьому найбільш оптимальною є фракція 10-20 мкм, яка забезпечує формування «кишень» для зберігання мастила й збільшує зносостійкість в 2 рази. Такий модифікатор для пластичного мастила також зменшує

схильність з'єднань, що сполучаються, до схоплювання при експлуатації за рахунок підвищеної в ньому концентрації кисню.

Для стабільної експлуатації різьбових з'єднань (зменшення впливу вібрацій) частка такої домішки повинна бути на рівні 20-30% від частки мастила.

На основі цього запропонований метод визначення оксидних захисних плівок, їх товщини та якості. Статистичними оцінками за мікрорентгеноспектральним аналізом при зіставленні вигладженої зони враховували і «кишені» для утримання мастила, якість основного металу. Встановлено, що при використанні запропонованого модифікатора захисні оксидні плівки на поверхні тертя становлять від 0,32 мкм до 1,34 мкм у різних зонах і періодах експлуатації.

7. Додаткове введення шихти з алмазною фракцією при модифікуванні рідкої ванни призводить до формування локальних мікроохолоджувачів. Це сприяє подрібненню структури цементита перліту, забезпечує її однорідність, підвищує фізико-механічні властивості не менше ніж на 23-25%.

Для модифікування рідкої ванни при зміцненні досліджували різні методи – обмазкою електроду та шлікерне покриття.

Вперше досліджена можливість використання природної модифікуючої домішки – бентонітової глини. При введенні глини в рідку ванну формується мартенситна структура відпуску матриці. При такому модифікуванні не виявлене формування яких-небудь дефектів. При введенні глини в наплавлення структура на поверхні й у середній частині покриття більш однорідна, матриця мартенситна, та це забезпечує підвищення мікротвердості з HV-50-776 до HV-50-960.

Показано, що при відновленні наплавленням тонкостінної культиваторної лапи практично повністю вона проплавляється, а при введенні модифікуючої домішки зберігається до 50% основного металу, що мінімізує схильність такого виробу до накоплення напружень, пошкоджуваності й сприяє підвищенню експлуатаційної стійкості. Додаткове модифікування такою глиною при нанесенні покриття практично не змінює вміст вуглецю в карбідах і відповідає Me_7C_3 а також Me_xC_y у всіх зонах, що зіставляються (верх покриття, середина й перехідна).

8. Вперше досліджена і показана ефективність використання природної речовини – бентонітової глини, яка дає можливість при наплавленні зміцнюючих покриттів підвищити зносостійкість у 2,5 рази, зменшити рівень напружень та контролювати і корегувати процес їх одержання, згідно неруйнівного контролю якості за коерцитивною силою. Виявлена поведінка покриття при експлуатації. Показано, що нанесені смуги деформуються в процесі інтенсивного зношування та формують особливу структуру. Форма культиваторної лапи змінюється мінімально, створюється новий характер та структура поверхні тертя. Очікувана економічна ефективність від впровадження розробленої технології зміцнення в розрахунку на 1210 шт. лап (10 культиваторів) складе 196927,5 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 633 Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия. [Введ. 1983-01-01]. М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 42с. (Трубы насосно-компрессорні і муфти до них. Технічні умови.)
2. РД 39-014714-86 Инструкция по эксплуатации насосно-компрессорных труб. [Введ. 1986-11-20. Срок действия: 1989-11-20.]. Куйбышев, 1987. 46с. (Інструкція по експлуатації насосно-компрессорних труб.)
3. API Spec 5CT. Specification 5CT/ISO 11960, Specification for casing and tubing - Eighth edition - Petroleum and natural gas industries - Steel pipes for use as casing or tubing for wells (Специфікація 5CT/ISO 11960, Специфікація на обсадні та насосно-компрессорні труби – Восьме видання – Нефтяна і газова промисловість – Сталеві труби для використання в якості обсадних труб або труб для свердловин).
4. ГОСТ 23979 Переводники для компрессорных труб. Технические условия. [Введ. 1983-01-01]. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. 17с. (Перевідники для компрессорних труб. Технічні умови.)
5. Влияние состава и режимов проката на механические свойства труб из среднеуглеродистых низколегированных сталей / П.Ю. Горожанин, Е.С. Черных, В.А. Хотинов, С.Ю. Жукова, В.М. Фарбер. *Производство проката*. 2005. №12. С. 27-31.
6. Изыскание составов и режимов термической обработки обсадных и насосно-компрессорных труб высокой прочности / Н.Т. Тихонцева, П.Ю. Горожанин, С.Ю. Жукова, М.Н. Лефлер, В.М. Фарбер. *Сталь*. 2006. №8. С. 70-73.
7. Фарбер В.М., Жукова С.Ю., Горожанин П.Ю. Влияние параметров проката на структуру и механические свойства горячекатаных труб. *Труды XIII Международной научно-практической конференции «Трубы-2005». Сборник докладов*. Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2005. С. 238-242.
8. Способ прокатки труб с термомеханической обработкой: пат. 2291903 РФ. МПК С 21D 8/Ю. приор. 15.07.2005, опубл. БИ, 2007, №2.
9. Устройство для охлаждения труб: пат. 2291906 РФ. МПК С 21D 8/10. приор. 15.07.2005. опубл. БИ, 2007, №2.

10. Устройство для воздушного охлаждения: пат. 2295579 РФ. МПК С 21D 1/667. приор. 15.07.2005. опубл. БИ, 2007, №8.
11. Пинчук С.И., Балакин В.Ф., Тышкевич Д.Г. Пути повышения коррозионной стойкости насосно-компрессорных труб. *Теория и практика металлургии*. 2012. № 1/2. С. 21-24.
12. Energy API [Electronic resource]: American petroleum institute / API.: веб-сайт. URL: <http://www.api.org> (дата звернения: 12.13.2021).
13. Проскурин Е.В. Защитные покрытия: качество и долговечность труб. *Национальная металлургия*. 2003. №15. С.69-78.
14. Sumitomo Metals [Electronic resource]: Pipe and Tube Company / Sumitomo Metals; webdesign&webdevelopment by Virtua: веб-сайт. URL: <http://www.sumitomo-tubulars.com> (дата звернения: 12.13.2021).
15. Tenaris [Electronic resource]: Tenaris. : веб-сайт. URL: <http://www.tenaris.com> (дата звернения: 12.13.2021).
16. Изыскание составов и режимов термической обработки обсадных и насосно-компрессорных труб высокой прочности / Н.Т. Тихонцева, П.Ю. Горожанин, С.Ю. Жукова, М.Н. Лефлер, В.М. Фарбер. *Сталь*. 2006. №8. С.70-73.
17. Разработка композиций сталей для труб нефтяного сортамента групп прочности «Д» и «К» / П.Ю. Горожанин, Е.С. Черных, С.Ю. Жукова, В.А. Хотин, К.А. Лаев, В.М. Фарбер. *Сталь*. 2006. №8. С.85-86.
18. Эффективное покрытие для повышения эксплуатационной надежности труб в осложненных условиях нефтегазодобычи / Е.В. Проскурин, В.И. Большаков, Т.А. Дергач, И.В. Петров, В.Б. Дмитриев. *Сталь*. 2013. № 9. С. 64.
19. Козлов А.В. Коррозия стального проката (по стандартам США и материалам американских и японских фирм). *Производство проката*. 2004. № 8. С. 32 -38.
20. Завьялов В.В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений. М.: ООО «ВНИИОНГ», 2005. 332 с.
21. Проскурин Е.В., Дергач Т.А., Сюр Т.А. Пути повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности труб нефтяного сортамента. *Сталь*. 2003. № 2. С. 74 -75.

22. Повышение эксплуатационной надежности и долговечности труб нефтяного сортамента - главная задача сегодняшнего дня / Е.В. Проскуркин, Т.А. Дергач, Г.Д. Сухомлин и др. *Производство проката*. 2003. № 10. С. 26 -35.

23. Тополянский П.А. Использование нанотехнологий при изготовлении деталей трубопроводной арматуры. *Технологии обработки поверхности*. 2010. 2 (65). С. 70-75.

24. Левашов Е.А. Многофункциональные наноструктурные пленки: веб-сайт. URL: www.popnano.ru/science/index.php?task=view&id=43&limitstart=2 (дата звернения: 12.13.2021).

25. Оборудование и технология нанесения воздушно-плазменных покрытий – основные научно-технические результаты достижения / В.П. Валувев, Г.К. Петров, Ю.В. Сабельников, В.Я. Фролов, Б.А. Юшин. *Инструмент и технологии*. 2010. №30. С.10-23.

26. Клубникин В.С., Карасев М.В., Петров Г.К. Плазменное напыление покрытий в активных средах. Л.: Изд-во ЛДНТП, 1990. 19с.

27. Дронов В.С., Селиверстов Г.В. Кинетика развития усталостной повреждаемости в малоуглеродистой стали. *Изв. ТулГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование*. Тула, 2006. Вып. 7. С.207-212.

28. Дронов В.С., Селиверстов Г.В. Структурная повреждаемость в пластических зонах ферритно-перлитных и аустенитно-мартенситных сталей при усталости. *Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки*. Тула, 2009. Вып. 2. С.199-206.

29. Сандаков В.А. Работоспособность длительно эксплуатируемых трубопроводов системы газоснабжения. *Нефтегазовое дело*. 2008. Том 6, №2. С.113-116.

30. Ямалеев К.М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепроводов. М.: ВНИИОЭНГ, 1990. 64с.

31. Механизм распада цементита при пластической деформации стали / В.Г. Гаврилюк, Ю.Л. Плужкин и др. *Физика металлов и металловедение*. 1981. Т. 51. №3. С.147-151.

32. Старение металлов нефтепроводов. / А.Г. Гумеров, Г.С. Зайнуллин, К.М.

Ямалеев и др. М.: Недра, 1995. 222с.

33. Ямалеев К.М., Сандаков В.А. Распад цементита в металле труб газопроводов системы газоснабжения. *Нефтегазовое дело*. 2008. Том 6, №2. С.97-98.

34. Дмитриев В.Ф., Мурзаханов Г.Х., Филиппов Г.А. Оценка остаточного ресурса нефтепровода и планирование его капитального ремонта. *Строительство трубопроводов*. 1997. №3. С. 21-24.

35. Филиппов Г.А., Ливанова О.В., Дмитриев В.Ф. Дegradaция свойств металлов при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов. *Сталь*. 2003. №2. С. 84-87.

36. Филиппов Г.А., Ливанова О.В. Влияние силовых условий эксплуатации трубопроводов на механические свойства и сопротивление разрушению металла трубопроводов. *Сталь*. 2003. №7. С.80-83.

37. Филиппов Г.А., Ливанова О.В. Взаимодействие дефектов структуры и деградация свойств конструкционных материалов. *Материаловедение*. 2002. №10. С.17-21.

38. Изотов В.И., Поздняков В.А., Филиппов Г.А. Влияние и механизм образования хрупких микротрещин в феррито-перлитной трубной стали при растяжении в условиях наводораживания. *ФММ*. 2001. Т. 91, № 5. С. 84-89.

39. Effective Technological Process of Crystallization of Turning Rollers' Massive Castings: Development and Analysis / T. Skoblo, O. Klochko, E. Belkin, A. Sidashenko. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2017. 2(3). P. 34-39.

40. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»*. Орел: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2017. № 4 (17). С. 141-150.

41. Спосіб виробництва прокатних валків: пат. 105761 Україна: МПК (2016.01) B21B 27/00 B22D 23/00. / Т.С. Скобло, А.К. Автухов, О.І. Сідашенко, О.Ю. Клочко, Ю.Л. Белкін, Р.Г. Соколов. у 2015 07442; заявл. 24.07.2015 ; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7.

42. Muller-Lorenz E.M., Grabke H.J. Cocking by metal dusting of steels. *Mater. Corros.* 1999. V.50. P.614-621.
43. Grabke H.J. Metal Dusting of Low - and High-Alloys Steels. *Corros.* 1995. V.51. №9. P.711-720.
44. Зайцев А.И. Самопроизвольное превращение в порошок металлических материалов в активных углеродсодержащих газовых средах. *Сталь.* 2001. №12. С.60-64.
45. Термодинамический анализ равновесий в сплавах системы Fe-Cr-C для прогнозирования их устойчивости к разрушению в активных углеродсодержащих газовых средах. / Ю.Л. Альшевский, О.В. Бакланова, А.И. Зайцев и др. *Неорганические материалы.* 2005. Т.41. №2. С. 177- 184.
46. Чуканов А.Н., Яковенко А.А. Развитие деградации и начальные стадии повреждаемости малоуглеродистой стали при деформации. *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки.* 2010. Вып. 1. С. 160-166.
47. Жаркова Н.А., Бовтина Л.Р., Тютин М.Р. Стадийность накопления повреждений в низкоуглеродистой стали в условиях одноосного разряжения. *Металлы.* 2007. №3. С. 64-71.
48. Левин Д.Д., Чуканов А.Н., Муравлёв Л.В. Исследование повреждаемости трубных сталей по эффектам неупругой релаксации. *Вестник Тамбовского университета.* 1998. Т.3. Вып. 3. С.315-318.
49. Чуканов А.Н. The complex analysis of substructural processes of degradation and destruction of metal on the basis of the internal friction`s data / *DFM 2006/ Book of articles.* Moscow: Intercontact Nauka, 2006. P. 82-84.
50. Дмитрах І.М., Панасюк В.В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 1999. 341с.
51. Вплив напружень на електрохімічну корозію сталі у водних середовищах / Романов О.М., Б.Я. Генека, О.М. Гута, В.О. Василечко. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 1996. №6. С.83-95.
52. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. / А.Г. Гумеров, К.М.

Ямалеев, Г.В. Журавлёв и др. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 231с.

53. Iutyńska G.A., Purish L.M., Abdulina D.R. Corrosive-relevant sulfidogenic microbial communities of man-caused ecotopes. Lambert Academic Publishing. 2014. 173 p. (In Russian).

54. Nazina T.N., Shestakova N.N., Grigor'yan A.A. et al. Phylogenetic diversity and activity of anaerobic microorganisms of high-temperature horizons of the Dagang Oil Field (P.R. China). *Microbiology*. 2006. 75(1). P. 55–66. (In Russian).

55. Torres-Sanchez R., García-Vargas J., Alfonso-Alonso A., Martínez-Gómez L. Corrosion of AISI 304 stainless steel induced by thermophilic sulfate-reducing bacteria (SRB) from a geothermal power unit. *Mater. Corros.* 2001. 52(8). P. 614–618.

56. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие / Под общ. ред. В.В. Панасюка. Киев: Наука, думка, 1990. Т. 4. 680 с.

57. Golovin S.V. On experience of sour oil pipeline construction at Tenguiuz oilfield. *VNIISTs Reports on pipes and pipeline welding for VNIIST, NKK and Kobe Steel seminar*. Moscow: VNIIST, 1991. 11 p.

58. Trucbon M.L.R., Crolet J.L. Experimental limits of sour service for tubular steels. *SSC Symposium*. Saint-Cloud, 1991. 21 p.

59. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 240 с.

60. Зайкова В.А., Шур Я.С. О влиянии растяжения на магнитные свойства и кривые магнитострикции кремнистого железа. *ФММ*. 1966. Т. 21. Вып. 5. С. 664-673.

61. Zeistner K., Notzon H. Verlustmessungen unter tangentialen mechanischen Spannungen im Elektrolechpaket. *ETZ - A*. 1966. Bd 87. H. 19. P. 701-706.

62. Намитоков К.К., Брезинский В.Г. Влияние растягивающих нагрузок на кривую намагничивания листовых электротехнических сталей. *Электротехника*. 1967. № 2. С. 49-51.

63. Корзунин Г.С., Уварова М.П. Определение внутренних напряжений в листах горячекатаной трансформаторной стали. *Дефектоскопия*. 1969. № 4. С. 131-140.

64. Дружинин В.В. Влияние упругого изгиба пластин на магнитные характеристики электротехнической стали. *Электротехника*. 1973. № 7. С. 50-57.

65. Brailsford F., Abu-Eid Z.H.M. Effect of tensile stress on the magnetic properties of grain-oriented silicon-iron lamination. *Proc. Inst. Electr. Engrs.* 1963. V. 110. № 4. P. 751-757.

66. Корзунин Г.С., Пужевич Р.Б., Цырлин М.Б. Влияние механических напряжений на магнитные свойства анизотропной электротехнической стали. *Физика металлов и металловедение.* 2007. Том 103, № 2. С. 147-156.

67. Обзорная оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла больших размеров объектов и конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом / Г.Я. Безлюдько, О.П. Завальнюк, В.Б. Нестеренко, А.Ю. Марченко, Р.Н. Соломаха. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* 2012. № 3. С. 57-65.

68. Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций / Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько, Е.И. Елкина, Р.Н. Соломаха. *В мире неразруш. контроля.* 2009. 44, № 2. С. 26–29.

69. Применение коэрцитиметрии для мониторинга продольной прочности корпуса судна в условиях эксплуатации. / Г.Я. Безлюдько, Е.И. Елкина, Р.Н. Соломаха и др. *В мире неразруш. контроля.* 2011. 53, № 3. С. 13–17.

70. Безлюдько Г.Я. Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы металла. *В мире неразруш. контроля.* 2004. № 1. С. 20–22.

71. Оперативный контроль напряженного и усталостного состояния сварных соединений неразрушающим методом по магнитной характеристике металла – коэрцитивной силе. / Г.Я. Безлюдько, В.Е. Долбня, Б.Е. Попов, Р.Н. Соломаха. *В мире неразруш. контроля.* 2006. № 1. С. 58–59.

72. Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Попов Б.Е. Радикальное улучшение оценки текущего состояния кислородных баллонов применением метода коэрцитивной силы (по результатам исследований 1990–2000 гг.). *В мире неразруш. контроля.* 2011. № 3. С. 34–35.

73. Myndiuk V.D., Dotsenko Ye.R., Prysiazhniuk P.M. Особенности

неразрушающего контроля изменений структуры и механических свойств трубных сталей по комплексу структурночувствительных параметров. *Научни известия на НТСМ*. 2016. Year / Година XXIV. Number / Бор. 1 (187). С. 314-318.

74. Myndyuk V.D., Karpash O.M., Karpash O.M. Character of the Relationship Between the Microstructure and Physicomechanical Properties of Steels of Long-Term Operation. *Material Science*. 2014. V.49, №4. P. 560 – 565.

75. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями / И.Н. Бирилло, А.Я. Яковлев, Ю.А. Теплинский, И.Ю. Быков, В.Н. Воронин / Под общей ред. И.Ю. Быкова. М.: Изд. ЦенрЛитНефтеГаз, 2008. 168 с.

76. Гриб В.В. Диагностика технического состояния оборудования нефтегазохимических производств. М.: Изд-во ЦНИИТЭнефтехим, 2002. 302 с.

77. Применение магнитного метода для оценки напряженного состояния стальных конструкций / Р.В. Агинеи, Ю.А. Теплинский, А.С. Кузьбожев, Н.П. Богданов. *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2004. Выпуск 27. С. 95–97.

78. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (Часть 1). *Дефектоскопия*. 2001. Ч.1. №11. С.51-57.

79. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н. Напряжения и деградация структуры, формируемые в насосно-компрессорных трубах при эксплуатации. Монография. Харьков: ООО «ПромАрт», 2018. 152с.

80. Аксенов П.И. Машины для обработки почвы. Москва, 1985. 268 с.

81. Балабанов В.Д. Агрегаты для предпосевной обработки почвы. Лучшие среди равных. *Актуальные агросистемы*. 2016. № 10. С. 18-19.

82. Беляков И.И. Агротехника важнейших зерновых культур. Москва, 1983. 312 с.

83. Лаврухин В.А., Терещенко И.С., Черкашин Н.В. Основная и предпосевная обработка почвы. Москва, 1975. 320 с.

84. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. Москва, 1970. 252 с.

85. 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.

86. Анализ напряжённого состояния и технологические способы повышения ресурса стрелчатых лап культиваторов / И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, А.Д. Мартыненко, А.В. Сайчук. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2016. №6. С. 118-131.

87. Ахметшин Т.Ф. Повышение износостойкости и долговечности стрелчатых лап культиваторов: дисс. ... канд. тех. наук. Москва, 1988. 245 с.

88. Зайцев С.А. Повышение износостойкости рабочих поверхностей лап культиватора газопламенным напылением с последующим оплавлением: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2013. 164 с.

89. Люляков И.В. Разработка технологии восстановления стрелчатых лап культиваторов путем замены режущей части: дисс. ... канд. тех. наук. Саратов, 2005. 192с.

90. Лялякин В.П. Соловьев С.А., Аулов В.Ф. Состояние и перспектива упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами. *Труды ГОСНИТИ*. 2014, Т. 115. С. 96-104.

91. Михальченков А.М., Феськов С.А. изнашивание стрелчатых лап посевного комплекса Morris, восстановленных способом термоупрочненных «компенсирующих элементов». *Тракторы и сельхозмашины*. 2013, №12. С. 50-52.

92. Поливаев О.И., Костиков О.М. Испытание сельскохозяйственной техники и энергосиловых установок: Учебное пособие. Санкт-Петербург, 2016. 280 с.

93. Сидоров С.А. Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемых в сельском и лесном хозяйствах: дисс. ... док. тех. наук. Москва, 2007. 441 с.

94. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Виноградов В.В., Басинюк В.Л. Особенности зажигания электрической дуги при карбовибродуговом упрочнении

рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Техника и оборудование для села*. 2016, № 4. С. 34-38.

95. Халанский В.М., Горбачев И.В. *Сельскохозяйственные машины*. Москва, 2003. 624 с.

96. Способ изготовления лап культиваторов: авторское свидетельство 1296272. №3921826; заявл. 02.07.1985; опубл. 15.03.1987.

97. Способ изготовления лап культиваторов: авторское свидетельство 1734912. №4863084; заявл. 29.08.1990; опубл. 23.05.1992.

98. Способ изготовления лап культиваторов: авторское свидетельство 1819725 №4940104; заявл. 08.04.1991; опубл. 07.06.1993.

99. Ткачев В.Н. Износ и повышения долговечности деталей сельскохозяйственных машин. Москва, 1971. 264 с.

