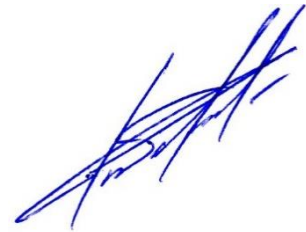


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Рибалко Іван Миколайович**



УДК 621.791.92:621.89

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

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** Лауреат Державної премії України,  
доктор технічних наук, професор,  
**Скобло Тамара Семенівна,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри технологічних систем  
ремонтного виробництва

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Волчук Володимир Миколайович,**  
Державний вищий навчальний заклад  
«Придніпровська державна академія будівництва  
та архітектури», завідувач кафедри  
матеріалознавства та обробки матеріалів;

Лауреат Державної премії України,  
доктор технічних наук, професор  
**Санін Анатолій Федорович,**  
Дніпровський національний університет імені  
Олеся Гончара, завідувач кафедри технології  
виробництва;

доктор технічних наук, професор  
**Тарельник В'ячеслав Борисович,**  
Сумський національний аграрний університет,  
завідувач кафедри технічного сервісу

Захист відбудеться «30» вересня 2021 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий «30» серпня 2021 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В. М. Власовець

## 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 України кількість аварій з НКТ від загального числа свердловинного обладнання в ряді випадків досягає 80%, а 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 введенням модифікуючих домішок в рідку ванну є теж актуальним.

Об'єднання в єдину роботу цих різних виробів пов'язано з використанням однакової вторинної сировини – детонаційної домішки від утилізації боєприпасів та послідуною заміною на речовину природного походження, глину, 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 герметизацією 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 HVмікро-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 трибології»).

**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, 2014-2021 р.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: РП, 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено основні отримані автором результати, визначено їх новизну і практичну значимість. Показано зв'язок роботи з науковими темами і особистий внесок здобувачки. Наведено дані про публікації та апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** «Застосування нових модифікуючих домішок для



підвищення експлуатаційної стійкості виробів різного призначення» представлено детальний аналіз сучасних літературних джерел та патентів, яким показано наступне.

Проведено аналіз розглянутих публікацій по виробництву, використанню й деградації структури та властивостей металу в експлуатації насосно-компресорних труб, а також по виготовленню, зміцненні й відновленню робочих органів сільськогосподарської техніки можна зробити наступний висновок. Вибір такого типу виробів для аналізу обумовлений як вимогами по підвищенню їх стійкості, так і пошуком галузей ефективного використання вторинних модифікуючих домішок, які знизять витрати на модифікування й зміцнення робочих поверхонь різного типу.

Існує безліч стандартів й іншої нормативно-технічної документації, які регламентують сортамент вироблених труб та їх хімічний склад. У різних країнах вони мають багато спільного, 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 і їх експлуатаційної стійкості розробляються спеціальні покриття, які дозволяють знижувати схильність матеріалу до корозійної пошкоджуваності.

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

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.

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 компонентами.

У розділі узагальнені й також розглянуті основні способи виготовлення, зміцнення й відновлення стрілчастих лап культиватора. Із всього розглянутого різноманіття способів їх зміцнення, можна зробити висновок, що основні напрямки для цих виробів підвищення 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.

Розробка способу зміцнення повинна бути спрямована на підвищення зносостійкості лап культиватора й із незначним подорожчанням технології. Відновлення лап культиватора може передбачати заміну ріжучої частини, тому що з часом використання відбувається інтенсивна деградація металу й відновлення традиційними методами економічно не ефективно.

У другому розділі «Методологія, матеріали та методи досліджень» розглянуто комплексні методики і матеріали, які використовували для підвищення експлуатації при різних умовах використання: модифікуючих домішок внесених в зміцнююче покриття, у спряження в пластичне мастило. Також розглядали культиваторні лапи сільськогосподарських машин, та спряження у колонах насосно-компресорних труб.

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 (рис. 1).