100. Ткачев В.Н. Износ и повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Москва, 1964. 167 с.

101. Ткачев В.Н. Износ рабочих органов почвообрабатывающих машин и некоторые методы увеличения срока их службы: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Новочеркасск, 1965. 22 с.

102. Рабинович А.Ш. Самозатачивающиеся плужные лемеха и другие почворезущие детали машин. Москва, 1962. 107 с.

103. Рабинович И.П. Износ деталей сельхозмашин и пути повышения их износостойкости. *Повышение долговечности машин*. Москва. 1956. С. 43-48.

104. Рабинович А.Ш. Повышение работоспособности и сроков службы режущих рабочих органов машин путем обеспечения их самозатачивания. *Повышение надежности и долговечности сельскохозяйственных машин*. Москва, 1964. С. 342-553.

105. Повышение износостойкости и долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин: материалы конференции. Минск, 1967. 184 с.

106. Рабинович А.Ш., Винокуров В.Н. Анализ изнашивания культиваторных лап. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1963. № 6. С. 27-29.

107. Канивец И.Д. Исследование износа лап культиваторов с однородными и наплавленными сортаментом лезвиями в условиях черноземных почв Центральной степи УССР: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Харьков, 1956. 19 с.

108. Подкатилов К.Е. Динамические исследования рабочих органов культиваторов повышенной долговечности и износостойкости с нижним и верхним упрочнением твердыми сплавами: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1969. 28 с.

109. Подкатилов К.Е. К вопросу самозатачивания культиваторных лап с верхним упрочнением твердым сплавом. *Проектирование рабочих органов уборочных почвообрабатывающих с.-х. машин, агрегатов для кормопроизводства: Межвузовский сб. ВИСХОМ*. Ростов-на-Дону, 1982. С. 98-104.

110. Рабинович А.Ш., Винокуров В.Н. Разработка и испытания самозатачивающихся лап культиваторов. *Тракторы и сельхозмашины*. 1960. №11. С. 19-24.

111. Ермолов Л.С. Повышение надежности с.х. техники. Москва, 1979. 255 с.

112. Розенбаум А.Н. Повышение долговечности режущих деталей почвообрабатывающих машин путем применения биметаллов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1967. 176 с.

113. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники: Нормативно-справочный материал. Ч. 1,2. Москва, 1998. 470с.

114. Подкатилов К.Е. Повышение износостойкости самозатачивающихся рабочих органов культиваторов. *Повышение надежности и долговечности с.х. машин*. Москва, 1969. С. 374-377.

115. Производство культиваторных лап: веб-сайт. URL: <http://granit-agro.ru/techandprod.html> (дата обращения: 14.03.2021).

116. Селезов А.В., Кашайкин С.И., Добрин Д.А. Повышение ресурса и износостойкости стрельчатых лап культиватора методом наплавки износостойких валиков. *Академия педагогических идей «Новация»*. Серия: Студенческий научный

вестник. 2018. № 01 (январь). : веб-сайт. URL: <http://akademnova.ru/page/875550> (дата обращения: 14.03.2021).

117. Лялякин В. П., Соловьев С.А, Аулов А.В. Состояние и перспективы упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами. *Сварочное производство*. 2014. №7. С. 32-36.

118. Сенчишин В.С., Пулька Ч.В. Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор). *Автоматическая сварка*. 2012. №9. С.43-54.

119. Газотермическое напыление. Учеб. пособие под общ. ред. Л.Х. Балдаева. Москва, 2007. 344 с.

120. Козаровец Н.В., Бетень Г.Ф., Анискович Г.И., Гордиенко А.И., Голубев В.С., Давидович А.Н. Инновационные технологии упрочнения деталей сельскохозяйственной техники. *Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: Сборник докладов XII Международной научно-технической конференции 10-12 сентября 2012, г. Углич*. С. 219-228.

121. Мочалов И.И. Ремонт сельскохозяйственных машин. Москва, 1984. 255 с

122. Ткачев В.Н. Новый метод упрочнения режущих органов почвообрабатывающих машин. Киев, 1962. №4. С.38-41.

123. Фаюршин А.Ф., Хакимов Р.Р. Особенности получения износостойкого слоя газопламенным упрочнением. *Материалы V Международной научно-практической конференции «Ремонт. Восстановление. Реновация»*. Уфа, 2014. С. 235-238.

124. Шило И.Н., Бетень Г.Ф., Маринич Л.А. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин. Минск, 2010. 319 с.

125. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин К.Н. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. Москва, 1991. 257 с.

126. Ишков А.В., Иванайский В.В., Мишустин Н.М. Боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники: получение, структура и износостойкость в реальных условиях. *Труды ГОСНИТИ*. 2012. Т. 109. С. 7-11.

127. Литовченко Н.Н., Титов Н.В., Коломейченко А.В. Электровибродуговое упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами. *Тракторы и сельхозмашины*. 2013. № 2. С. 49-50.

128. Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т. Конструирование упрочняющего покрытия с учетом реального износа детали. *Ползуновский альманах*. 2010. №1. С. 75-80.

129. Литовченко Н.Н., Куликов В.Н. Электродуговое упрочнение деталей нанесением металлокерамических покрытий. *Машинно-технологическая станция*. 2011. №4. С. 50-51.

130. Титов Н.В., Коломейченко А.В. Восстановление и упрочнение стрелчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами. *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. №1. С. 42-43.

131. Севернев М.М. Износ деталей сельскохозяйственных машин. Ленинград, 1972. 288 с

132. Фаюршин, А.Ф. Повышение долговечности лап культиваторов в сельскохозяйственных ремонтных предприятиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2006. 16 с.

133. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. Москва, 2004. 624 с.

134. Бобрицкий, В.М. Повышение износостойкости режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007. 20 с.

135. Будко, С.И. Методы повышения эффективности упрочнения деталей лемешно-отвальных плужно-дуговой наплавкой твердыми сплавами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 20 с.

136. Дудников А.А., Беловод А.И., Пасюта А.Г., Келемеш А.А., Горбенко А.В. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Машиноведение и Машиностроение: Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 5/1(25). С. 4-7. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.48825

137. Юшков В.В., Квакин А.Г., Князев А.А., Терентьев В.П. Поточно-механизированная линия восстановления лап культиваторов. *Техника в сельском хозяйстве*. 1986. № 8. С. 51-52.

138. Способ восстановления стрельчатых лап пропашных культиваторов почвообрабатывающих машин: пат. 2443523 Российская Федерация. №2010100444/02; заявл. 11.01.2010; опубл. 20.07.2011; Бюл. №20.

139. Способ восстановления стрельчатых лап культиваторов: пат. 2467857 Российская Федерация. №2011113591/02; заявл. 07.04.2011; опубл. 27.11.2012; Бюл. №33.

140. Стрельчатая лапа культиватора: пат. 2462852 Российская Федерация. №2011106409/13; заявл. 21.02.2011; опубл. 10.10.2012; Бюл. №28.

141. Способ упрочняющего восстановления деталей почвообрабатывающих машин: пат. 2462852 Российская Федерация. №2010150217/02; заявл. 07.12.2010; опубл. 20.06.2013; Бюл. №17.

142. Композиционные материалы: Справочник. Под редакцией Д.М. Карпиноса. Киев, 1985. 592 с.

143. Петров М.Ю. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин композиционными материалами: дисс. ... канд. тех. наук. Тверь, 2005. 130 с.

144. Фаюршин А.Ф. Повышение долговечности лап культиваторов в сельскохозяйственных ремонтных предприятиях: дисс. ... канд. тех. наук. Уфа, 2006. 149 с.

145. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник. Под ред. И.М. Федорченко. Киев, 1985. - 745 с.

146. Черновол М.И., Голубев И.Г. Композиционные покрытия при восстановлении деталей: Обзорная информ. М., 1989. 42 с.

147. Виноградов В.В. Восстановление и упрочнение стрельчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами. *Молодежь и XXI век - 2016*: Материалы VI Международной молодежной научной конференции. Курск. 2016. С. 89-94.

148. Коломейченко А.В., Титов Н.В., Виноградов В.В. Исследование микроструктуры композиционных металлокерамических покрытий, полученных карбовибродуговой наплавкой. *Сварочное производство*. 2016. № 11. С. 5-8.

149. Коломейченко А.В., Титов Н.В., Кондрахин Н.А. Исследование технологических возможностей карбовибродугового метода упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Техника и оборудование для села*. 2015. №2. С. 24-26.

150. Коломейченко А.В., Титов Н.В. Исследование твёрдости упрочнённых карбовибродуговым методом с использованием паст рабочих органов почвообрабатывающей техники. *Образование, наука и производство*. 2016. №1 (14). С. 28-33.

151. Способ упрочнения лезвий рабочих органов машин: пат. 2535123. Российская Федерация. №2013111230/02; опубл. 12.03.2013. Бюл. №34.

152. Способ восстановления лапы культиватора с одновременным упрочнением ее рабочей поверхности: пат. 2540316. Российская Федерация. № 2013131342/02; опубл. 08.07.2013. Бюл. № 4.

153. Способ производства лапы культиватора: пат. 2259267. Российская Федерация. №2002125298/02; опубл. 23.09.2002. Бюл. № 24.

154. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М., 1995. - 336 с.

155. Балабуха О.В. Підвищення довговічності і ефективності роботи ріжучих елементів ґрунтообробних машин шляхом управління спрацюванням при дискретному зміцненні: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Кіровоград, 2001. 18с.

156. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». К., 2007. 21 с.

157. Бойко А.И., Балабуха А.В. Упрочнение лезвий как метод управления их геометрической формой при изнашивании. *Вісник Харківського державного*

технічного університету сільського господарства. Харків, 2000. Вип. 4. С. 49-56.

158. Василенко М. Перспективи застосування локального зміцнення при виготовленні і відновленні робочих органів. *Техніка АПК*. К., 2008. №1. С.29-31.

159. Василенко М.А., Буслаев Д.О., Калинин А.Е. Модифицирование наноструктуры созданного поверхностного слоя культиваторных лап для эксплуатации в почвах разных типов. *Механізація та електрифікація сільського господарства*: міжвід. темат. наук. зб. Глеваха, 2015. Вип.1. С. 196-204.

160. Пугач А.М. Обґрунтування параметрів культиваторних лап, оснащених елементами локального зміцнення: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Вінниця, 2010. 20 с.

161. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. Зміна форми леза ґрунтообробних знарядь при зношуванні. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, випробування та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград, 2015. Вип. 45, ч. 1. С.21- 27.

162. Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С., Блезнюк О.В., Дьяконов С.О. Дослідження впливу параметрів леза на енергетичні характеристики робочих органів культиваторів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: Науковий журнал*. Харків, 2016. №4. С.236-242.

163. Козаченко О.В., Каденко В.С., Шкрегаль О.М. Теоретичне обґрунтування раціональної геометричної форми лапи культиватора. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2016. Вип.10/1 (29). С.48-52.

164. Робочий орган культиватора: пат.94680 Україна. №201406241; заявл. 05.06.2014; опубл. 25.11.14, Бюл. №22.

165. Робочий орган культиватора: пат. 106898 Україна. № u201511250; заявл 16.11.15; опубл 10.05. 2016; Бюл №9.

166. Способ нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность деталей почвообрабатывающих машин: пат. 2464358 Российская Федерация. №2011114189/02; заявл. 11.04.2011; опубл. 20.10. 2012; Бюл. №29.

167. Робочий орган культиватора: пат. 25889 Україна. № u200704167; заявл. 16.04.2007; опубл. 27.08. 2007, Бюл. №13.
168. Робочий орган культиватора: пат. 38105 Україна. № u00808195; заявл. 17.06.2008; опубл. 25.12. 2008, Бюл. №24.
169. Слинко Д.Б., Варламова Л.Д., Некрасов Д.М. Упрочнение рабочей поверхности лап культиваторов электродуговой наплавкой износостойкими валиками. *Труды ГОСНИТИ*. 2016. Т. 124, № 2. С. 118-124.
170. Некрасов Д.М., Слинко Д.Б. Упрочнение рабочей поверхности лап культиваторов электродуговой наплавкой износостойкими валиками. *Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная весна 2016: Машиностроительные технологии*. 2016. : веб-сайт. URL: <http://studvesna.ru> (дата обращения: 14.03.2021).
171. Робочий орган культиватора: пат. №85100 Україна. №u200700461; заявл. 17.01.07; опубл. 25.12.08, Бюл. № 24.
172. Робочий орган культиватора: пат. №37351 Україна. u200807793; заявл. 09.06.08; опубл. 25.11.08, Бюл. № 22.
173. Робочий орган культиватора: пат. №31616 Україна. u200715028; заявл. 29.12.07; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.
174. Робочий орган культиватора: пат. №83229 Україна. u201304085; заявл. 02.04.13; опубл. 27.08.13, Бюл. № 16.
175. Способ изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин: пат. 2528687 Российская Федерация. №2013113704/13; заявл. 28.03.2013; опубл. 20.09.2014; Бюл. №26.
176. Гогаев К.А., Подрезов Ю.Н., Волощенко С.М. Технология производства деталей из бейнитного чугуна с шаровидным графитом для почвообрабатывающей сельхозтехники. *Обработка материалов давлением*. 2017. № 1 (44). С. 210-217.
177. Свойства алмазов, металлизированных покрытиями / Т.М. Дуда, Т.Д. Ильницкая и др. *Сверхтвёрдые материалы: Природоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения*. 2015. Выпуск 17. С. 226-231.

178. Некоторые особенности получения и физико-химические свойства алмазных порошков, металлизированных композиционными химическими покрытиями с включениями УДА / Т.М. Дуда, Ю.И. Никитин, В.Г. Полторацкий и др. *Сверхтвёрдые материалы*. 2000. №5. С. 88-94.

179. Спосіб одержання детонаційної шихти з алмазною фракцією: пат. 138685 Україна. МПК (2006) B22D 19/00 B22D 19/08 (2006.01). / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, Ю.М. Кусков, О.В. Сайчук, С.П. Романюк, О.В. Марков, Ю.В. Самсонов. №u201904939. заявл. 10.05.2019; опубл. 10.11.2019, Бюл. №23.

180. A new way of getting the charge with diamond fraction / T.S. Skoblo, A.V. Nanka, I.N. Rybalko, et al. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. (Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii)*. 2021. Том 19, вип. 1. С. 23-33.

181. Нанка А.В., Омельченко Л.В., Марков А.В. Повышение стойкости деталей при восстановлении наплавкой и модифицированием. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2018. № 1 (8). С. 85-93.

182. Влияние модифицирования углеродсодержащими порошковыми присадками на износостойкость при нанесении покрытий. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков, А.К. Олейник. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал*. 2016. №10|47|. С. 54-58.

183. Марков А.В. Применение вторичного сырья и модифицирующих присадок для повышения эксплуатационных свойств изделий. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 162-176.

184. Новая технология модифицирования при восстановлении изделия / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.А. Гончаренко, А.В. Марков, А.С. Михайличенко. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 3-8.

185. Сайчук А.В. Влияние способа введения модификатора на качество восстановления дефектов в сером чугуна отливок. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2017. Випуск 183. С. 3-7.

186. Aleksandr Saychuk, Ivan Rybalko Method of defects restoring in parts made from gray cast iron by hardfacing with recyclable materials modifying. 9th international conference of young scientists on welding and related technologies. Proceedings. 23–26 May 2017 Kyiv. Ukraine – Kyiv, 2017. P. 156-159.

187. Rybalko I., Saychuk A. Modification of metal when welding cracks in body parts made of cast iron. 9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies, 23-26 may. Kyiv, 2017. P. 202.

188. Скобло Т.С., Сідашенко А.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники. Х.: Діса плюс, 2019. 282 с.

189. Особливості структуроутворення під час модифікування покриттів для деталей з дисперснозміцнених сталей / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, С.П. Романюк, О.О. Гончаренко, Л.В. Омельченко, В.А. Бантковський. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2019. Том 55. № 6. С. 96-103.

190. Спосіб підвищення властивостей покриттів модифікуванням при наплавленні: пат. 117615 Україна: МПК В22D 19/08 (2006.01) В22D 19/10 (2006.01) / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, С.П. Романюк, Л.В. Омельченко, І.М. Рибалко та інш. № u2017 01633. заявл. 20.02.2017; опубл. 26.06.17., Бюл. № 12.

191. Specific Features of Structure Formation in the Course of Modification of the Coatings on Products Made of Dispersion-Hardened Steels. / T.S. Skoblo, A.I. Sidashenko, S.P. Romaniuk, A.A. Goncharenko, L.V. Omelchenko, V.A. Bantkovskiy. *Materials Science*. 2020. 55. P. 884–891. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00383-4>

192. Марков А.В. Утилизация боеприпасов для вторичного использования при производстве и восстановлении деталей. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»*. Харьков, 2013. №8. С. 52-55.

193. Энергозберігаючий спосіб підвищення зносостійкості виробів модифікуванням мастила вторинною сировиною: пат. 108224 Україна: МПК (2016.01) C10M 101/00 / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рыбалко та інш. №и 2015 12910. заявл. 28.12.15.; опубл. 11.07.16., Бюл. № 13.

194. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Ткаченко М.С. Влияние углеродсодержащей шихты на повышение стойкости пластичной смазки для резьбовых соединений. *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: международная научно-практическая конференция 24-25 октября 2019 г., в 2 ч. Ч. 2.* Минск: БГАТУ, 2019. С. 90-92.

195. Кожухова Н.Ю. Выбор технологии армирования лемехов. *Сельский механизатор*. М.: Издательство: ООО "Нива", 2010. №5. С.30.

196. Ерохин М.Н., Новиков В.С. Повышение прочности и износостойкости лемеха плуга. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина*. М.: Российский государственный аграрный университет. МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. №3 (28). С. 100-107.

197. Тюрёва А.А., Феськов С.А. Восстановление лап культиваторов методом "компенсирующих элементов" с использованием наплавочного армирования. *Труды инженерно-технологического факультета Брянского государственного аграрного университета*. Кокино: БГАУ, 2017. №1 (1). С. 101-119.

198. Применение модифицирующих присадок для восстановления деталей машин / Т.С. Скобло, А.И. Сідашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. Вип. 47, Ч.І. С. 229-240.

199. Применение шлакообразующих смесей при производстве и реновации изделий / Т.С. Скобло, А.И. Сідашенко, А.Д. Мартыненко, Р.В. Ридный, Н.С. Пасько, А.К.Автухов. Х.: «Полосатая типография», 2016. 284с.

200. Марков А.В., Мальцев Т.В. Использование вторичного сырья для модифицирования при восстановлении деталей наплавкой. *Матеріали VIII*

Міжнародної конференції молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» 20-22 травня 2015 р. Київ, 2015. С. 112.

201. Розробка технології відновлення деталей наплавленням з використанням введення домішок / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»*. Харьков, 2018. № 2. С. 51-58.

202. Влияние модифицирования углерод- и медьсодержащими добавками вторичного сырья при восстановлении деталей электродуговой наплавкой / Т.С. Скобло, А.И. Сідашенко, В.М. Власовец, А.А. Гончаренко, А.В. Марков. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Харків, 2014. Випуск 146. С.227-231.

203. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 308с.

204. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301с.

205. Скобло Т.С., Тіхонов О.В., Рибалко І.М. Використання дисперсних домішок вторинної сировини при відновленні деталей машин. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»*. Харьков, 2019. №12 (84). С. 55-57.

206. *Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник* / [под ред. Гудцова Н. Т.]. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1956. 1204 с.

207. Гулеяв А.П. *Металловедение*. М.: Металлургия, 1977. 648 с.

208. Матюк В.Ф., Кулагин В.Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии. *Неразрушающий контроль и диагностика*. 2010. № 3. С. 4–14.

209. Безлюдько Г.Я., Попов Б.Е., Соломаха Р.Н. Оценка усталостного и напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и оборудования, включая прогноз остаточного ресурса, по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы. *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 1. С. 55–58.

210. Practical evaluation of fatigue and stress state, and residual life of metal by non-

destructive method for measuring magnetic characteristic “The coercive force” – A case study / R. Solomakha, R. D. Pittala, G. Bezlyudko, B. V. Baskaran. *Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, November 18–22, 2013*. P. 1–9.

211. Bezlyudko G.Y., Popov B., Solomakha R.N. Application of Coercive Force Method Nowadays. *NDT World*. 2015.4. P. 4-8. DOI: <https://doi.org/10.12737/16326>

212. Bezlyudko G. Ya., Popov B. E., Solomakha R. N. Operational monitoring of metal fatigue by non-destructive coercive force method. *Practical and philosophical aspects. 11th European Conf. on Non-Destructive Testing*. Prague, 2014. Available at: <http://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/topic.php?eventID=20&TopicID=1875>

213. Bida G.V., Nichipuruk A.P. Coercive force measurements in nondestructive testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010. 10. P. 3-28.

214. Gorkunov B., Tyshchenko A., Bogomaz O., Lvov S., Abbasi Jabbar Sorting Thin-Wall Sheets of The Same Steel Grade Various Manufacturers. *The scientific heritage*. 2019. 42. P 58-63.

215. Mahalov M.S., Blumenstein V.Y. Non-destructive testing of residual stresses by magnetic methods under conditions of simple stressing. *Russ. Engin. Res.* 2016. 36. P 520-525. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16070157>

216. Неруйнівний контроль якості магнітним методом деталей сільськогосподарських машин при технічному обслуговуванні та ремонті: СОУ29.32.-3-532.2007 (чинний від 2008.03.01) [Текст] / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, В.М. Власовець, М.В. Марченко, М.Г. Поздняков, П.С. Сиром'ятніков, А.К. Автухов. К.: Держспоживачстандарт України, 2007. 27 с.

217. Разработка методики оценки характера растяжения насосно-компрессорных труб в эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2017. №7. С. 69-79.

218. ГОСТ Р 54918 – 2012 (ISO/TR 10400: 2007) «Трубы обсадные, насосно-компрессорные, бурильные и трубы для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности» Формулы и расчет свойств. ISO/TR 10400: 2007 Petroleum and

natural gas industries – Equation and calculation for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing (MOD). М.: Стандарт – информ, 2014. 250 с.

219. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М: Мир, 1987. 542с.

220. Radaj D. Heat effects of welding: Temperature field, residual stress, distortion. Berlin: Springer, 1992. 322 p.

221. Костин В.А., Григоренко Г.М., Жуков В.В., Крупеник А.М. Особенности моделирования структурных превращений в сварных швах высокопрочных сталей. *Сборник трудов 6-й конференции «Математические модели и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*. 2012. С. 233–235.

222. Костин В.А. Моделирование структурных превращений и механических свойств в сварных швах высокопрочных низколегированных сталей. *Сборник трудов 7-й конференции «Математические модели и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*. 2014. С. 146–147.

223. Троцан А.И., Каверинский В.В., Бродецкий И.Л., Сухенко З.П. Компьютерное моделирование фазовых превращений в комплексно легированной стали. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения 2016*. 2016. Вып. 89. С. 177–181.

224. Каверинский В.В., Троцан А.И., Баглюк Г.А., Сухенко З.П. Математическое моделирование структурообразования в зоне термического влияния сварного шва низкоуглеродистой среднелегированной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. №5. С. 51-56.

225. Васильев А.А, Колбасников Н.Г., Соколов Д.Ф., Соколов С.Ф. Моделирование микроструктуры и механических свойств стального листа после прокатки на стане 2000 ОАО «Северсталь». *Вопросы материаловедения*. 2010. №3 (63). С. 16-27.

226. Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Belkin E. L., Sidashenko A. I., New Approaches in Study of Inhomogeneity of Heterogeneous Structures. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. 40, No. 2. p. 255-280. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0255>

227. Skoblo T.S., Klochko O.Y., Belkin E.L., Sidashenko A.I., Avetisyan V.K. Structure formation of high-chromium cast irons in the temperature range of the magnetic transformation of carbide phases. *Lett. Mater.* 2020. 10(2). p. 129-134. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-129-134>

228. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сідашенко О.І., Белкін Й.Л., Автухов А.К., Мальцев Т.В., Дерябкіна Є.С., Колпаченко Н.М. Оцінка деградації карбідних фаз у хромонікелевому чавуні за температур експлуатації прокатних валків. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. ТОМ 56, №6. С. 45-51.

229. Skoblo T.S., Belkin E.L., Klochko O.Yu. Application justification of the concepts of fluid dynamics Navier-Stokes equations for the analysis of metallographic images. *Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji*. 2011. Vol. 21. P. 94-96.

230. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Белкин Е.Л. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. №6. С. 35-42.

231. Марков А.В. Повышение эксплуатационной стойкости деталей сельскохозяйственного машиностроения с применением вторичного сырья. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»*. 2015. № 5 (9). С. 12-25.

232. Нанка О.В., Рибалко І.М., Марков О.В. Модифікування відновлюваних шарів вуглецьвмісними домішками. *Інформаційно-аналитический міжнародний технічний журнал «Промышленность в фокусе»*. 2018. № 1 (62). С. 53-58.

233. Спосіб використання детонаційної шихти для зміцнення відновлювального шару деталей: пат. 98213 Україна, МПК (2006) В32В 5/14 (2006.01). № u201410552; заявл. 26.09.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. №8.

234. Skoblo T.S. Klochko O.Yu., Belkin E.L. Structure of high-chromium cast iron. *Steel in Translation*. 2012. 42, №3. P. 261-268. <http://doi.org/10.3103/S0967091212030151>

235. Слезкин Н.А. Динамическая вязкость жидкости. М.: Гос. Изд-во технико-теорет. лит., 1955. 520 с.

236. Теоретические и экспериментальные основы прогнозирования структурообразования, свойств высокоуглеродных легированных сплавов: монография / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, А. И. Сидашенко, Е. Л. Белкин. Харьков: Діса плюс, 2019. 278 с.

237. Скобло Т. С., Марченко А.Ю. Исследование характера поврежденности металла стальных насосно-компрессорных труб неразрушающим методом контроля качества. *Сталь*. 2013. № 7. С. 79–83.

238. Аналіз впливу структурно-механічних факторів на корозійну пошкоджуваність насосно-компресорних труб в умовах вуглекислотної свердловинної корозії / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.Ю. Марченко. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»*. Харьков, 2018. №5 (66). С. 55-58.

239. Природа и механизмы образования в стали коррозионно-активных неметаллических включений. Пути обеспечения чистоты стали по этим включениям. / А.И. Зайцев, И.Г. Родионова, В.В. Мальцев и др. *Сб. трудов научно-практического семинара «Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях»*. М.: Metallurgizdat, 2005. С. 37–51.

240. Роль неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии нефтепромысловых трубопроводов и других видов металлопродукции и оборудования из углеродистых и низколегированных сталей / И.Г. Родионова, О.Н. Бакланова, Г.А. Филиппов и др. *Сб. трудов научно-практического семинара «Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях»*. М.: Metallurgizdat, 2005. С. 7–14.

241. Даминов А.А. Коррозионные повреждения подземного оборудования добывающих скважин на месторождениях Западно-Сибирского региона. Исследование причин коррозии, разработка и применение мер по снижению коррозионного воздействия. *Инженерная практика*. 2010. № 6. С. 26–36.

242. Влияние пластической деформации на структуру и свойства стали 20 / Т.С. Скобло, Г.Я. Безлюдько, А.М. Власовец и др. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»*. 2013. № 11.

С. 25-30.

243. Формирование фуллеренов в структуре железоуглеродистых сплавов в процессе кристаллизации, фазовых переходов и деформации / И.Р. Кузеев, М.М. Закриничная, С.В. Попова, М.Р. Гималова. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2011. № 6. С. 411-419. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kuzeev/Kuzeev_6.pdf.

244. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.

245. Оцінка пошкодження металу сталевих насосно-компресорних труб неруйнівним методом контролю якості / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рыбалко, О.Ю. Марченко. *Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе»*. Харьков, 2018. №6 (67). С. 56-58.

246. Пат. 71815 Украина. МПК С 01 Б 21/00, С 01 N 3/317. Способ оценки качества изделий / Скобло Т.С., Марченко А.Ю., Бурцев С.А. и др.: опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

247. Биля Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 252 с.

248. Семчук Г.И. Динамика изнашивания лап культиваторов. *Технологический аудит и резервы производства*. 2013. 6/5. С. 14: 27.

249. Технология восстановления изношенных культиваторных лап типа MARATHON SERIES фирмы OSMUNDSON / Т.С. Скобло, А.В. Тихонов, И.Н. Рыбалко, С.Г. Карташов, А.В. Сайчук, И.В. Холкина. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 188-197.

250. Рыбалко И.Н. Разработка методики оценки культиваторных лап и их состояния после эксплуатации. *Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2016. Вип. 168. С. 46-51.

251. 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>

252. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н. Мартыненко А.Д. Исследование характера изнашивания культиваторных лап. *Abstracts XIX International Scientific and Practical Conference "Applied and fundamental scientific research" Brussels, Belgium, April 08 – 09, 2021*. P. 264-267.

253. Method of making an earth tilling sweep from disc scrap: United States Patent US006119321A. Douglas G. Bruce. Date of Patent: Sep. 19, 2000.

254. Tamara Skoblo, Ivan Rybalko, Aleksandr Tihonov, Taras Maltsev Evaluation of the stress state of cultivator blade in production and operation. *Res. Agr. Eng.* 2020. 66. P. 60-65. <https://doi.org/10.17221/8/2020-RAE>

255. Methodology for determining the quality control of cultivator blades before and after operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Nanka, A. Saychuk, A. Tihonov. *Abstracts of XXIV International Scientific and Practical Conference "About the problems of practice, science and ways to solve them", Milan, Italy, May 04 – 07, 2021*. P. 309-317.

256. Спосіб оцінки ступеню деградації металу виробів в процесі експлуатації: пат. 99853 Україна: МПК G01B 7/24 (2006.01) G01N 3/08 (2006.01). / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, І.М. Рыбалко та інші. №u2015 00292. заявл. 15.01.15.; опубл. 25.06.15., Бюл. № 12.

257. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E.; Taran V.S.; Taran A.V., Pilgui N.N. Strengthening method for thin-walled knives with multi-layer nanocoatings and quality assessment by non-destructive method. *Journal of Advanced Microscopy Research*. 2018. 13(3). P. 333-338. DOI: <https://doi.org/10.1166/jamr.2018.1399>

258. Рыбалко И.Н. Модифицирование вторичным сырьём пластичной смазки для резьбовых соединений. *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 27-28 октября 2017 г.* Рубцовск:

Рубцовский индустриальный институт, 2017. С. 202-208.

259. Индустриальное масло: пат. 2042711 РФ. МПК С10М141/02, С10М141/02, С10М129:16, С10М129:60, С10М129:40, С10М125:02, С10Н40:04. / А.А. Захаров, Е.И. Кучма, А.М. Ставер, В.А. Юзова, О.Н. Шарова. 4952792/04. заявл. 30.04.1991; опубл. 27.08.1995.

260. Смазочная композиция: пат. 2356938 РФ. МПК С10М125/02 (2006.01) В82В1/00 (2006.01). / А.П. Пузырь, В.С. Бондарь, К.В. Пуртов, Г.Е. Селютин. 2007122572/04, заявл. 15.06.2007; опубл. 27.05.2009.

261. Пластичне мастило для різьбових з'єднань: пат. 28737 Україна: МПК С10М101/00 / Б.О. Чернов, Т.М. Кулінін, Я.Д. Климишин. № 97094536. заявл. 09.09.1997.; опубл. 16.10.2000., Бюл. № 5.

262. Влияние добавок углеродсодержащей шихты в пластичную смазку на особенности формирования поверхности трения соединений в насосно-компрессорных трубах / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко, А.К. Олейник. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. 2017. №3. С. 16-24.

263. Большаков В.И., Проскуркин Е.В., Дергач Т.А. Эффективное покрытие для повышения эксплуатационной надёжности и срока службы труб в жёстких условиях нефтегазодобычи. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 2-3. С. 5-13.

264. Скобло Т.С., Марченко А.Ю. Анализ влияния структурно-механических факторов на коррозионную повреждаемость насосно-компрессорных труб в условиях углекислотной скважинной коррозии. *Сталь*. М., 2014. №12. С. 84-88.

265. Оценка структурообразования при деформации малоуглеродистых сталей / Т.С. Скобло, Г.Я. Безлюдько, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Сталь*. 2014. №9. С. 65-70.

266. Спосіб визначення товщини захисних оксидних плівок, що формуються при терті: патент 107500 Україна: МПК G01В 21/8 (2006.01) / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. №u2015 12140. заявл. 07.12.15.; опубл. 10.06.16., Бюл. № 11.

267. Определение толщины защитных оксидных пленок, формируемых при трении / И.Н. Рыбалко, А.С. Полянский, А.Ю. Марченко, В.В. Коломиец. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2017. №9. С. 28-33.

268. Коляда В.С., Шахов В.А. Новые технологии и оборудование для восстановления подбарабаний комбайнов Claas Tuscato. *Известия оренбургского государственного аграрного университета*. Оренбург: ОГАУ, 2017. 1 (63). С. 80-83.

269. Виноград М.И. Включения в стали и ее свойства. М.: Metallurgizdat, 1963. 252 с.

270. Кислинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали. М.: Metallurgia, 1968. 124 с.

271. Спосіб підвищення зносостійкості стрілкової лапи культиватора: пат. 130824 Україна: МПК (2018.01) A01B 23/00, A01B 35/00 / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.В. Тихонов, О.К. Олейник. № u2018 06896. заявл. 19.06.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл.№ 24.

272. Упрочнение культиваторных лап наплавкой с модифицированием жидкой ванны вторичным сырьём / Т.С. Скобло, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, А.К. Олейник. *Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference "Interaction of society and science: prospects and problems", London, England, April 20 – 23, 2021*. P. 580-585.

273. Курчатовский институт: Проблему ресурсосбережения решат природоподобные технологии. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://news.sputnik.ru/ekonomika/8f51fa430f49a1b8ee5397de64261bb486743091>

274. Применение модифицирующей присадки - глины при восстановительной наплавке деталей / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов. *Сварочное производство*. Москва, 2020. №7. С. 41-49.

275. Спосіб підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів їх модифікуванням маловитратною домішкою: патент 147660 України, МПК C23C 4/131 (2016.01) / Скобло Т.С., Нанка О.В., Рибалко І.М., Сайчук О.В., Тихонов О.В., Сатановський Є.А., Олейник А.К., Захаров А.В. №u2020 08115. заявл. 18.12.2020; опубл. 02.06.2021, Бюл.№ 22.

276. Нарита К. Кристаллическая структура неметаллических включений в соли. М.: из-во Metallurgy, 1969. 191 с.
277. Применение коэрциметрии для оценки состояния металлов / Г.Я. Безлюдько, Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, В.Н. Романченко, А.В. Плугатарёв. *Інформаційно-аналітичний міжнародний технічний журнал «Промисловість в фокусі»*. Харків, 2020. №9 (92). С. 55-57.
278. Марченко А.Ю. Особенности структурных изменений металла насосно-компрессорных труб при эксплуатации в условиях углекислотной коррозии. *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*. 2014. Вип. 146. С. 114-122.
279. Анализ характера растяжения насосно-компрессорных труб и определение степени, области их пластической деформации при эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві»*. 2017. Вип. 183. С. 116-127.
280. Керовані ефекти пластичного деформування заготовок виробів металургії та транспорту: монографія. / В.В. Дрогобецький, О.О. Шаповал, В.В. Щепетов, М.В. Загірняк та інші. Харків: «Друкарня Мадрид», 2017. 244 с.
281. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные методы и задачи. М.: Наука, 1968. 800 с.
282. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. пос. у 3-х т. Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу: Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. 2012. 432 с.
283. Гуцин А.Н. Закономерности усталостного разрушения малоуглеродистой предварительно деформированной стали. *Сталь*. 2014. №3. С. 70-73.
284. Коттрел А. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Metallurgizdat, 1958. 280с.
285. Скобло Т.С., Клочко О.Ю., Белкин Е.Л. Исследование структуры высокохромистого комплекснолегированного чугуна с применением методов математического анализа. *Сталь*. 2012. № 3. С.46-52.

286. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972. 320 с.
287. Nano-particle metal treatment composition for creating a ceramic-metal layer: Patent USA 7,304,020B1 / Dmitry Tananko, Olena Lyubchenko, Oleksandr Oliinik, Oleksandr Umanskiy, Svitlana Aksyonova. Assignee: Dmitry Tananko, West Bloomfield, MI (US) Appl. No.: 11/465,852; Filed: Aug. 21, 2006.
288. Рибалко І.М. Математичне моделювання структуроутворення при наплавленні відновлювальних покриттів з використанням модифікуючої домішки бентонітової глини. *Математичне моделювання*. 2021. №1 (44). С. 113-122. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(44\)2021.236032](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(44)2021.236032)
289. Improving The Quality And Durability Of Restorative Coatings By Arc Deposition And Modification With Natural Additive Bentonite Clay / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Saychuk, A. Tihonov. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2021. Volume 9. No. 6. P. 643-650. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2021/06962021>
290. Скобло Т.С., Рибалко І. М. Оптико-математичний опис при визначенні структури, сформованих наплавленнями відновлюючих покриттів. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції*. Кам'янське, 26-28 травня 2021 року. С. 9-11.
291. Повышение долговечности деталей пластическим деформированием / А.А. Дудников, А.И. Беловод, В.В. Дудник, А.В. Канивец. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник*. Луцьк: 2011. Вип.32. С.128-131.
292. Дудников А.А., Горбенко А.В., Беловод А.И. Упрочняющая обработка вибрационным деформированием. *Зб. наук. праць ЛНАУ*. Луганськ, 2006. № 68/91. С.86-88.
293. Влияние вибрационной обработки на упрочнение обрабатываемой поверхности / И.А. Дудников, А.И. Беловод, А.А. Дудников и др. *Вибрации в технике и технологиях*. 2010. №1(57). С.92-93.
294. Mc. Cormick D. Shot peen gears for longer life «Design End». 1991. №7. P.52-58.

295. Augustin G., Baratta A., Casciati T. Probabilistic methods in structural engineering. London: Capman and Hall, 1984. 556p.

296. Спосіб відновлення спрацьованих стрілчатих культиваторних лап: пат. 100194 Україна: МПК (2015.01) B23P. / А.Г. Пасюта, О.В. Тіхонов, І.М. Рибалко та інш. №u2015 01510. заявл. 20.02.15.; опубл. 10.07.15., Бюл. № 13.

297. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Пасюта А.Г. Відновлення спрацьованих стрілчастих культиваторних лап. *Матеріали міжнародної науково методичної конференції «Проблеми надійності машин» 12-13 листопада 2019р.* Харків, 2019. С. 41-42.

298. 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*. 2019. 94 (4). P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-94-4-27-32>

299. Rybalko I. Application of repair coatings with a charge with diamond fraction and natural materials. *Abstracts of XVI International Scientific and Practical Conference "Science and society, patterns and trends of development" Vienna, Austria, March 30 – April 02, 2021*. P. 248-250.

300. Применение глины как модификатора в ремонтном производстве / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов А.В., И.Н. Рыбалко, Б.С. Сиряк. *Научно-практический журнал «Агротехника и энергообеспечение»*. Орел: ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2019. № 4 (25). С. 138-154.

301. Скобло Т.С., Тіхонов О.В., Рибалко І.М. Використання дисперсних домішок вторинної сировини при відновленні деталей машин. *Інформаційно-аналитический международный технический журнал: Промышленность в фокусе*. Харьков, 2019. №12 (84). С. 55-57.

302. Застосування модифікуючих домішок природного вуглецьвмісного компонента шунгіту і алмазів різних фракцій при відновленні деталей наплавленням / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.В. Сайчук, І.М.Рибалко, О.В. Марков. Марков. *Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал: Промисловість в фокусі*. 2021. №4 (100). С. 54-56.

303. Теоретична оцінка особливостей структуроутворення при введенні вуглецевмісних порошкових композицій в покриття. / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.В.

Сайчук, І.М. Рибалко, А.В. Захаров, О.В. Марков. *Инф.-аналит. міжн. техн. журнал: Промисловість в фокусі*. 2021. №5 (101). С. 52-56.

304. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Avtukhov A.K., et al. Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma. *Inzhenerernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2021. 31(1). P. 56-79. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.056-079> (Упрочнение тонкостенных ножей азотистой плазмой / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, А. К. Автухов и др. *Инженерные технологии и системы*. 2021. Т. 31, № 1. С. 56–79. DOI 10.15507/2658-4123.031.202101.056-079)

305. Драгайцев В.И., Тулапин П.Ф., Бутенко Т.Я. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники. М.: Экономика, 1998. 219 с.

306. Техничко-економическое обоснование инженерных решений в дипломных проектах: Учебное пособие / Ю.А. Кузнецов, А.В. Коломейченко, К.В. Кулаков и др. Орел: ФГБОУ ВПО Орел ГАУ, 2014. 124 с.

307. Расчет экономической эффективности внедрения инструментов из ПСТМ в ремонтных предприятиях АПК / В.В. Коломиец, Р.В. Антощенко, Р.В. Ридный, И.Н. Рыбалко, А.А. Гончаренко. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. Вип. 199. С.229-231.

308. Практикум з економіки підприємств технічного сервісу: навчальний посіб. для студентів закл. вищ. освіти / Н.М. Колпаченко. Ю.А. Сайчук, І.І. Луценко, В.М. Романченко, В.К. Аветісян, В.А. Бантковський, В.Л. Маніло. Харків: Діса плюс, 2021. 252 с.

309. Економіка підприємства: навчальний посіб. для студентів закл. вищ. освіти / Н.М. Колпаченко, Ю.А. Сайчук, В.К. Аветісян, В.А. Бантковський, В.Л. Маніло. Харків: Діса плюс, 2019. 277 с.

ДОДАТКИ

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:**

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н. Напряжения и деградация структуры, формируемые в насосно-компрессорных трубах при эксплуатации: монография. Харьков: ООО «ПромАрт», 2018. 152с.
2. Технология восстановления изношенных культиваторных лап типа MARATHON SERIES фирмы OSMUNDSON / Т.С. Скобло, А.В. Тихонов, И.Н. Рыбалко, С.Г. Карташов, А.В. Сайчук, И.В. Холкина. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 188-197.
3. Рыбалко И.Н. Разработка методики оценки культиваторных лап и их состояния после эксплуатации. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2016. Вип. 168. С. 46-51.
5. Рыбалко И.Н., Телятников В.В. Новая технология упрочнения при восстановлении деталей. *Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій*. 2016. С.189-200.
6. Анализ напряжённого состояния и технологические способы повышения ресурса стрелчатых лап культиваторов / И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, А.Д. Мартыненко, А.В. Сайчук. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2016. №6. С. 118-131.
7. Анализ характера растяжения насосно-компрессорных труб и определение степени, области их пластической деформации при эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2017. Вип. 183. С. 116-127.

8. Разработка методики оценки характера растяжения насосно-компрессорных труб в эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, Е.Л. Белкин, А.Ю. Марченко. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 69-79.

9. Влияние добавок углеродсодержащей шихты в пластичную смазку на особенности формирования поверхности трения соединений в насосно-компрессорных трубах / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко, А.К. Олейник. *Проблеми трибології*. 2017. №3. С. 16-24.

10. Расчёт напряжений в колонне разной длины при эксплуатации / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2017. №2 (43). С. 53-60.

11. Применение модифицирующих присадок для восстановления деталей машин / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2017. Вип. 47, Ч.І. С. 229-240.

12. Определение толщины защитных оксидных пленок, формируемых при трении / И.Н. Рыбалко, А.С. Полянский, А.Ю. Марченко, В.В. Коломиец. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2017. №9 С. 28-33.

13. Оценка степени деградации металла изделий в процессе эксплуатации. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко, А.В. Тихонов. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2018. №11. С. 49-59.

14. Влияние добавки высокодисперсных алмазов на триботехнические характеристики пластичной графитной смазки. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, Е.А. Сатановский, А.К. Олейник. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2018. №12. С. 10-14.

15. 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*. 2019. №15. С. 60-85.

16. Рыбалко И.Н. Насосно-компрессорные трубы (НКТ), оценка их эксплуатационной стойкости и причины отказов. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Проблеми надійності машин*. 2019. Вип. 205. С.218-232.

17. Применение глины как модификатора в ремонтном производстве / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов А.В., И.Н. Рыбалко, Б.С. Сиряк. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2019. № 4 (25). С. 138-154.

18. 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*. 2019. 94 (4). P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-94-4-27-32>

19. Evaluation of the stress state of a cultivator blade in production and operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Tihonov, T. Maltsev. *Research in Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 66, Issue 2. P. 60-65. <https://doi.org/10.17221//2020-RAE>. (Scopus).

20. Применение модифицирующей присадки - глины при восстановительной наплавке деталей / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов. *Сварочное производство*. 2020. №7. С. 41-49.

21. Strengthening Thin-Walled Knives with Nitrogen Plasma. / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko, A.K. Avtukhov, V.N. Romanchenko, A.V. Plugatarev, I.N. Rybalko. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2021. 31(1). P. 56-79. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.056-079>. (Web of Science).

22. A new way of getting the charge with diamond fraction / T.S. Skoblo, A.V. Nanka, I.N. Rybalko, et al. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. (Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii)*. 2021. Том 19, вип. 1. С. 23-33. (Scopus).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

23. Применение nanoалмазов для повышения качества восстанавливаемого слоя наплавкой / Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков и др. *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Международной научно-практической конференции, 4-6 июня 2014 г. Минск, 2014. Ч. 1. С .258-261.*

24. Оценка качества литых стальных изделий неразрушающим методом. / Т.С.

Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Тихонов, А.В. Сайчук, В.В. Телятников, И.Н. Рыбалко. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2014. №8|20|. С. 56-57.

25. Способ восстановления и повышения свойств рабочей поверхности деталей / В.В. Телятников, А.В. Марков, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко и др. *Инф.-аналитич. межд. технич. журнал: Промышленность в фокусе*. 2014. №10|22|. С. 56-57.

26. Рыбалко И.Н. Новая технология упрочнения при восстановлении деталей. *Зварювання та споріднені технології: матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів, 20-22 травня 2015 р. Київ, 2015*. С. 126.

27. Рыбалко И.Н., Демченко Е.А. Метод оценки качества культиваторных лап. *Підвищення надійності машин і обладнання: Збірник тез доповідей X Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців, 20-22 квітня 2016 р. Кіровоград: КНТУ, 2016*. С. 135-137.

28. Влияние модифицирования углеродсодержащими порошковыми присадками на износостойкость при нанесении покрытий. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, А.В. Марков, А.К. Олейник. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал*. 2016. №10|47|. С. 54-58.

29. Aleksandr Saychuk, Ivan Rybalko Method of defects restoring in parts made from gray cast iron by hardfacing with recyclable materials modifying. *9th international conference of young scientists on welding and related technologies. Proceedings*. 23–26 May 2017 Kyiv. Ukraine – Kyiv, 2017. P. 156-159.

30. Rybalko I., Saychuk A. Modification of metal when welding cracks in body parts made of cast iron. *9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies, 23-26 may*. Kyiv, 2017. P. 202.

31. Рыбалко И.Н. Модифицирование вторичным сырьём пластичной смазки для резьбовых соединений. *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 27-28 октября 2017 г. Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2017*. С. 202-208.

32. Нанка О.В., Рибалко І.М., Марков О.В. Модифікування відновлюваних шарів вуглецьвмісними домішками. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2018. № 1 (62). С. 53-58.

33. Розробка технології відновлення деталей наплавленням з використанням введення домішок / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2018. № 2 (63). С. 51-57.

34. Аналіз впливу структурно-механічних факторів на корозійну пошкоджуваність насосно-компресорних труб в умовах вуглекислотної свердловинної корозії / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.Ю. Марченко. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2018. №5 (66). С. 55-58.

35. Оцінка пошкодження металу сталевих насосно-компресорних труб неруйнівним методом контролю якості / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.Ю. Марченко. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2018. №6 (67). С. 56-58.

36. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Ткаченко М.С. Влияние углеродсодержащей шихты на повышение стойкости пластичной смазки для резьбовых соединений. *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: международная научно-практическая конференция 24-25 октября 2019 г., в 2 ч. Ч. 2.* Минск: БГАТУ, 2019. С. 90-92.

37. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Пасюта А.Г. Відновлення спрацьованих стрілочастих культиваторних лап. *Проблеми надійності машин: матеріали Міжнародної науково методичної конференції 12-13 листопада 2019р.* Харків, 2019. С. 41-42.

38. Скобло Т.С., Тіхонов О.В., Рибалко І.М. Використання дисперсних домішок вторинної сировини при відновленні деталей машин. *Промышленность в фокусе: Инф.-аналитич. межд. технич. журнал.* 2019. №12 (84). С. 55-57.

39. Рыбалко И.Н. Влияние пластической деформации на особенности структурных изменений в низкоуглеродистой стали. *Промисловість в фокусі: Інф.-*

аналіт. міжн. техн. журнал. 2020. №5 (88). С. 52-56.

40. Рыбалко И.Н. Анализ качества культиваторных лап производства Канады. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №7 (90). С. 53-57.

41. Применение коэрциметрии для оценки состояния металлов / Г.Я. Безлюдько, Т.С. Скобло, И.Н. Рыбалко, В.Н. Романченко, А.В. Плугатарёв. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №9 (92). С. 55-57.

42. Склад детонаційної шихти з алмазною фракцією для модифікування покриттів / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, О.В. Сайчук, І.М. Рибалко, А.В. Захаров, Л.В. Омельченко. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2020. №11 (94). С. 54-56.

43. Рибалко І.М., Захаров А.В. Розробка способу підвищення зносостійкості культиваторних стрілчастих лап. *Крамаровські читання: збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 114-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 25-26 лют. 2021 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2021. С. 68-71.*

44. Rybalko I. Application of repair coatings with a charge with diamond fraction and natural materials. *Science and society, patterns and trends of development: Abstracts of XVI International Scientific and Practical Conference, Vienna, Austria, March 30 - April 02, 2021.* P. 248-250.

45. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Мартыненко А.Д. Исследование характера изнашивания культиваторных лап. *Applied and fundamental scientific research: Abstracts XIX International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, April 08-09, 2021.* P. 264-267.

46. Модифікування при відновленні виробів наплавленням із застосуванням детонаційної шихти / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.В. Сайчук, І.М.Рибалко, О.В. Марков. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал.* 2021. №3 (99). С. 53-56.

47. Упрочнение культиваторных лап наплавкой с модифицированием жидкой

ванни вторичным сырьём / Т.С. Скобло, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, А.К. Олейник. *Interaction of society and science: prospects and problems: Abstracts of XXII International Scientific and Practical Conference, London, England, April 20-23, 2021. P. 580-585.*

48. Застосування модифікуючих домішок природного вуглецьвмісного компонента шунгіту і алмазів різних фракцій при відновленні деталей наплавленням / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.В. Сайчук, І.М.Рибалко, О.В. Марков. *Промисловість в фокусі: Інф.-аналіт. міжн. техн. журнал. 2021. №4 (100). С. 54-56.*

49. Methodology for determining the quality control of cultivator blades before and after operation / T. Skoblo, I. Rybalko, A. Nanka, A. Saychuk, A. Tihonov. *About the problems of practice, science and ways to solve them: Abstracts of XXIV International Scientific and Practical Conference, Milan, Italy, May 04-07, 2021. P. 309-317.*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

50. Спосіб відновлення та підвищення властивостей робочого шару деталей: пат. 92472 Україна: МПК (2014.01) B23K 26/00. / Т.С. Скобло, І.М. Рибалко та інш. №a2014 03324. заявл. 01.04.14.; опубл. 26.08.14., Бюл. № 16.

51. Спосіб оцінки якості виробів неруйнівним методом: пат. 95287 Україна: МПК G01N 27/82 (2006.01). / Т.С. Скобло, І.М. Рибалко та інш. №a2014 06020. заявл. 02.06.14.; опубл. 25.12.14., Бюл. № 24.

52. Спосіб оцінки ступеню деградації металу виробів в процесі експлуатації: пат. 99853 Україна: МПК G01B 7/24 (2006.01) G01N 3/08 (2006.01). / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, І.М. Рибалко та інш. №u2015 00292. заявл. 15.01.15.; опубл. 25.06.15., Бюл. № 12.

53. Спосіб відновлення спрацьованих стрілчатих культиваторних лап: пат. 100194 Україна: МПК (2015.01) B23P. / А.Г. Пасюта, О.В. Тіхонов, І.М. Рибалко та інш. №u2015 01510. заявл. 20.02.15.; опубл. 10.07.15., Бюл. № 13.

54. Спосіб визначення товщини захисних оксидних плівок, що формуються при терті: патент 107500 Україна: МПК G01B 21/8 (2006.01) / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. №u2015 12140. заявл. 07.12.15.; опубл. 10.06.16., Бюл. № 11.

55. Енергозберігаючий спосіб підвищення зносостійкості виробів

модифікуванню мастила вторинною сировиною: пат. 108224 Україна: МПК (2016.01) C10M 101/00 / Т.С. Скобло, О.Ю. Марченко, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. №u 2015 12910. заявл. 28.12.15.; опубл. 11.07.16., Бюл. № 13.

56. Спосіб підвищення властивостей покриттів модифікуванню при наплавленні: пат. 117615 Україна: МПК B22D 19/08 (2006.01) B22D 19/10 (2006.01) / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, С.П. Романюк, Л.В. Омельченко, І.М. Рибалко та інш. № u2017 01633. заявл. 20.02.2017; опубл. 26.06.17., Бюл. № 12.

57. Спосіб підвищення зносостійкості стрілкової лапи культиватора: пат. 130824 Україна: МПК (2018.01) A01B 23/00, A01B 35/00 / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко, О.В. Тихонов, О.К. Олейник. № u2018 06896. заявл. 19.06.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл.№ 24.

58. Метод визначення структурної неоднорідності: пат. 137100 Україна: МПК (2006) G01N 1/00, G01N 3/00, G01N 27/00, G01D 21/00. / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, І.М. Рибалко та інш. № u2018 05708. заявл. 22.05.2018; опубл. 10.10.2019, Бюл.№ 19.

59. Методика разработки браковочных норм при оценке качества изделий из литых низкоуглеродистых сталей / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.В. Тихонов, В.В. Телятников. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві*. 2015. Вип. 158. С. 89-92.

60. О причинах трещинообразования в корпусных отливках сельскохозяйственных машин / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, В.В. Телятников. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2015. № 2 (6). С. 3-14.

61. Применение неразрушающего контроля для оценки качества отливок из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко, В.В. Телятников, А.А. Радченко. *Агротехника и энергообеспечение: Научно-практический журнал*. 2015. № 4 (8). С. 15-25.

62. Анализ качества втулок цилиндров двигателей методом неразрушающего контроля / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, Е.В. Ровный, М.В. Марченко, И.Н. Рыбалко,

А.В. Сайчук. *Агротехника и энергообеспечение*: Научно-практический журнал. 2015. № 5 (9). С. 26-32.

63. Оценка локальной структурной неоднородности в отливках из серого чугуна / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, О.Ю. Клочко, А.В. Сайчук, И.Н. Рыбалко. *Агротехника и энергообеспечение*: Научно-практический журнал. 2017. № 4 (17). С. 141-150.

64. Расчет экономической эффективности внедрения инструментов из ПСТМ в ремонтных предприятиях АПК / В.В. Коломиец, Р.В. Антощенко, Р.В. Ридный, И.Н. Рыбалко, А.А. Гончаренко. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. Вип. 199. С.229-231.

Розробка методики оцінки розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації

Розглянемо підходи до оцінки напруженого стану колони з найпростішого:

$$P\Delta l - A(\Delta l) = \min, \quad (\text{Б.1})$$

де P – зовнішня сила; Δl – шукане подовження від дії зовнішньої сили; $A(\Delta l)$ – робота деформації, що залежить від подовження.

Для випадку пружної деформації розтягування вона рівна

$$A(\Delta l) = \frac{1}{2} E \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 V, \quad (\text{Б.2})$$

де E – модуль пружності (модуль Юнга); $\frac{\Delta l}{l}$ – деформація; l – довжина; V – об'єм, $V = b \cdot h \cdot l$; де b – ширина; h – висота.

В такій постановці подовження Δl легко визначається шляхом диференціювання (Б.1) по змінній Δl і прирівнювання похідної нулю:

$$F = P\Delta l - \frac{1}{2} E \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 bhl = \min,$$

$$\frac{dF}{d\Delta l} = P - E \frac{\Delta l}{l} bh = 0.$$

Звідси:

$$\Delta l = \frac{Pl}{Ebh} \quad (\text{Б.3})$$

Підставляючи (Б.3) в (Б.2), одержимо роботу пружної деформації розтягування:

$$A(\Delta l) = \frac{1}{2} E \left(\frac{Pl}{Ebh} \right)^2 bhl = \frac{1}{2} E \left(\frac{P}{Ebh} \right)^2 bhl = \frac{P^2 l}{2Ebh}.$$

Розглянемо гранично пружну роботу деформації при:

$$\frac{\Delta l}{l} = e_{tek} ,$$

e_{tek} – границя текучості, яка можна визначити, знаючи напругу плинності як:

$$\frac{\sigma_{tek}}{E} = e_{tek} ,$$

де σ_{tek} – напруга плинності:

$$A(\Delta l) = \frac{1}{2} E e_{tek}^2 b h l .$$

Якщо застосувати такий же принцип до пластичних деформацій:

$$F = P\Delta l - \sigma_{tek} \frac{\Delta l}{l} b h l = \min , \quad (Б.4)$$

то із цієї умови неможливо одержати необхідні значення.

Лінійний зв'язок між напруженням й деформацією:

$$\sigma_{ypr} = \sigma_{tek} + E_{ypr} e_{ypr} , \quad (Б.5)$$

де σ_{ypr} – напруження зміцнення; σ_{tek} – границя текучості; E_{ypr} – модуль зміцнення; e_{ypr} – деформація зміцнення.

$$F = P\Delta l - \sigma_{ypr} \frac{\Delta l}{l} b h l = \min ,$$

$$F = P\Delta l - \left(\sigma_{tek} + E_{ypr} \frac{\Delta l}{2l} \right) \frac{\Delta l}{l} b h l = \min ,$$

$$F = P\Delta l - \left(\sigma_{tek} + E_{ypr} \frac{\Delta l}{2l} \right) \Delta l b h = \min ,$$

$$\frac{dF}{d\Delta l} = P - \sigma_{tek} b h - E_{ypr} \frac{\Delta l}{l} b h = 0 .$$

Звідси:

$$\Delta l = \frac{(P - \sigma_{tek} b h) l}{E_{ypr} b h} . \quad (Б.6)$$

Модуль зміцнення можна визначити, знаючи відносне подовження сталі.

Для цього замість P в отриманій формулі можна прийняти:

$$P_b = \sigma_b bh, \quad (\text{Б.7})$$

$$\Delta l = \frac{(\sigma_b bh - \sigma_{tek} bh)l}{E_{ypr} bh},$$

або:

$$\Delta l = \frac{(\sigma_b - \sigma_{tek})l}{E_{ypr}},$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(\sigma_b - \sigma_{tek})}{E_{ypr}}.$$

Відношення $\frac{\Delta l}{l}$ є відносним подовженням, яке відомо. Для аналізованої сталі 20пс воно рівно 0,095.

Тоді:

$$E_{ypr} = \frac{(\sigma_b - \sigma_{tek})}{0.095} = \frac{100 - 93}{0.095} = 73,68 \text{ кг/мм}^2$$

Гранично пружною силою є величина:

$$P_{tek} = \sigma_{tek} bh.$$

Тоді за границею текучості:

$$\Delta l = \frac{(P - P_{tek})l}{E_{ypr} bh}.$$

Наведена формула тільки при малих значеннях l дає прийнятні результати.

При більших l вона незастосовна тому, що суперечить принципу Сен-Венана.

Для того, щоб знайти Δl , потрібно щоб другий доданок в (Б.4) зі знаком мінус було нелінійною функцією від Δl .

Відносно першого, вважаючи, що $\frac{2ul_1}{h}$ набагато менше 1, його легко оцінити (матаналізом):

$$x_1 = \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1} = \frac{h - h\sqrt{1 - \frac{2ul_1}{h}}}{ul_1} \approx \frac{h - h + h\frac{ul_1}{h} + h\frac{u^2l_1^2}{2h^2}}{ul_1} = 1 + \frac{ul_1}{2h}. \quad (\text{Б.8})$$

Формула (Б.10) отримана шляхом розкладання в ряд Тейлора до багаточлена 2-го порядку.

Перевірка показала, що помилка формули (2.8) полягає в збереженні площі при максимальному відносному подовженні й становить 10 відсотків. Це більше, чим допускається за ДСТ на 0,5% і досягає 4,2 %.

Для другого кореня така ж оцінка дає:

$$x_2 = \frac{h + \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1} = \frac{h + h\sqrt{1 - \frac{2ul_1}{h}}}{ul_1} \approx \frac{h + h + h\frac{ul_1}{h} + h\frac{u^2l_1^2}{2h^2}}{ul_1} = \frac{2h}{ul_1} + 1 + \frac{ul_1}{2h}.$$

При малих u одержимо величезне число для x_2 , чого не може бути.

Отже,

$$l_1x_1 = l_1 \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{ul_1} = l_1 + \Delta l_1,$$

$$l_1x_1 = \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{u} = l_1 + \Delta l_1,$$

$$\Delta l_1 = \frac{h - \sqrt{h^2 - 2uhl_1}}{u} - l_1. \quad (\text{Б.9})$$

Тепер умова мінімуму можна записати так:

$$F = P(\Delta l + \Delta l_1) - \frac{1}{2} E \left(\frac{\Delta l}{l - l_1} \right)^2 bh(l - l_1) - A(l_1, \Delta l_1, u) = \min, \quad (\text{Б.10})$$

де $A(l_1, \Delta l_1, u)$ робота пластичної деформації й вона формально залежить від трьох

параметрів (з урахуванням передостанньої формули (Б.9)). Її можна вважати залежної від двох параметрів: $A(l_1, u)$. Але якщо вважати l_1 й u незалежними, то представляється можливим при тих самих P і l знайти єдине рішення. Виникає необхідність розв'язання варіаційного завдання визначення u як функції від l_1 . Це складне завдання, пов'язана з розв'язанням диференціальних рівнянь Ейлера. У даній роботі виконали порівняльні розрахунки роботи деформації по описуваному прямому потоншенню й сегменту окружності. Особливої різниці не виявлено. Істотна різниця виявляється при спробі оцінки u за допомогою граничних значень відносного подовження або потоншення. Але для розглянутої сталі не оговорюється величина відносного потоншення. Тому нижче приводиться методика оцінки u по граничному подовженню. Позначимо коефіцієнт граничного подовження буквою x з індексом не 1, як у формулі для збереження об'ємів, а з індексом udl , тобто x_{udl} .

Так, для сталі класу Р с граничним подовженням $0,095 x_{udl} = 1,095$, умова збереження об'єму в цьому випадку складе:

$$hl_1 = x_{udl}l_1(2h - ux_{udl}l_1)/2, \text{ або } h = x_{udl}(2h - ux_{udl}l_1)/2.$$

Звідси знаходимо граничне значення u :

$$u = \frac{2h(x_{udl} - 1)}{x_{udl}^2 l_1}. \quad (\text{Б.11})$$

Воно характеризує механічні властивості не гірше, ніж модуль зміцнення. Це тангенс кута нахилу в граничному стані трапеції, показаної на рис. 2.10. Величина, пов'язана з дотичною деформацією e_{xy} , що входить у формулу інтенсивності впливу складе:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_y - e_z)^2 + (e_z - e_x)^2 + \frac{3}{2}(e_{xy}^2 + e_{xz}^2 + e_{yz}^2)}, \quad (\text{Б.12})$$

$$e_x = \ln x_{udl} \approx (x_{udl} - 1), e_y = -e_x, e_z = 0, e_{xy} = u/2, e_{yz} = u/k,$$

$$e_{xz} = 0, e_{yz} = 0. \quad (\text{Б.13})$$

Коефіцієнт k , що входить у формули (Б.13), може бути використаний при обробці результатів випробування металу на розтягування. При розрахунках у даній роботі він був прийнятий рівним 2.

З урахуванням (Б.13) формула (Б.12) може бути представлена у вигляді:

$$e_i = 0,47 \sqrt{6e_x^2 + \frac{3}{8}u^2} .$$

Робота пластичної деформації ділянки довжиною l_1 , шириною b й висотою h приблизно (точніше результат можна одержати із застосуванням кінцевих елементів) дорівнює:

$$a_r = \sigma_{tek} e_i b h l_1 = \sigma_{tek} 0,47 \sqrt{6e_x^2 + \frac{3}{2}u^2} b h l_1 .$$

З урахуванням (Б.11) і (Б.13) одержимо:

$$a_r = e_i = \sigma_{tek} 0,47 \sqrt{6(x_{udl}) - 1^2 + \frac{3}{2} \left[\frac{kh(x_{udl} - 1)}{x_{udl} l_1} \right]^2} b h l_1 = \sigma_{tek} 0,47 (x_{udl} - 1) \sqrt{6x_{udl}^2 l_1^2 + 1,5h^2 k^2} b h / x_{udl} .$$

Оскільки надалі буде проведене диференціювання по l_1 , те для скорочення записів використовуємо:

$$c = 6x_{udl}^2, \quad (Б.14)$$

$$d = 1,5h^2 k^2, \quad (Б.15)$$

$$a_1 = \sigma_{tek} 0,47 (x_{udl} - 1) b h / x_{udl} . \quad (Б.16)$$

Тоді:

$$a_r = a_1 \sqrt{c l_1^2 + d}, \text{ а } \frac{da_r}{dl_1} = \frac{c a_1 l_1}{\sqrt{c l_1^2 + d}} \quad (Б.17)$$

Розглянемо формулу пластичного стану (2.4). Вона тепер розбивається на 3 доданка:

$$F = P\Delta l - \sigma_{tek} \frac{\Delta l_1}{l - l_1} bh(l - l_1) - a_r(l_1) = \min, \quad (\text{Б.18})$$

де l_1 - довжина ділянки, на якій відбудеться руйнування (або подовження досягнеться граничної за ГОСТ величини), а робота деформації $a_r(l_1)$ розраховується по (Б.16).