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 і вона складала 5-7% від маси електроду.



Експериментальні, теоретичні та технологічні основи нових напрямів дослідження

Рисунок 1 – Напрями та послідовність виконання досліджень, які використовували для зміцнення виробів з введенням модифікуючих домішок

При використанні модифікуючої домішки – бентонітової глини, а потім глини із різних родовищ України, їх подрібнювали на спеціально розробленому обладнанні – кульовому млині, піддавали сушінню. Аналізом показано, що при модифікуванні 6% введеної домішки хімічний склад покриття незначно змінюється, %: до 0,45-0,65 Mn; 0,15-0,40 Si; до 0,11 C; 0,035 P; 0,010 S.

Всі варіанти модифікування вивчали металографічно: оптичною, електронною мікроскопією, електронною емісією, локальним розподілом 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. Зміни вивчали і рентгенівським методом на апараті ДРОН-3 в  $K\alpha$ -Cu випромінюванні. Для оцінки зношування проводили стендові випробування в абразивному середовищі – піску. Оцінку міцності зчеплення покриття з основою виконували згідно методики Гулаєва-Гудцова. Здійснення контролю якості проводили з використанням коерцитиметрів КРМ-Ц-К2М та ІКС-104-ІНТЕКС, з урахуванням розроблених бракувальних норм.

Розроблено методику оцінки розтягування насосно-компресорних труб в експлуатації. Розрахунки проводили в залежності від зміни товщини труби та її розтягування. В основу розробленої моделі оцінки закладений принцип мінімуму ентропії. Основою створення моделі розтягання труб стало порівняння впливу пружних і пластичних деформацій. Запропонований алгоритм заснований на оцінках довжин таких зон, а також знаходженням зони дотичних деформацій. Розрахунки проведені для криволінійних поверхонь і трапецій. При проведенні розрахунків розглядали різницю відносин пружної деформації всього стрижня до гранично-пружної.

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

Для оцінки структуроутворення при нанесенні покриттів наплавленням з використанням модифікуючих домішок використовували оптико-математичний аналіз електронних зображень 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.

У **третьому розділі** «Деградація металу й підходи її оцінки при експлуатації деталей різного призначення» виконано аналіз причин відмов виробів, що працюють у різних умовах експлуатації для того, щоб встановити характер і причини їх пошкоджуваності та намітити шляхи, що дозволяють

подовжити строк їх експлуатації.

Розглянутий вплив факторів структурної деградації сталі Р-110 виробництва Китаю для 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 в умовах корозійно-активного середовища.