Припустимо, що подовження ділянки довжиною $l - l_1$ (де l - повна довжина) дорівнює подовженню при σ_{tek} , тобто:

$$\Delta l_1 = e_{tek}(l - l_1) \quad (\text{Б.19})$$

Загальне подовження в такому випадку можна представити, як:

$$\Delta l = e_{tek}(l - l_1) + (x_{udl} - 1)l_1 \quad (\text{Б.20})$$

Формула (2.20) з урахуванням (2.16), (2.17), (2.21), (2.22) переходить в:

$$F = P[e_{tek}(l - l_1) + (x_{udl} - 1)l_1] - \sigma_{tek} e_{tek}(l - l_1)bh - a_1 \sqrt{cl_1^2 + d} = \min. \quad (\text{Б.21})$$

Отримане нелінійне, відносно l_1 , вираження для F . Щоб знайти l_1 потрібно визначити похідну F по l_1 й прирівняти її до нуля.

Враховуючи (Б.17), одержимо:

$$\frac{dF}{dl_1} = P(-e_{tek} + x_{udl} - 1) + \sigma_{tek} e_{tek} bh - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0. \quad (\text{Б.22})$$

Помітимо, що в даному рівнянні ніде немає загальної довжини l . Таке рівняння можна віднести до класу локальних рівнянь Сен-Венана. Для скорочення запису позначимо:

$$a_2 = P(-e_{tek} + x_{udl} - 1) + \sigma_{tek} e_{tek} bh. \quad (\text{Б.23})$$

З урахуванням (Б.23) формула (Б.22) переходить в:

$$a_2 = \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0. \quad (\text{Б.24})$$

Виходячи з того, що підкореневе вираження більше 0, перетворимо (Б.24) до виду:

$$a_2 \sqrt{cl_1^2 + d} = ca_1 l_1.$$

Зводимо обидві частини у квадрат:

$$a_2^2 cl_1^2 + a_2^2 d = c^2 a_1^2 l_1^2,$$

і знаходимо l_1 :

$$l_1 = \sqrt{\frac{a_2^2 d}{c(ca_1^2 - a_2^2)}}. \quad (\text{Б.25})$$

Розглянемо раніше введені позначення (Б.14) - (Б.16), (Б.23) і (Б.25) Множник при P , рівний $(-e_{tek} + x_{udl} - 1)$ строго більше нуля тому, що відносне подовження на порядок перевищує деформацію плинності. Оскільки в (Б.2) у знаменнику під коренем P входить зі знаком мінус, те можна сказати, що зі збільшенням P величина l_1 буде рости.

Але більш детальне дослідження формули (Б.25) при комп'ютерній обробці показало, що якщо на стрижні є ділянка пластичності довжиною $l - l_1$, то сумарна робота деформації (другий й третій доданки в (Б.21)) тільки зростуть від збільшення розтягувальної сили P . Розглянутий випадок найбільше часто зустрічається. Допустимо, має місце умова, коли від занадто великого тиску бура відбувся в якомусь місці поздовжній вигин труби (такий, при якому поздовжня деформація труби від вигину одержала пластичну деформацію). Тоді, за допомогою розтягувальної сили P буровий майстер намагається не тільки витягти трубу разом з буром, але й одночасно її випрямити.

У металургії відомий експеримент із виправленням 25 метрових рейок розтяганням. При цьому нічого не вийшло – пластично розтягувалися тільки кінці. Відомий винахід однієї австрійської фірми «Voestalpine Stahl Donawitz GmbH», Леобен, суть якого полягає в тому, що розтягування в такому випадку проводиться послідовно на коротких ділянках (за принципом руху гусениці). Невідомо, чи можна

цей винахід використовувати в просторі обсадної труби, але розглянемо, чи працює варіаційний принцип, якщо ділянка довжиною $l - l_1$ перебуває в пружному стані. Перш ніж перейти до розгляду випадку пружного стану на довжині $l - l_1$, на початку слід відкоригувати залежність (Б.25), змінивши (Б.21) на:

$$F = P(x_{udl} - 1)l_1 - a_1 \sqrt{cl_1^2 + d} = \min .$$

Тепер:

$$a_2 = P(x_{udl} - 1),$$

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{\frac{a_2^2 d}{c(ca_1^2 - a_2^2)}} = \\ &= hkP(x_{udl} - 1) \sqrt{\frac{1,5}{6x_{udl}^2 [6x_{udl}^2 \sigma_{tek} 0,47 (x_{udl} - 1) bh/x_{udl} - P(x_{udl} - 1)]}} = \\ &= hkP \sqrt{\frac{(x_{udl} - 1)}{4x_{udl}^2 (6x_{udl} P_{tek} 0,47 - P)}} = \frac{hkP}{2x_{udl}} \sqrt{\frac{x_{udl} - 1}{6x_{udl} P_{tek} 0,47 - P}} \end{aligned} \quad (\text{Б.26})$$

У цій формулі позначене $P_{tek} = \sigma_{tek} bh$ й вона характеризує гранично пружну силу перетину стрижня.

Формула (Б.26) формально показує, що принцип Сен-Венана пропорційний h . Це в точності збігається із цим принципом. Але в цьому принципі лише сказано, що довжина зони l_1 приймається в межах від однієї до 2 висот, а, 3 висоти – це вже багато. У нас висота 5,5мм (товщина труби).

Розглянемо кілька моделей розтягування труби, розгорнення якої можна вважати прямокутним стрижнем. Постановка завдань відрізняється тільки множником при силі P .

У такий же спосіб, як і розглянуте вище, можна вивести формулу, коли на частині стрижня має місце пружна деформація, а на іншій – пластична. Її, довжину, як і в попередньому випадку, позначаємо l_1 . Уся довжина стрижня позначається l .

Тоді:

$$F = P[\Delta l + (x_{udl} - 1)l_1] - \frac{1}{2} E \cdot \left[\frac{\Delta l}{l - l_1} \right]^2 (l - l_1)bh - a_1 \sqrt{cl_1^2 + d} = \min . \quad (\text{Б.27})$$

В (Б.27) невідомими вважаються Δl й l_1 .

Спочатку знаходимо похідну по Δl й дорівнюємо її нулю.

$$\frac{dF}{d\Delta l} = P - E \frac{\Delta l}{(l - l_1)} bh = 0 .$$

Звідси:

$$\Delta l = \frac{P(l - l_1)}{Ebh} \quad (\text{Б.28})$$

Потім знаходимо похідну (Б.27) по l_1 й дорівнюємо її до нуля.

$$\frac{dF}{dl_1} = P(x_{udl} - 1) - E \frac{\Delta(l - l_1)^2}{(l - l_1)^2} bh - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 . \quad (\text{Б.29})$$

Підставляємо в (Б.29) вираження (Б.28):

$$\frac{dF}{dl_1} = P(x_{udl} - 1) - E \frac{P^2(l - l_1)^2}{(l - l_1)^2 E^2 b^2 h^2} bh - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 , \text{ або}$$

$$\frac{dF}{dl_1} = P(x_{udl} - 1) - \frac{P^2}{Ebh} - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 .$$

Позначимо:

$$a_3 = P(x_{udl} - 1) - \frac{P^2}{Ebh} .$$

Рівняння (Б.28) перетвориться в:

$$a_3 - \frac{ca_1 l_1}{\sqrt{cl_1^2 + d}} = 0 . \quad (\text{Б.30})$$

Перетворимо (Б.30), вважаючи, що підкореневе вираження не рівне 0:

$$a_3 \sqrt{cl_1^2 + d} = ca_1 l_1 .$$

Зводимо обидві частини у квадрат:

$$a_3^2 c l_1^2 + a_3^2 d = c^2 a_1^2 l_1^2 .$$

Тепер знаходимо l_1 :

$$l_1 = \sqrt{\frac{a_3^2 d}{c(ca_1^2 - a_3^2)}} .$$

При цьому, робота пружної деформації рівна:

$$A[\Delta(l-l_1)] = \frac{P^2(l-l_1)}{2Ebh} .$$

Розглянемо кілька залежностей, відповідних до інших функцій F , схожих на (Б.27), але одмінні від неї першим доданком.

$$F = P\Delta l - \frac{1}{2} E \left[\frac{\Delta l}{l-l_1} \right]^2 (l-l_1)bh - a_1 \sqrt{cl_1^2 + d} = \min . \quad (\text{Б.31})$$

Ці результати, отримані за системою Derive, тобто, за системою з автоматичним диференціюванням і виведенням формул:

$$z_n = cP^2(2bEh - P)^2 ,$$

$$f_1 = a_1 b c E h , \quad (\text{Б.32})$$

$$f_2 = \sqrt{c[a_1^2 b^2 c E^2 h^2 - d P^4 (2bEh - P)^4]} ,$$

$$l_1 = \frac{f_1 + f_2}{z_n} , \quad (\text{Б.33})$$

$$\Delta l = \frac{l_1(bEh - P) + lP}{bEh} . \quad (\text{Б.34})$$

Другий варіант. При розрахунках цей варіант враховує також залежності (Б.32) – (Б.34).

$$F = P(\Delta l + l_1) - \frac{1}{2} E \left[\frac{\Delta l}{l-l_1} \right]^2 (l-l_1)bh - a_1 \sqrt{cl_1^2 + d} = \min , \quad (\text{Б.35})$$

$$zn = cP^2(4bEh - P)^2,$$

$$f_2 = \sqrt{c[a_1^2 b^2 c E^2 h^2 - d P^4 (4bEh - P)^4]}.$$

В обох варіантах формула (Б.34) для розрахунків пружного переміщення Δh від сили P однакові: чим більше довжина стрижня l , тим пропорційно більше Δh . Різниця відзначається у визначенні пластичного переміщення l_1 . По першому варіанту воно більше, чим по другому. Питання впливу довжини стрижня на пластичну деформацію дуже важливе. Випробування, у відмінності від ГОСТ, потрібно проводити не на одній, а на декількох різних довжинах.

У всіх формулах (Б.27), (Б.31), (Б.35) у третьому доданку, принаймні, один параметр – тангенс u кута нахилу пластично деформуємої ділянки по прямій (див. рис. 2.10) майже довільний. Його можна пов'язувати зі значенням дотичної деформації. На початку розглянемо обмеження на цей тангенс.

При виведенні формули (Б.8) було написано, що подовження x_1 задоволене точно можна представити у вигляді $x_1 = 1 + \frac{ul_1}{2h}$, не забуваючи при цьому, що вона вірна, якщо $1 - \frac{2ul_1}{h} \geq 0$, щоб не одержати корінь із негативного числа. Тобто, щоб, наприклад, при заданих h і l_1 :

$$u \leq \frac{h}{2l_1}.$$

Остання умова напевно виконується, якщо при руйнуванні $x_1 = 1,095$, тоді:

$$1,095 = 1 + \frac{ul_1}{2h}, \text{ або } u = 0,19 \frac{h}{l_1} < \frac{h}{2l_1}.$$

Крім того, формула (Б.8) показує, що якщо є 2 стрижня з однієї й тією ж висотою h з однаковим значенням відносного подовження x_1 , то в них ul_1 те саме число.

Таблиця В1 - Показання коерцитивної сили на новій культиваторній лапі^{*)}, А/см

№ з/п зони вимірювання	Ліва частина лапи		№ з/п зони вимірювання	Права частина лапи	
	⊥			⊥	
	20.1	18.7		20.5	20.9
	19.2	19.0		19.4	20.1
	18.7	18.3		19.3	19.5
	18.06	17.7		19.0	19.06
	17.7	17.7		18.8	18.4
	17.9	17.9		18.4	17.8
	17.9	17.4		18.06	18.0
№ з/п зони вимірювання	Середина лапи		№ з/п зони вимірювання	Кріплення	
	⊥			⊥	
18	14.3	18.6			
17	14.4	17.9			
16	13.7	18.2			
8	13.3	20.1			

Примітка: ⊥ - відповідає поперечному вимірюванню, || - продольному

Таблиця В2 - Показання коерцитивної сили на культиваторній лапі після експлуатації, А/см

№ з/п зони вимірювання	Ліва частина лапи		№ з/п зони вимірювання	Права частина лапи	
	⊥			⊥	
	24.0			21.7	
	24.7			21.9	
	22.6			22.8	
	21.3			23.1	
	20.4			24.6	
№ з/п зони вимірювання	Середина лапи		№ з/п зони вимірювання	Кріплення	
	⊥			⊥	
	17.3				
	20.7				

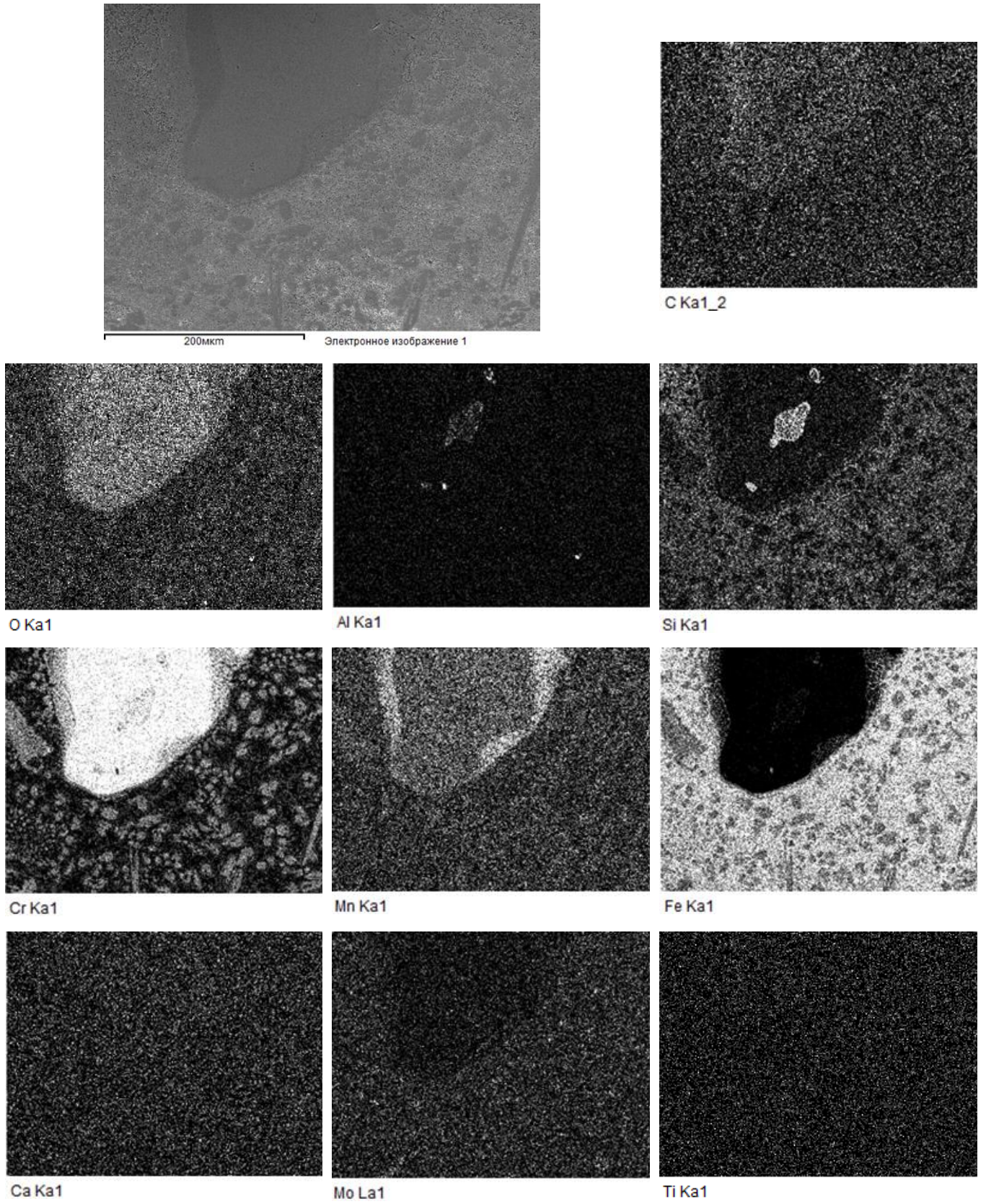


Рисунок Г.1 – Склад включень при введенні глини в наплавлення.

Термоелектронна емісія

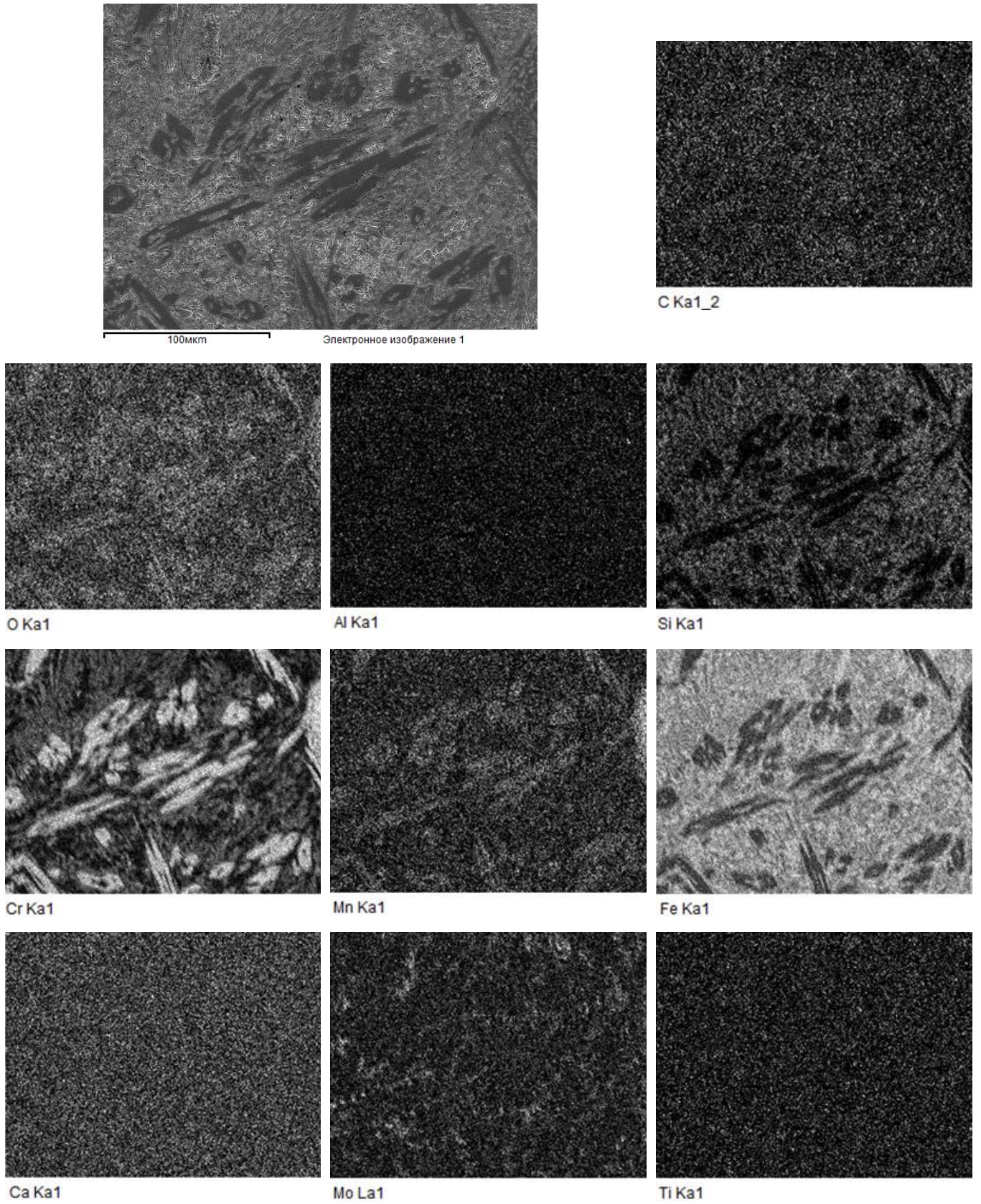


Рисунок Г.2 – Розподіл компонентів в покритті при модифікуванні бентонітової
ГЛИНОЮ

Твердість замікро-Вікерсом UIT HVмікро-1 (Навантаження 50 г (0,49 Н), витримка 10с)