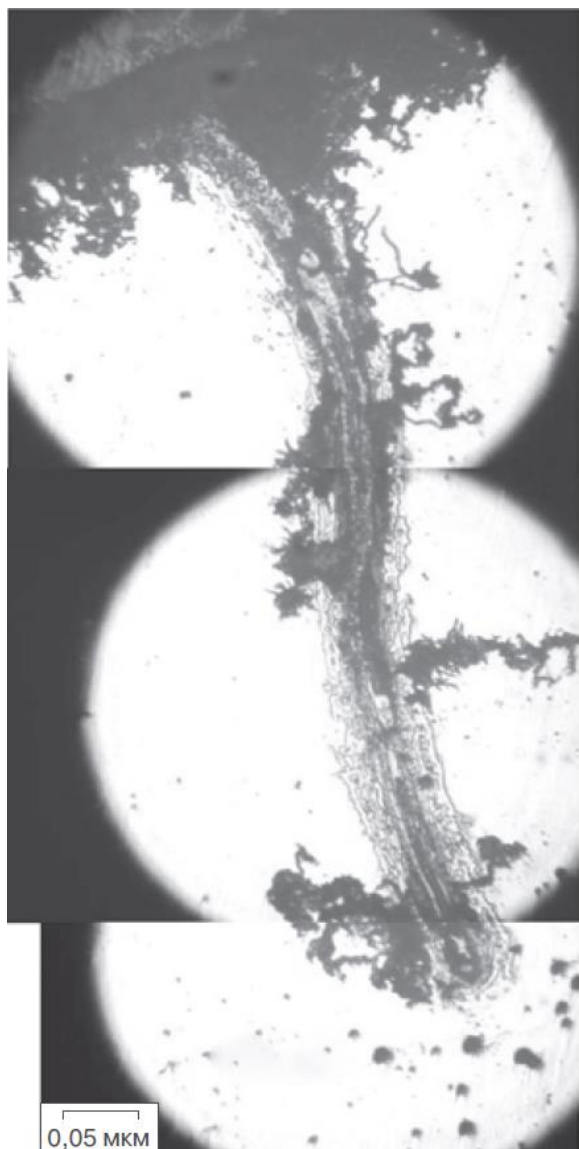


Рисунок 2 – Панорама тріщини в зоні пітінгу (нетравлений шліф),  $\times 260$

У результаті більших деформацій у трубах колони інтенсифікуються пороутворення, дифузія вуглецю (за рахунок руйнування цементиту перлітної складової) і вуглекислота 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 суттєво відмінні електрохімічні потенціали й міцнісні властивості.

Підвищена концентрація вуглецю, пороутворення й насичення поверхні елементами, що входять до складу активно-корозійного середовища (при концентрації  $\text{CO}_2$  у газовій фазі  $\leq 0,415\%$  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 води в газі  $3,4-3,6\%$ , 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 (рис. 2); концентрації води в рідкій фазі до  $5-6\%$ ; лінійна швидкість 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.

На підставі аналізу отриманих даних, виявлена при різному стані НКТ (рис. 3) 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.



Рисунок 3 – Різьбове з'єднання зовнішньої поверхні (фрагмент НКТ), зруйноване виразковою корозією

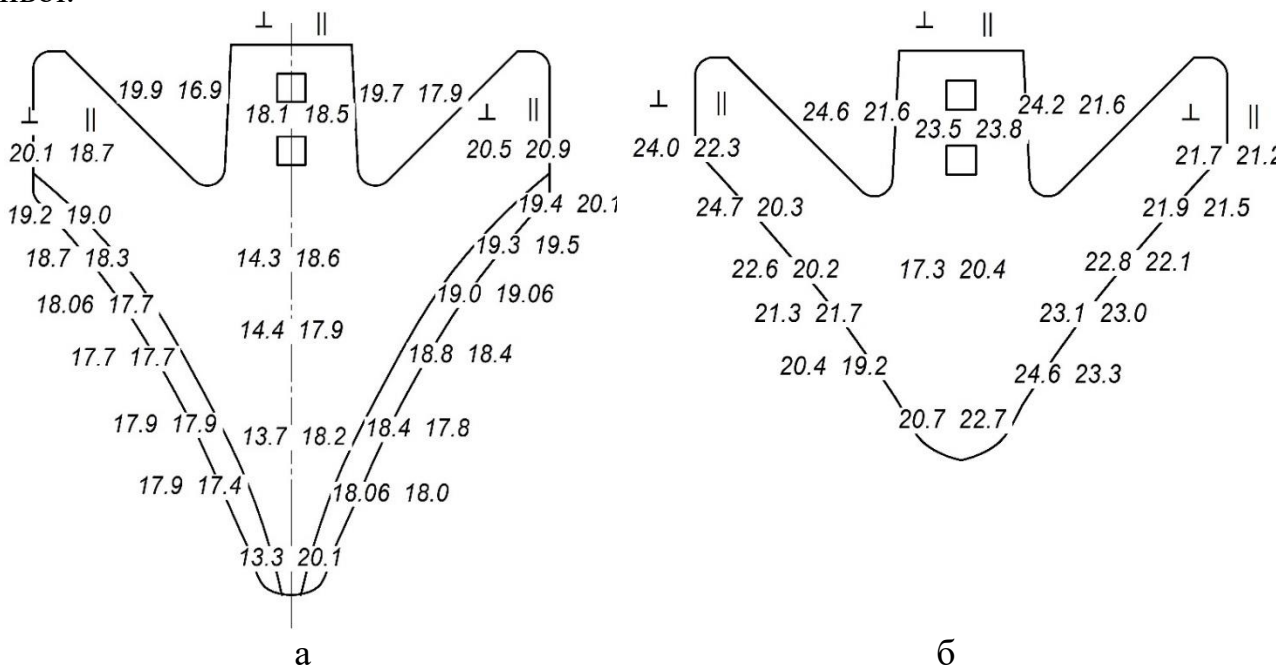
Таблиця 1 – Результати вимірів коерцитивної сили, виконаних у відповідності зі схемою контролю (див. рис. 3), А/см