Таблиця Г1 - Наплавлення електродом Т-620

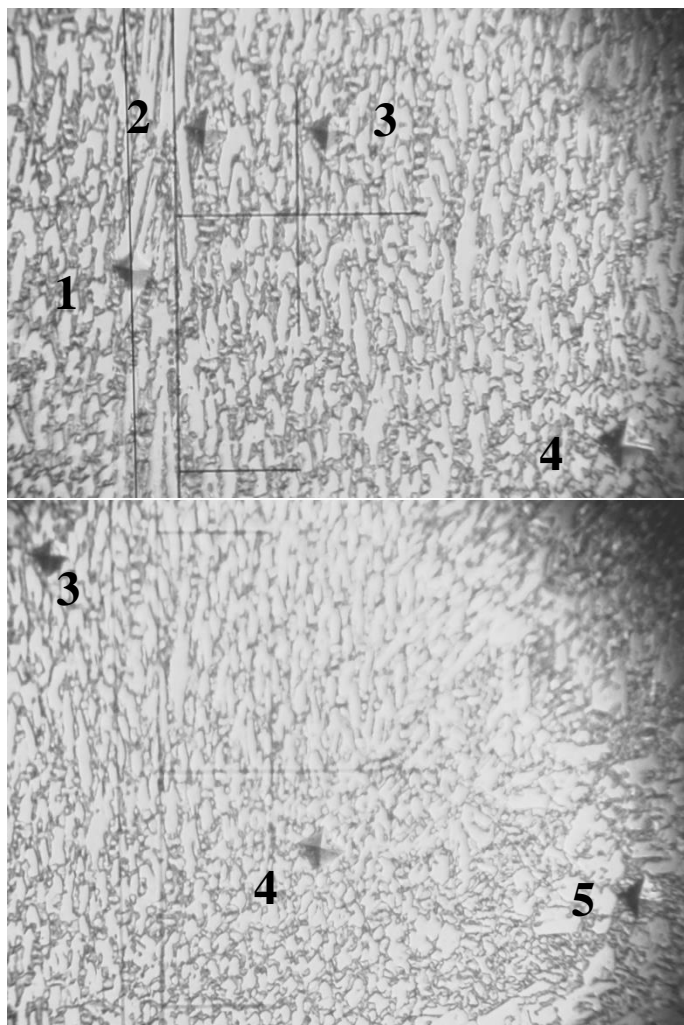
Поверхня наплавлення

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



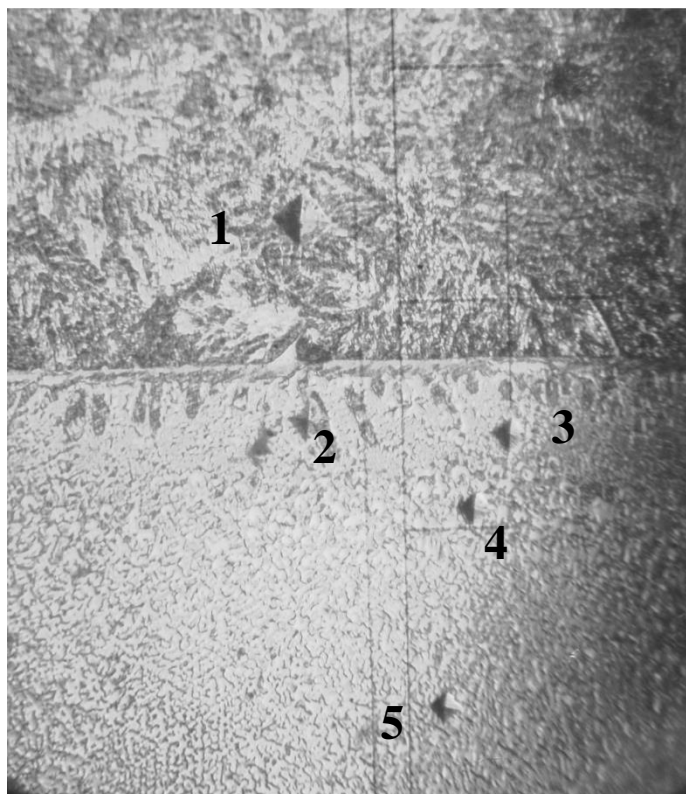
Середня частина наплавлення

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



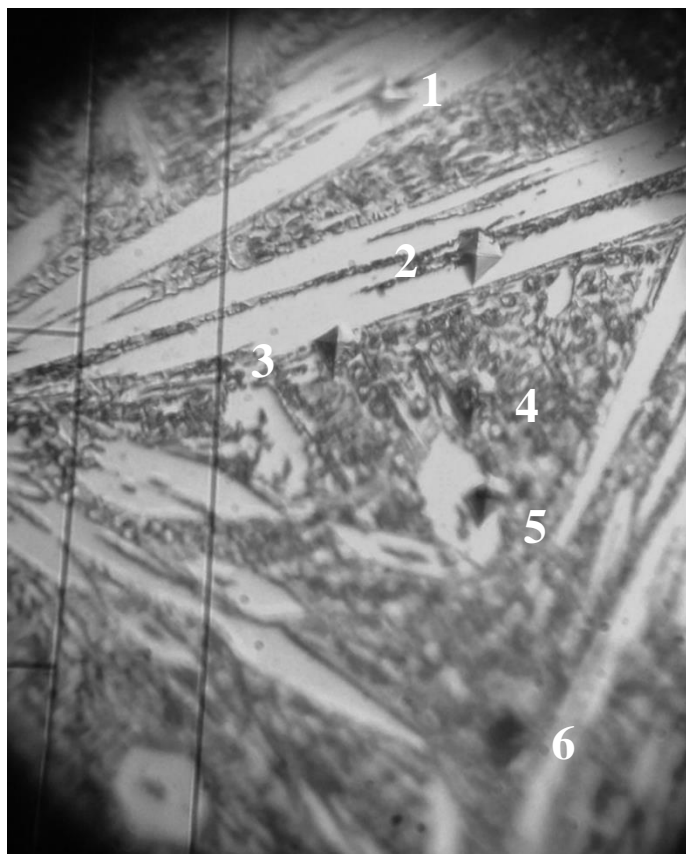
Перехідна зона

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



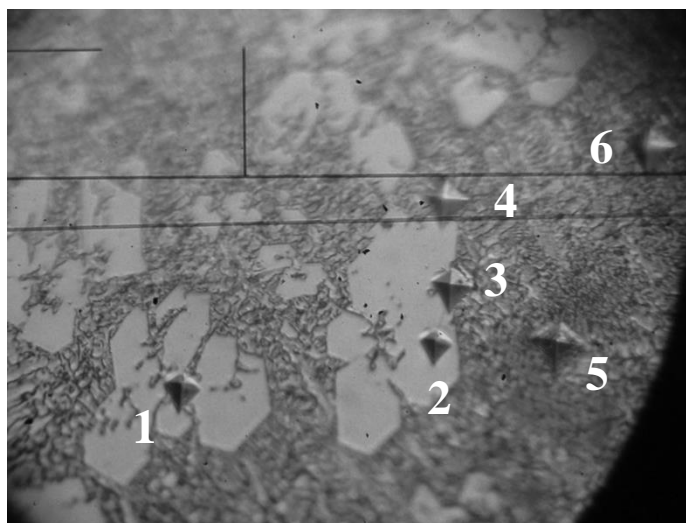
Таблиця Г2 - Наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти
Поверхня наплавлення

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D ₁ 10,91	975,3
	D ₂ 9,38	
2	D ₁ 10,94	851,1
	D ₂ 10,00	
3	D ₁ 10,00	915,7
	D ₂ 10,19	
4	D ₁ 10,50	975,3
	D ₂ 9,06	
5	D ₁ 9,00	1160,7
	D ₂ 8,88	
6	D ₁ 10,75	732,6
	D ₂ 11,75	



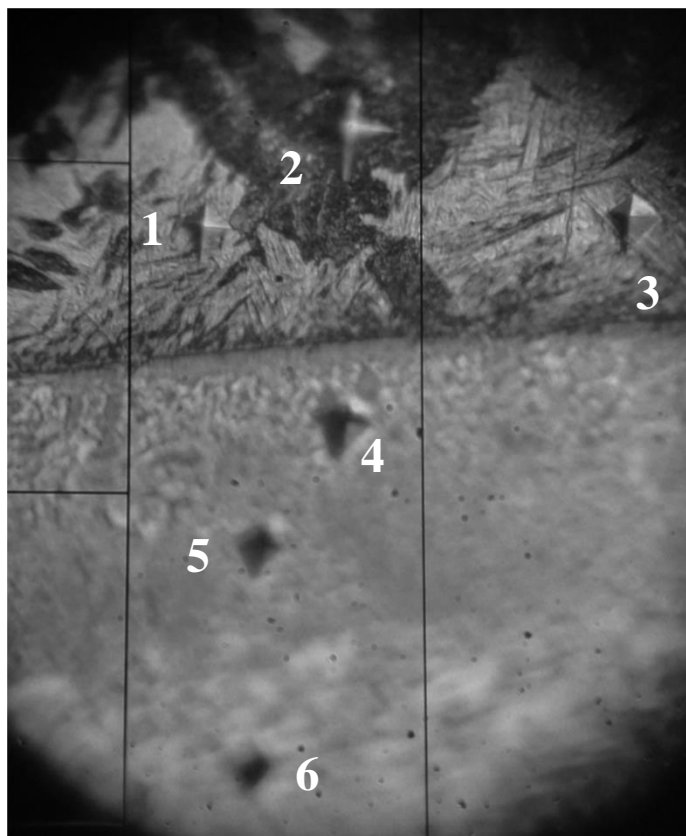
Середня частина наплавлення

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D ₁ 9,06	1211,0
	D ₂ 8,50	
2	D ₁ 8,63	1381,1
	D ₂ 7,75	
3	D ₁ 10,94	871,8
	D ₂ 9,69	
4	D ₁ 12,31	708,8
	D ₂ 10,63	
5	D ₁ 11,69	686,1
	D ₂ 11,63	
6	D ₁ 12,06	650,6
	D ₂ 11,88	



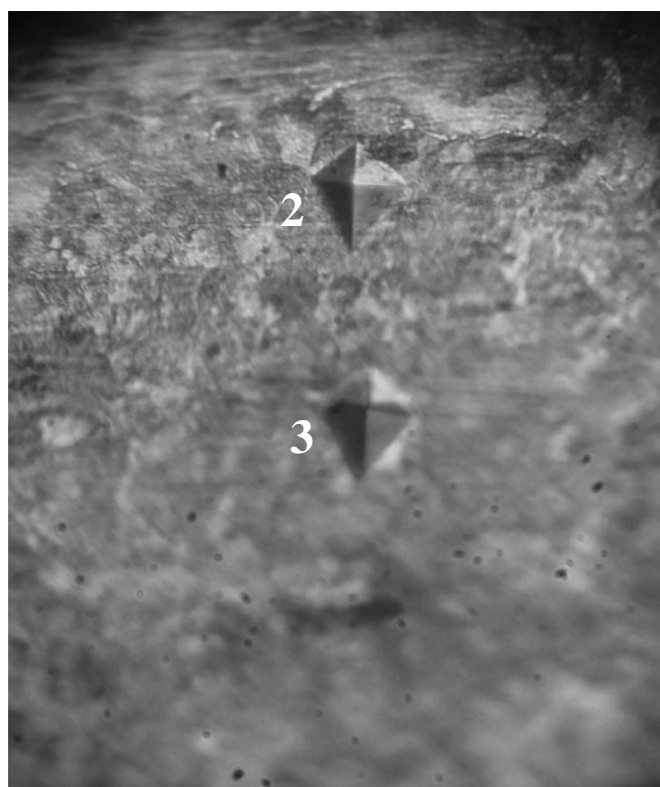
Перехідна зона

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, НV
1	D ₁ 11,88	708,8
	D ₂ 11,00	
2	D ₁ 19,81	255,2
	D ₂ 18,38	
3	D ₁ 13,38	664,5
	D ₂ 10,31	
4	D ₁ 12,88	559,3
	D ₂ 12,88	
5	D ₁ 10,75	851,1
	D ₂ 10,19	
6	D ₁ 10,38	893,4
	D ₂ 10,00	



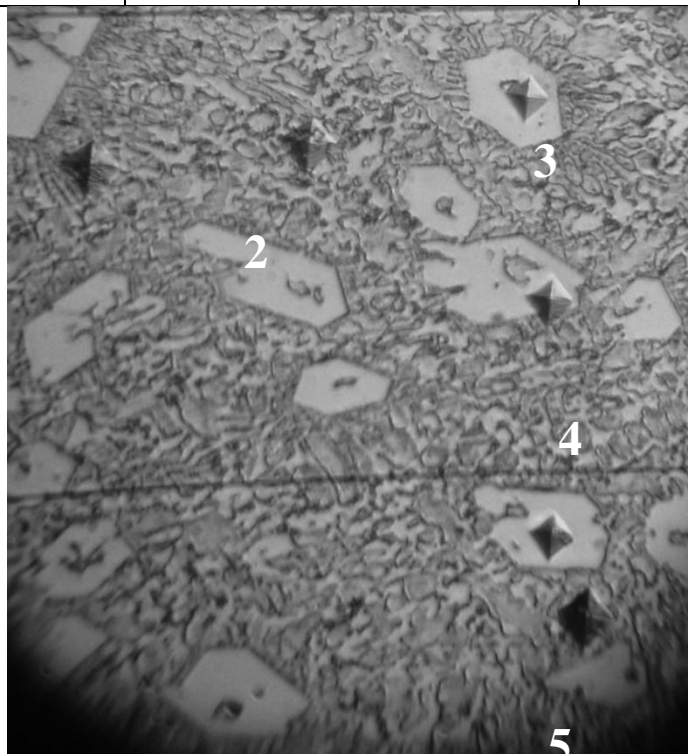
Основний метал

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D ₁ 17,13	320,8
	D ₂ 16,88	
2	D ₁ 18,88	270,9
	D ₂ 18,13	
3	D ₁ 18,13	304,9
	D ₂ 16,75	



Таблиця ГЗ - Наплавлення електродом Т-620 з обмазкою немагнітною фракцією
детонаційної шихти
Поверхня наплавлення

Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D ₁ 10,31	811,7
	D ₂ 11,06	
2	D ₁ 11,44	701,1
	D ₂ 11,56	
3	D ₁ 9,56	1083,6
	D ₂ 8,94	
4	D ₁ 9,06	1144,7
	D ₂ 9,00	
5	D ₁ 8,31	1383,1
	D ₂ 8,06	
6	D ₁ 11,69	693,5
	D ₂ 11,44	



Продовження табл. ГЗ

Средня часть наплавки

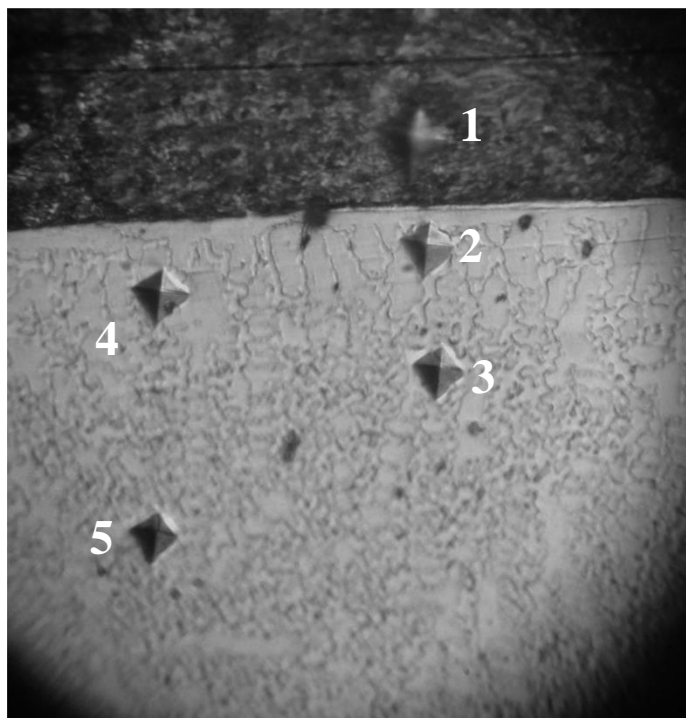
Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
-------------------	-----------	---------------

1	D ₁ 9,56	975,3
	D ₂ 9,94	
2	D ₁ 10,25	784,0
	D ₂ 11,76	
3	D ₁ 10,31	861,3
	D ₂ 10,50	
4	D ₁ 9,13	1160,7
	D ₂ 8,75	
5	D ₁ 12,11	678,8
	D ₂ 11,25	
6	D ₁ 11,25	678,8
	D ₂ 11,19	



Переходная зона

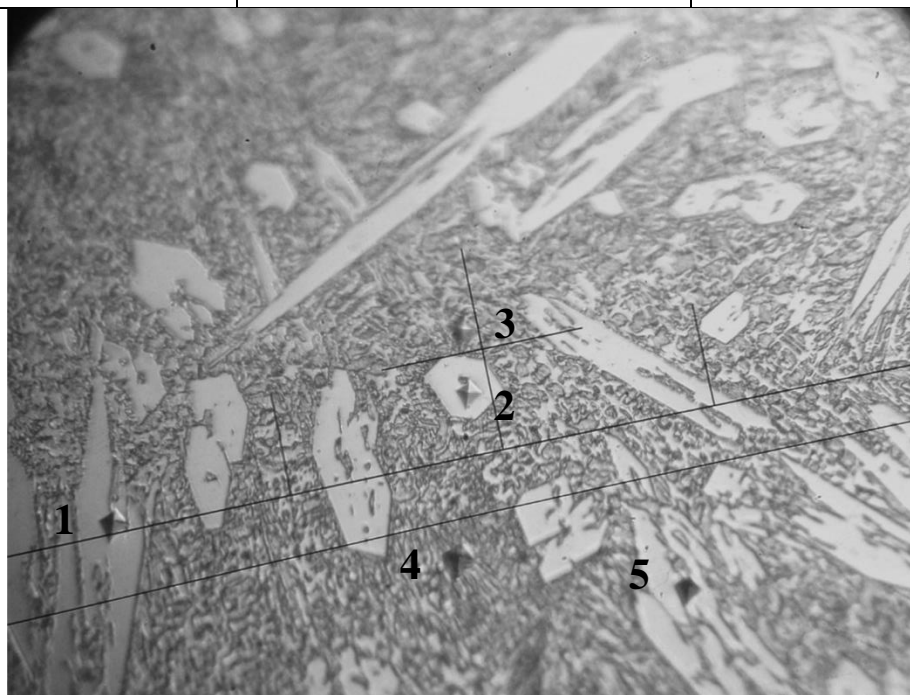
Точка измерения	Диагонали	Твёрдость, HV
1	D ₁ 18,56	274,6
	D ₂ 18,25	
2	D ₁ 12,75	599,4
	D ₂ 12,13	
3	D ₁ 11,81	766,3
	D ₂ 10,25	
4	D ₁ 12,35	624,2
	D ₂ 12,13	
5	D ₁ 10,88	811,7
	D ₂ 10,50	



Таблиця Г4 - Електрод Т-620 з обмазкою бентонітовою глиною

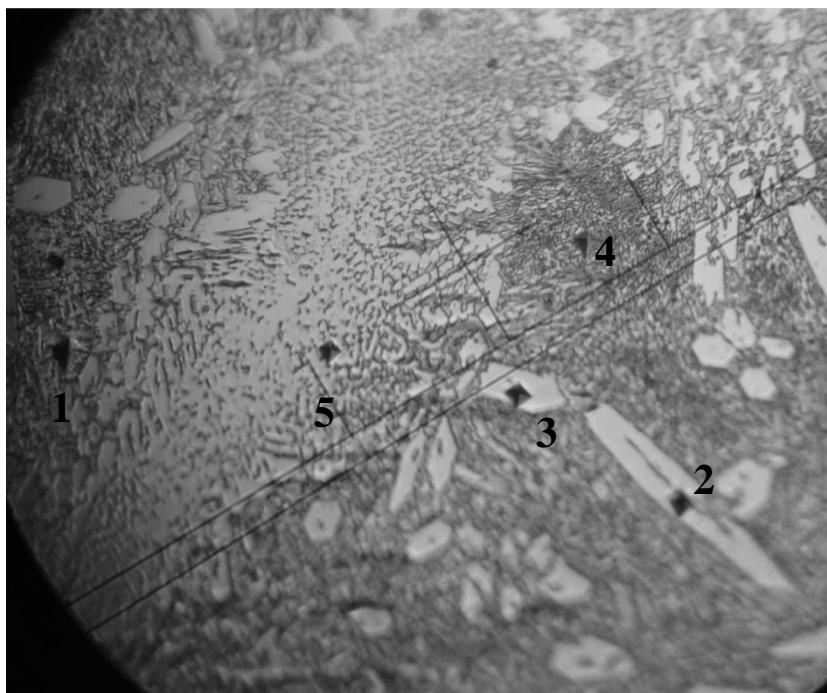
Поверхня наплавлення

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



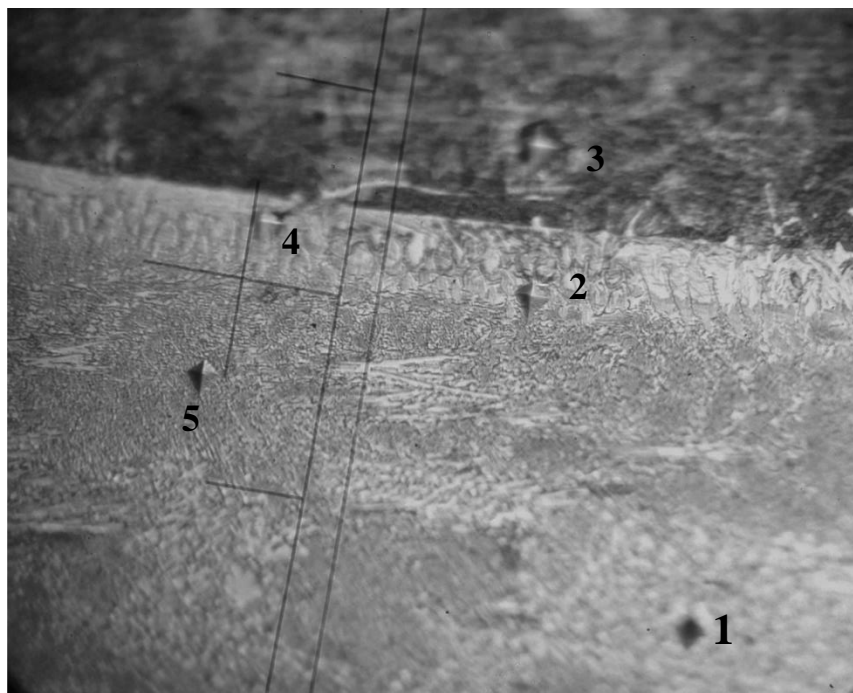
Середня частина наплавлення

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



Переходна зона

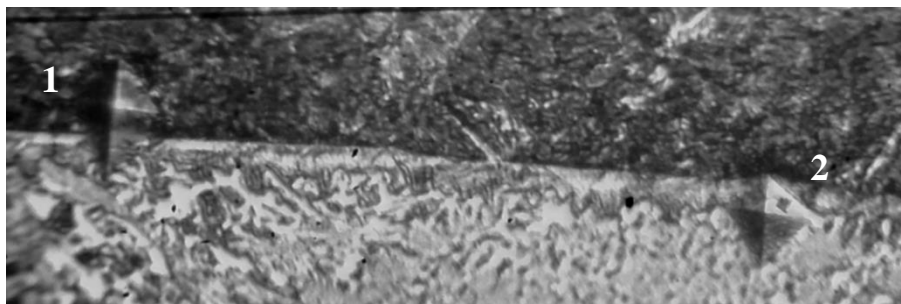
Точка вимірювання	Діагоналі	Твердість, HV
1	D ₁ 10,81	831,1
	D ₂ 10,38	
2	D ₁ 12,44	671,6
	D ₂ 12,50	
3	D ₁ 15,63	338,0
	D ₂ 17,56	
4	D ₁ 11,25	559,3
	D ₂ 14,56	
5	D ₁ 10,06	766,3
	D ₂ 12,0	



Таблиця Г5 - Твердість по мікро-Вікерсу навантаження 50 г (0,49 Н), витримка 10 с.

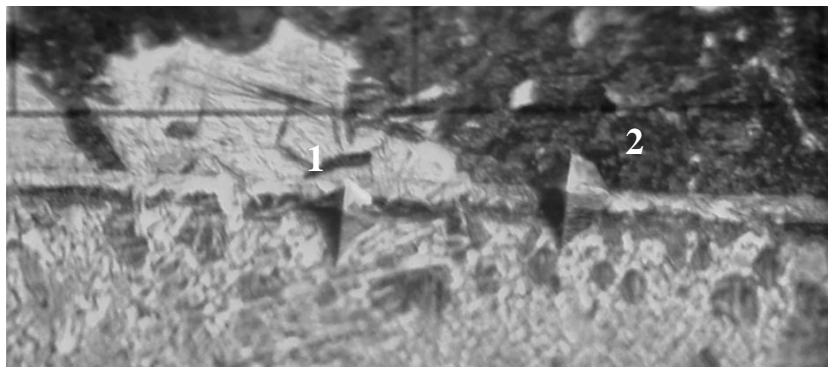
Наплавлення електродом Т-620

№ вимірювання	Діагоналі	Мікротвердість HV	Міцність зчеплення, МПа
1	D ₁ 13.13	382.8	0,30
	D ₂ 18.00		
2	D ₁ 12.13	508.7	0,44
	D ₂ 14.88		



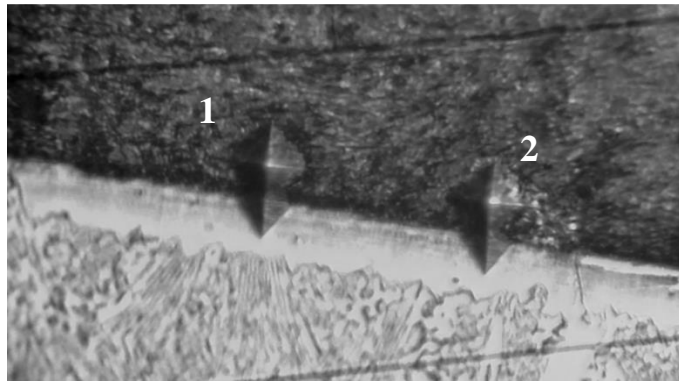
Таблиця Г6 - Наплавка електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти

№ вимірювання	Діагоналі	Мікротвердість HV	Міцність зчеплення, МПа
1	D ₁ 12,69	538,2	0,53
	D ₂ 13,56		
2	D ₁ 12,88	419,0	0,34
	D ₂ 16,88		



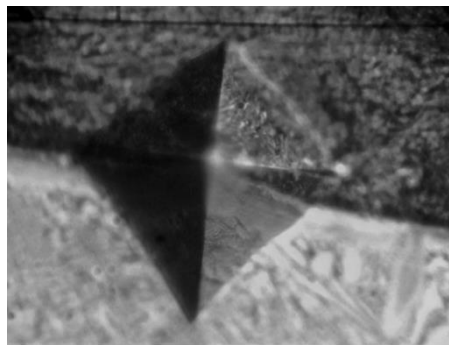
Таблиця Г7 - Наплавлення електродом Т-620 з обмазкою немагнітної фракції
детонаційної шихти

№ вимірювання	Діагоналі	Мікротвердість HV	Міцність зчеплення, МПа
1	D ₁ 14,95	300,6	0,21
	D ₂ 20,94		
2	D ₁ 15,88	280,3	0,23
	D ₂ 20,56		



Таблиця Г8 - Твердість по мікро-Вікерсу навантаження 1 кг, витримка 10 с

№ вимірювання	Діагоналі	Мікротвердість HV	Міцність зчеплення, МПа
1	D ₁ 72,50	336,9	0,34
	D ₂ 75,94		



Таблиця Г9 - Наплавлення електродом Т-620 з обмазкою бентонітовою глиною

№ вимірювання	Діагоналі	Мікротвердість HV	Міцність зчеплення, МПа
1	D ₁ 13,56	415,5	0,36
	D ₂ 16,31		
2	D ₁ 13,88	389,1	0,33
	D ₂ 17,06		



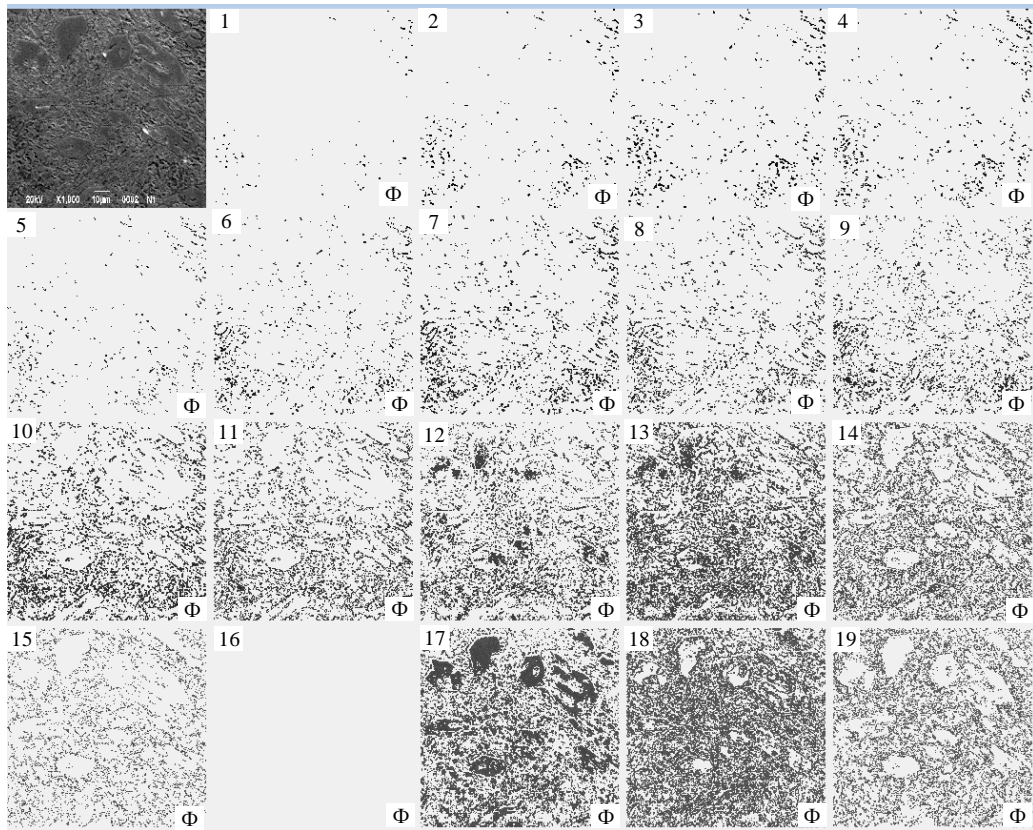
Таблиця Д.1 – Розрахунки частки фаз і їх взаємодія

Вміст фази, %	Фаза
1	2
Вихідне фото верх наплавлення без модифікування	
82,65	ферит
9,39	тільки бейніт (практично 0)
0,73	карбіди
4,05	ферит з бейнітом
0,45	бейніт з карбідом
2,73	всі три фази разом
Вихідне фото середина наплавлення	
81,58	ферит
3,90	тільки бейніт (практично 0)
1,67	карбіди
6,97	ферит з бейнітом
1,57	бейніт з карбідом
4,31	всі три фази разом
Вихідне фото перехідна зона	
56,65	ферит
4,90	тільки бейніт (практично 0)
1,60	карбіди
17,97	ферит з бейнітом
1,15	бейніт з карбідом
17,73	всі три фази разом
Зміцнене покриття, фото верх наплавлення	
62,76	ферит
6,40	тільки бейніт (практично 0)
6,90	карбіди
8,57	ферит з бейнітом
4,15	бейніт з карбідом
11,22	всі три фази разом
Зміцнене покриття, середина наплавлення	
75,26	ферит
5,15	тільки бейніт (практично 0)
3,30	карбіди
7,10	ферит з бейнітом
2,61	бейніт з карбідом
6,58	всі три фази разом
Перехідна зона покриття - основа	
89,47	ферит
2,77	тільки бейніт (практично 0)

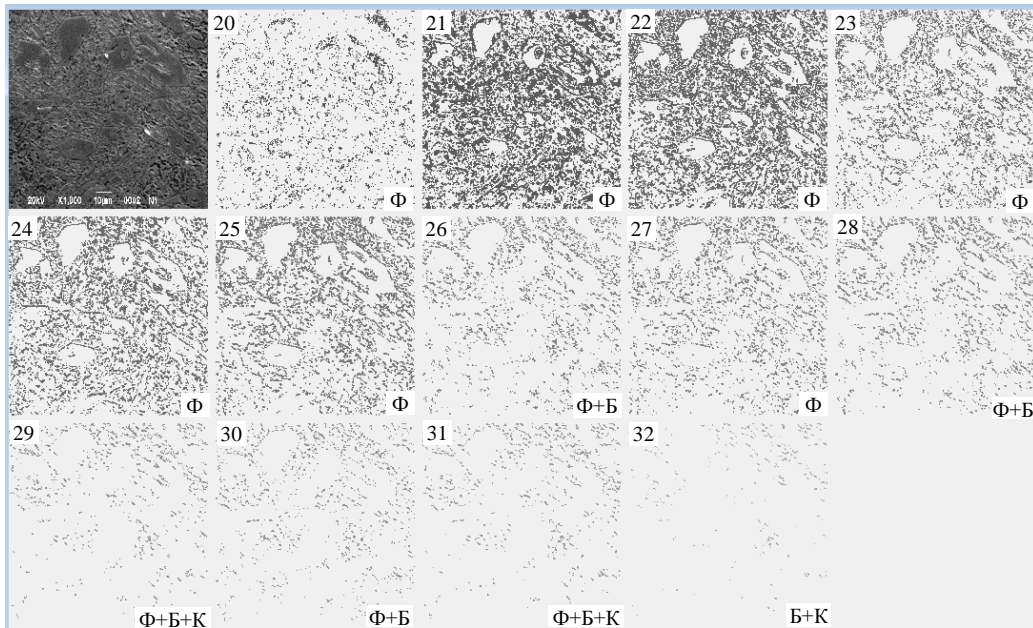
1	2
0,92	карбіди
4,36	ферит з бейнітом
0,50	бейніт з карбідом
1,98	всі три фази разом

Таблиця Д.2 – Кольори фаз і їх структурні взаємодії

Інтервал фаз	Фази	Колір фаз
1	Ферит	01 00 00 00 00
2	Ферит	01 02 00 00 00
3	Ферит	01 02 03 00 00
4	Ферит	01 02 03 04 00
5	Ферит	01 02 03 04 05
6	Ферит	02 03 00 00 00
7	Ферит	02 03 04 00 00
8	Ферит	02 03 04 05 00
9	Ферит	03 04 00 00 00
10	Ферит	03 04 05 00 00
11	Ферит	03 04 05 06 00
12	Ферит	04 05 00 00 00
13	Ферит	04 05 06 00 00
14	Ферит	04 05 06 07 00
15	Ферит	04 05 06 07 08
16	Ферит	04 05 06 07 08
17	Ферит	05 06 00 00 00
18	Ферит	05 06 07 00 00
19	Ферит	05 06 07 08 00
20	Ферит	06 00 00 00 00
21	Ферит	06 07 00 00 00
22	Ферит	06 07 08 00 00
23	Ферит	06 07 08 09 00
24	Ферит	07 08 00 00 00
25	Ферит	07 08 09 00 00
26	Ферит+бейніт	07 08 09 10 00
27	Ферит	08 09 00 00 00
28	Ферит+бейніт	08 09 10 00 00
29	Ферит+бейніт+карбіди FeC	08 09 10 11 00
30	Ферит+бейніт	09 10 00 00 00
31	Ферит+бейніт+карбіди FeC	09 10 11 00 00
32	Бейніт+карбіди FeC та Fe _x C _y	10 11 12 00 00

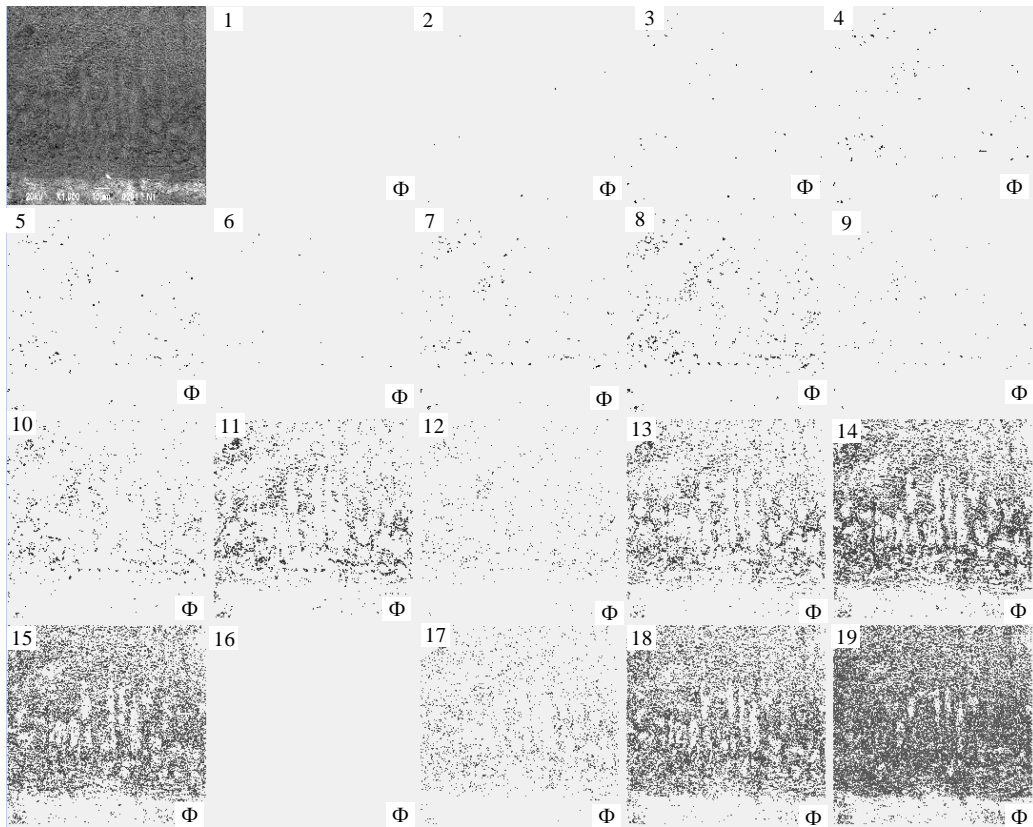


а

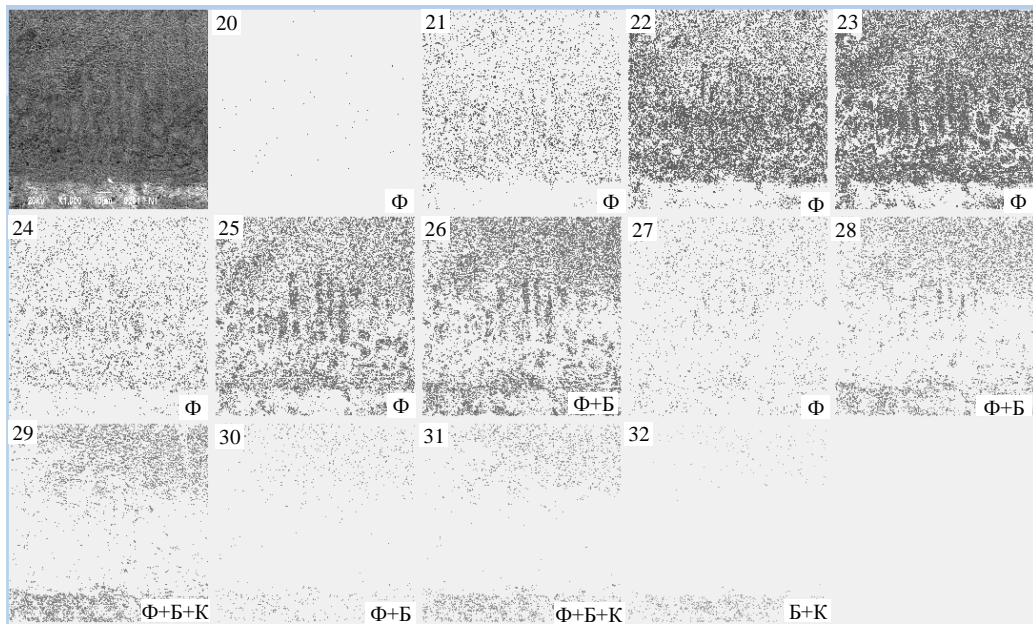


б

Рисунок Д.1 – Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз у верхній зоні покриття без введення модифікатора

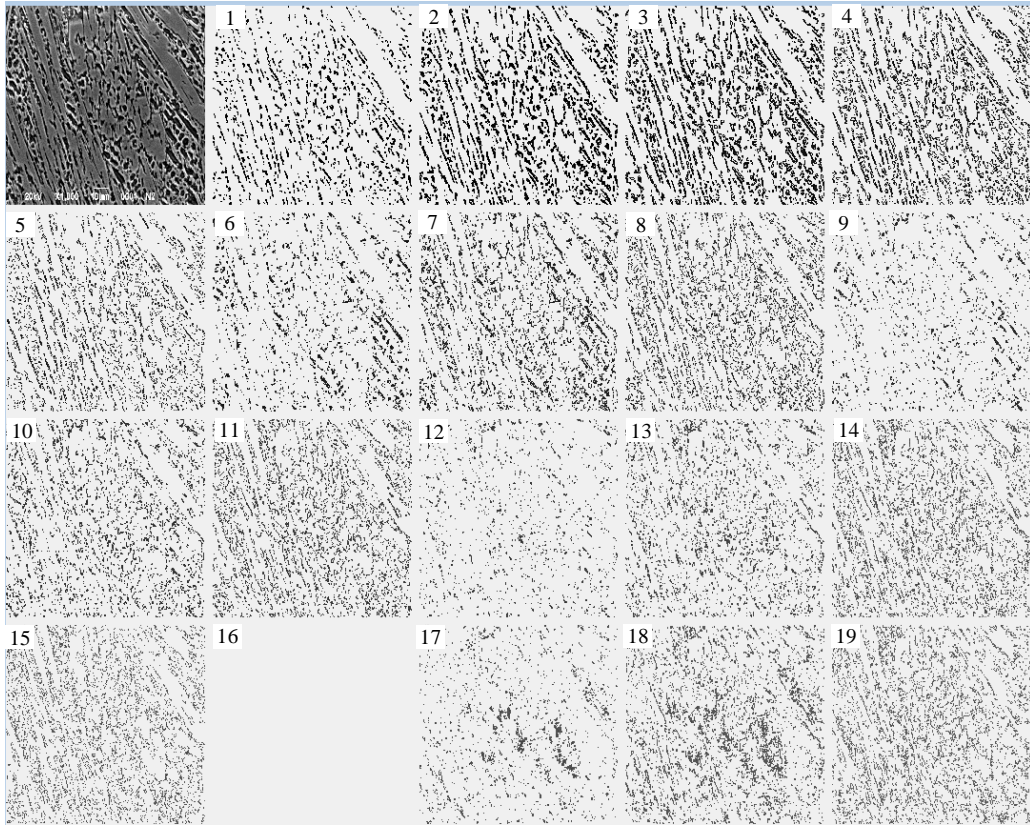


а

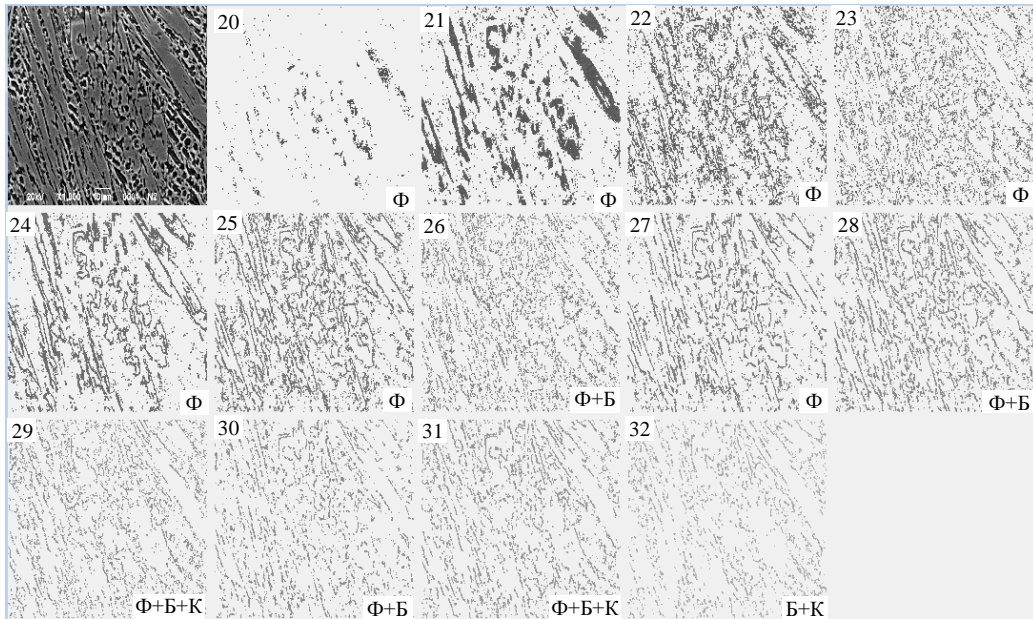


б

Рисунок Д.2 - Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз у перехідній зоні без модифікатора

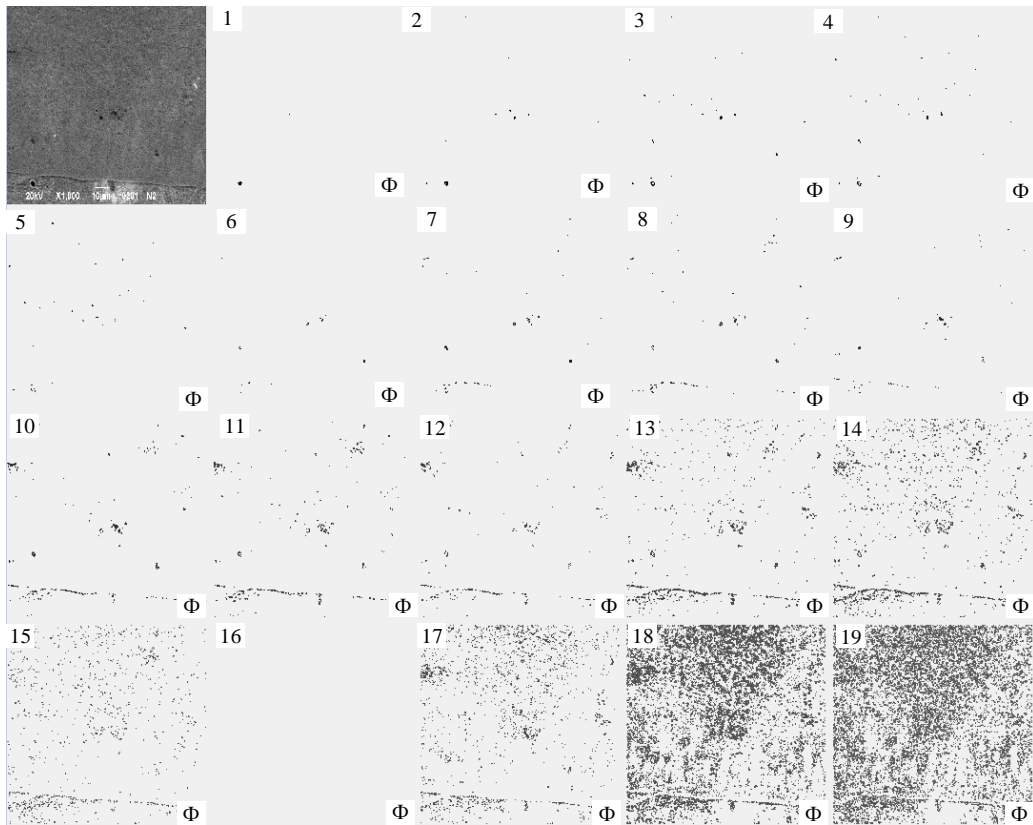


а

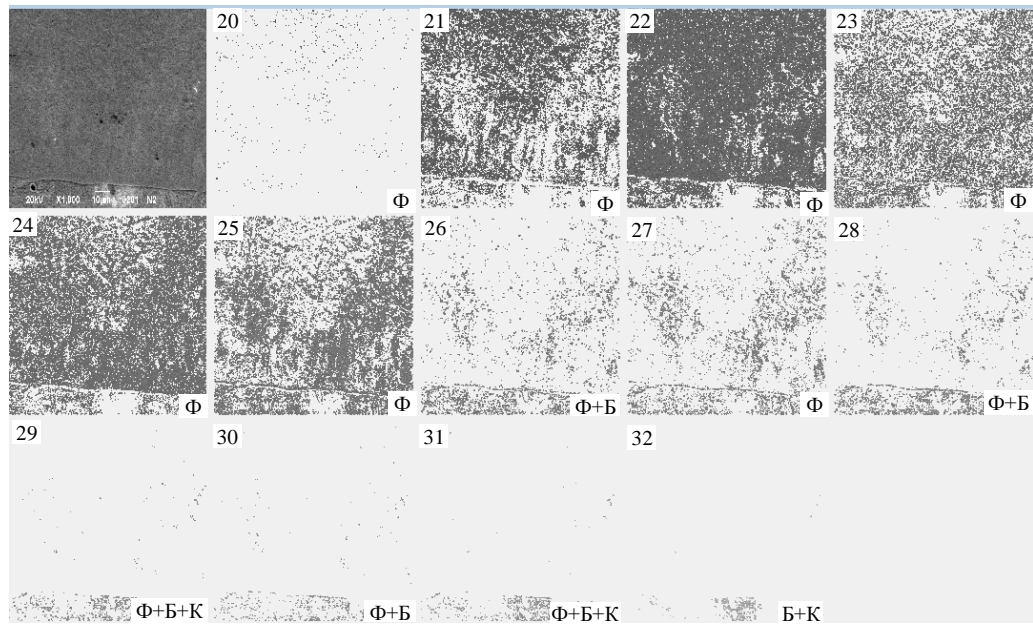


б

Рисунок Д.3 -Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз у верхній зоні покриття з введенням модифікатора бентонітової глини



а



б

Рисунок Д.4 - Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз у перехідній зоні покриття з введенням модифікатора бентонітової ГЛИНИ

КОПІЯ

Затверджую

Проректор з наукової роботи
ХНТУСГ ім. Петра Василенка
д.т.н., с.н.с. Мельник В.І.
« 15 » 05 2018р.



Затверджую

Голова фермерського
господарства «Планета»
Менко
« 15 » 05 2018р.



АКТ

про впровадження науково-дослідної роботи за темою
«Підвищення зносостійкості деталей нано- та дисперсними домішками»

Ми, які нижче підписалися:

- представники виконавця – Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, в особі керівника науково-дослідної роботи к.т.н., професора – Нанки Олександра Володимировича, з однієї сторони, та

- представники замовника – Фермерського господарства «Планета», в особі голови Луценка Івана Миколайовича.

Склали дійсний акт в тому, що результати виконаної науково-дослідної роботи, отриманої в період з 1 травня 2017 року по 30 квітня 2018 року, впроваджені в фермерському господарстві «Планета», Харківська область, Дергачівський район, смт. Козача Лопань.

Розроблено новий енергозберігаючий спосіб модифікування при відновленні деталей електродуговим наплавленням зношеного шару, який дозволяє вводити порошкові домішки, в розчин і забезпечувати їх рівномірний розподіл. Він полягає в нанесенні на зварювальний дріт спеціальних чарунков, які заповнюються нанодомішками перед наплавленням. Чарунки формували під час подачі дроту експериментальною наплавлювальною головкою шляхом обтиску спеціальними роликами з виступами. Для забезпечення зчеплення модифікуючого порошку з дротом на сформовані попередньо чарунки, спеціальними валиками наносили клей.

Впровадження результатів досліджень дозволило використовувати новий технологічний процес відновлення з мінімальними витратами модифікуючих нанодомішок та спосіб їх введення в рідку ванну для відновлення посадочних місць підшипників валів коробки перемінних передач трактора Т-150К. Це дало змогу економно зміцнювати деталі. Незалежно від типу вуглецевмісної домішки кожна з досліджуваних модифікаторів підвищує зносостійкість. Так, при наплавленні дротом ER321 з введенням детонаційної шихти вона зростає на 28%.

Випробування у виробничих умовах показали, що стійкість таких деталей, відновлених зі зміцненням підвищилась в 1,3 рази, що забезпечить економічну ефективність від впровадження технології відновлення в обсязі тільки 48 валів на рік до 81312 грн. при вартості деталі 1100 грн.

Новий технологічний процес відновлення деталей захищений патентом України №92472 та №98213.

Представники виконавця
ХНТУСГ імені Петра Василенка
- науковий керівник теми:
к.т.н., професор Мельник В.І. О.В. Нанка
- професор кафедри ТРСВ ХНТУСГ
імені Петра Василенка:
д.т.н., професор Скобло Т.С.
- відповідальний виконавець:
інженер Марков О.В.
- виконавець:
к.т.н. Рибалко І.М.

Представники замовника
Фермерське господарство «Планета»
Інженер - механік Луценка І.М.

КОПІЯ



Проректор з наукової роботи
ХНТУСГ ім. Петра Василенко
Мельник В.І.



Головний інженер
ДП «Завод імені В.О. Малишева»
Литвин Б.Я.

Акт

промислової апробації технології зміцнення при відновленні валів з модифікуванням
магнітної частки детонаційної шихти від утилізації боєприпасів




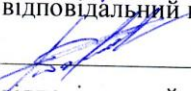
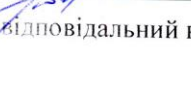
Дана робота виконувалась згідно договору №191дп від 04.04.2016 р. про науково-технічне співробітництво між ДП «Завод імені В.О. Малишева» і Харківським національним технічним університетом сільського господарства імені Петра Василенка.

В машинобудуванні широко використовують вали, які виготовляють з легованих сталей (40ХН, 40ХН2МА, 30ХГТ, 30ХГСА та інш.). В залежності від необхідності забезпечення експлуатаційних властивостей вали піддають термічним та поверхневим зміцнюючим обробкам. Номенклатура використання валів і їх вага дуже велика і залежить від призначення для конкретної техніки. Тому вартість їх змінюється в значному інтервалі. В даному випадку досліджували відновлення шліцьових валів вартістю 2200-2800 грн/шт (середня 2400 грн).

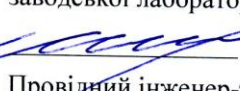
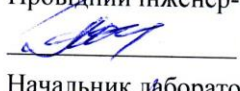
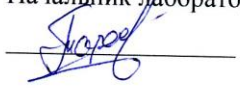
На основі стендових випробувань, виконаних на базі ДП «Завод імені В.О. Малишева» встановлено, що при відновленні валів наплавленням з модифікуванням домішкою магнітної частки детонаційної шихти з алмазною фракцією та мікролегуючими компонентами забезпечуються стабільні якісні показники та підвищення зносостійкості на 20-25%.

Виконавці від
ХНТУСГ імені Петра Василенка

Керівник

 Скобло Т.С., д.т.н., проф.
 Сайчук О.В., д.т.н., проф.
 Романченко В.М., к.т.н, доц.
 Омельченко Л.В. –
відповідальний виконавець
 Рибалко І.М., к.т.н. –
відповідальний виконавець

Виконавці від
ДП «Завод імені В.О. Малишева»

 Начальник центральної
заводської лабораторії, к.т.н., с.н.с.
Сатановський Є.А.
 Провідний інженер-технолог, к.т.н.
Олійник О.К.
 Начальник лабораторії ІМК
Мальцев Т.В.

КОПІЯ

Затверджую:

Головний інженер

Державне підприємство

«Завод імені В. О. Малишева»

О. І. Шейко

м. Харків



АКТ

про прийняття до випробувань результатів виконання досліджень вторинної сировини детонаційного вибухового синтезу у якості додатків до змащувальних матеріалів

Акт складено комісією у складі:

Голова комісії:

Головний механік

– Комаров М. М.

Члени комісії:

Заступник начальника ЦЗЛ (34)

– Олексенко С. А.

Начальник лабораторії

виготовлення зразків ЦЗЛ (34)

– Горич О. М.

Комісія розглянула отримані результати випробувань додатків продуктів детонаційного синтезу до змащувальних матеріалів, представлених в патентах на корисну модель №107500, №108224 авторів Скобло Т. С., Марченко О. Ю., Рибалко І. М. та інших, а також результати лабораторних досліджень і встановила наступне:

1. Продукти детонаційного синтезу, одержані від утилізації боєприпасів (детонаційна шихта) можуть бути використані як домішки до змащувальних матеріалів для підвищення їх антифрикційних властивостей та прискорення припрацювання деталей машин.
2. Попередні випробування показали підвищення противозадирних властивостей мастила с домішками детонаційної шихти та зменшення коефіцієнтів тертя спряжень з сірим легованим чавуном та з направляючими ковзання, виготовленими з політетрафторетилену.
3. Одержані результати дали змогу при змащенні з додатками замість бронзи БрА9Ж4 використати легований чавун в сполученні «гвинт-гайка», яке зараз знаходиться в експлуатації.
4. Випробування додатків до змащувальних матеріалів доцільно розширити для визначення зменшення зносу пар тертя і можливої економії енергоресурсів за рахунок менших значень коефіцієнтів тертя, визначених лабораторними випробуваннями.
5. Розробку доцільно випробувати на виробничому обладнанні служби механіка (відділ 80) та в лабораторії виготовлення зразків (ЦЗЛ), а також на виробах нашого ДП.

Голова комісії:

Головний механік

Комаров М. М.

Члени комісії:

Заст. начальника ЦЗЛ (34)

Олексенко С. А.

Начальник лабораторії

виготовлення зразків ЦЗЛ (34)

Горич О. М.

КОПІЯ

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор СТОВ «Мрія»

Ю.А. Кондратенко

20 21 р.



ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ХНТУСГ

Д.Т.Н. с.н.с.

В.І. Мельник

20 21 р.



Акт

дослідно-виробничої перевірки

зміцнених культиваторних лап електродом Т-620 з додатковим модифікуванням бентонітовою глиною, згідно розробленої нової технології

Ми, що нижче підписалися, професор кафедри ТСРВ д.т.н. Скобло Т.С., старший викладач, к.т.н. Рибалко І.М., доцент, к.т.н. Тіхонов О.В., асистент Захаров А.В. та представники від підприємства СТОВ «Мрія», керівник інженерної служби Труш О.І., провідний інженер Глебов М.М., менеджер із закупівель з/ч та матеріалів Колодяжний С.С. склали цей акт про те, що в умовах СТОВ «Мрія» проведена дослідно-виробнича перевірка нової технології для робочих органів – культиваторних лап, які зміцнені за технологією, розробленою в ХНТУСГ, із використанням наплавлення електродом Т-620 і додатковим модифікуванням бентонітовою глиною. Спосіб захищено патентом України №130824. Представлений документ підтверджує, що в результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених згідно схеми та технології ХНТУСГ, ресурс становить 3185 га на один робочий орган, величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм, при цьому стандартно виготовлені лапи від 39 до 86 мм та мають більш високі за рівнем значення в ~ 2,5 рази відповідно.

КОПІЯ

За результатами дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап комісія рекомендує технологію такого зміцнення електродом Т-620 і додатковим модифікуванням бентонітовою глиною робочих органів машин, до широкого впровадження в умовах сільськогосподарських підприємств АПК України.

Робота виконувалась згідно деждоговірних та госпдоговірних тематик. Економічний ефект від впровадження тільки 1210 шт. культиваторних лап (10 культиваторів) складе 196927,5 грн.

Від ХНТУСГ



Т.С. Скобло (науковий керівник
роботи)



І.М. Рибалко (відповідальний
виконавець)



О.В. Тіхонов (виконавець)



А.В. Захаров (виконавець)

Від СТОВ «Мрія»



О.І. Труш

М.М. Глебов

С.С. Колодяжний

КОПІЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи ХНТУСГ

д.т.н., с.н.с.  Мельник В.І.

**Розрахунок економічної ефективності технології
зміцнених культиваторних лап електродом Т-620
з додатковим модифікуванням бентонітовою глиною**

Випробування зміцнених стрілочастих лап проводили на культиваторі CASE Tiger Mate господарства СТОВ «Мрія» Харківської області.

Напрацювання склало 3185 га, згідно договору з підприємством.

Зміцнені нові і звичайні культиваторні лапи встановлювались на культиватор через одну. Це було зроблено для виявлення місць однакового зношування.

В результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених, згідно схеми та технології ХНТУСГ, ресурс становить 3185 га на один робочий орган. Величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм, при цьому стандартно виготовлені лапи 39 до 86 мм та мають більш високі за рівнем значення в $\sim 2,5$ рази відповідно аналогічних, де використовували тільки стандартні вироби на інших машинах.

Економічну ефективність [1, 2] розробленої технології розглядали на прикладі зміцнення стрілочастих лап культиваторів типу Case Tiger Mate із застосуванням, на основі технології модифікування електродом з обмазкою бентонітовою глиною.

Економічну ефективність від застосування і впровадження розробленої технології зміцнення лап культиваторів можна визначити за формулою:

$$E_3 = \left(\frac{Ц_H}{P_H} - \frac{Ц_3}{P_3} \right) P_3 \cdot N_G, \quad (1)$$

де E_3 - економічна ефективність від зміцнення лап, грн.;

$Ц_H, Ц_3$ - ціна нової і зміцнених лап відповідно, грн.;

P_H, P_3 - напрацювання нової і зміцнених лап відповідно, га;

N_G - обсяг досліджених зміцнюємих лап.

Ціну реалізації зміцненої з використанням розробленої технології стрілкової лапи приймає рівною собівартості її зміцнення, тобто:

$$Ц_3 = C_3 + C_H, \text{ грн.} \quad (2)$$

де C_3 - собівартість зміцнення лапи культиватора, грн.

Собівартість зміцнення стрілкової лапи визначають за формулою:

$$C_3 = 3П + C_M, \quad (3)$$

де $3П$ - заробітна плата (основна і додаткова) виробничих робітників з нарахуванням, грн.;

V_M - вартість, що використовуються у їх зміцненні, грн.;

V_H - вартість нової деталі, грн.;

Заробітна плата виробничих робітників визначали:

$$3П = \left(\frac{T_{H1} \cdot C_{P1}}{60} + \frac{T_{H2} \cdot C_{P2}}{60} + \dots + \frac{T_{Hi} \cdot C_{Pi}}{60} \right) \cdot K_{П} \cdot K_{Д} \cdot K_{С}, \quad (4)$$

де $T_{H1}, T_{H2}, \dots, T_{Hi}$ - норми часу на проведення операцій технології зміцнення в розрахунку на одну лапу культиватора, хв.;

$C_{P1}, C_{P2}, \dots, C_{Pi}$ - годинні тарифні ставки необхідних розрядів робіт на виконання операцій зміцнення, грн.;

$K_{П}$ - коефіцієнт, що враховує доплату премій ($K_{П} = 1,1 \dots 1,4$);

$K_{Д}$ - коефіцієнт, що враховує заробітну плату (додаткову) ($K_{Д} = 1,1 \dots 1,5$);

$K_{С}$ - коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальне страхування ($K_{С} = 1,302$).

Розрахунки наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Заробітна плата виробничих робітників при зміцненні лапи
культиватора

№ операції	Найменування операції	Норма часу на виконання, год	Годинна тарифна ставка, грн.	Заробітна плата на операцію, грн.
Підготовка електроду				
05	Термічна	1,5	50,18	3,75
10	Виготовлення суміші	0,1	37,5	3,75
15	Нанесення суміші на електрод	0,1	37,5	3,75
20	Сушильна	24	-	-
25	Термічна	1,5	50,18	3,75
Всього:				15,00
Операція зміцнення				
30	Слюсарна (зачищення й розмічення)	0,2	63,67	12,7/3
35	Зварювальна (наплавлювальна)	0,1	76,20	7,62/3
Всього:				6,77
Разом:				21,77

Вартість модифікуючих матеріалів визначали за формулою:

$$B_M = \sum_{i=1}^{\lambda} g_i \cdot C_i, \quad (5)$$

де g_i - норма витрати i -го матеріалу на одну лапу при зміцненні;

λ - кількість матеріалів, що застосовуються при зміцненні, шт.;

C_i - ціна 1 кг i -го матеріалу, грн.

Для полегшення розрахунків склали таблицю 2.

Таким чином, ефективність впровадження розробленої технології зміцнення (1) в розрахунку на одну стрілчасту лапу складе:

$$E_3 = 162,75 \text{ грн.}$$

Таблиця 2 - Вартість матеріалів, що застосовуються при зміцненні

Найменування матеріалу	Норма витрат, гр (шт.)	Ціна 1 кг (шт.) матеріалу, грн.	Витрати на матеріали, грн.
1. Бентонітова глина	1,375	109,00 (1 кг)	0,15
2. Клей ПВА	1,875	18,30 (200гр)	0,17
3. Електрод Т-620 Ø5мм	1/3	150,00 (25,00 грн/шт)	8,34
Разом			8,66

За даними підприємств Харківської області на її території знаходиться не менше 10 культиваторів типу Case Tiger Mate. Таким чином, річна (мінімальна) програма зміцнення даних деталей складе не менше 1210 шт.

Тоді економічна ефективність впровадження розробленої технології зміцнення в розрахунку на дану кількість зміцнюємих лап складе:

$$E_3 = 162,75 \cdot 1210 = 196927,5 \text{ грн.}$$

Термін окупності капітальних вкладень визначається за формулою:

$$T_{OK} = K / E_3, \quad (6)$$

де K - капітальні вкладення на обладнання, включаючи витрати на його доставку, монтаж і налагодження, грн.

$$T_{OK} = 52000 / 196927,5 = 0,26$$

Показники оцінки розробленого технологічного процесу зміцнення стрілчастих лап культиваторів типу Case Tiger Mate зведені в таблицю 3.

КОПІЯ

Таблиця 3 - Показники оцінки розробленої технології зміцнення стрілчастих лап
культиваторів

Найменування показників	Позначення	Розглянутий варіант	
		нова лапа	зміцнена
1. Річний обсяг зміцнюємих лап, шт.	$N_{Г}$	-	1210
2. Ціна нової лапи, грн.	$Ц_{Н}$	192,2	-
3. Собівартість зміцнення лапи, грн.	$С_{З}$	-	52,88
4. Ціна зміцненої лапи, грн.	$Ц_{З}$	-	245,1
5. Напрацювання нової лапи, га	$P_{Н}$	1500	-
6. Напрацювання зміцненої лапи, га	$P_{З}$	-	3185
7. Економічна ефективність, грн.	$E_{З}$	-	196927,5
8. Термін окупності капітальних вкладень, років	$T_{ОК}$	-	0,26

Науковий керівник розробок:

д.т.н., професор

 Скобло Т.С.

Відповідальний виконавець:

к.т.н., старший викладач

 Рибалко І.М.

Виконавці:

к.т.н., доцент

 Тіхонов О.В.

асистент

 Захаров А.В.