Номер зони контролю	1	2	3	4
Великий датчик				
$H_c$ осьова	12,3	16,0	12,0	-
Малий датчик				
$H_c$ осьова	12,2	15,4	13,2	26,0
$H_c$ дольова	16,0	13,8	11,0	19,0

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

В 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 перекіс при закріпленні їх на стійці культиватора. Деякі лапи мають значні потертості (у зоні кріплення лапи) основного металу, що також може свідчити про їх підвищений наробіток і несвоєчасну заміну при технічному обслуговуванні або ремонті.

У нових культиваторних лапах найбільш високий рівень показань коерцитивної сили характерний для крил і 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.



⊥ – відповідає перпендикулярному вимірюванню, || – поздовжньому  
Рисунок 4 – Показання коерцитивної сили на новій (а) культиваторній лапі та після експлуатації (б), А/см

При оцінці напруженого стану культиваторних лап вимірювальним обладнанням ІКС-104-ІНТЕКС показано, що близький рівень коерцитивної сили характеризує ступінь деградаційних явищ у металі тому, що розвиток деградаційних явищ починається з поверхневого робочого шару.

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 створення структурних деградаційних змін у їх металі.

У четвертому розділі «Способи підвищення експлуатаційної стійкості

виробів різного призначення на основі їх структуроутворення» виконані комплексні дослідження зі структуроутворення, експлуатаційної стійкості виробів і конструкцій у різних галузях машинобудування.

Порівняльно аналізували вплив модифікуючих домішок на основі вторинної сировини (детонаційної шихти від утилізації певного набору боєприпасів) з алмазною нано- і дисперсною фракціями й природньої речовини – бентонітової глини.

Вибір таких технологій модифікування базувався на раніше проведених дослідженнях автора, новітніх досягненнях науки й техніки, а також економічній ефективності нових технологічних рішень.

Промисловою статистикою встановлене, 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 формувалися подряпини (рис. 5), в яких відкладалася введена шихта. Найбільш оптимальною є домішка фракцією 10-20 мкм, що 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 періодично (у міру зношування) надходить на поверхню тертя при його експлуатації.

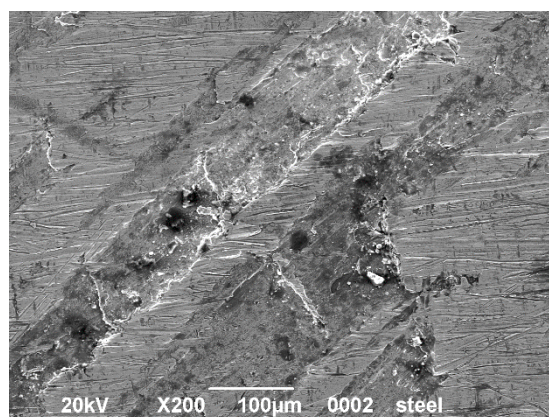


Рисунок 5 – Подряпини на поверхні різьбового з'єднання з відкладеннями шихти з мастилом

Запропонований метод визначення оксидних захисних плівок на основі статистичних оцінок по мінливості складу локального

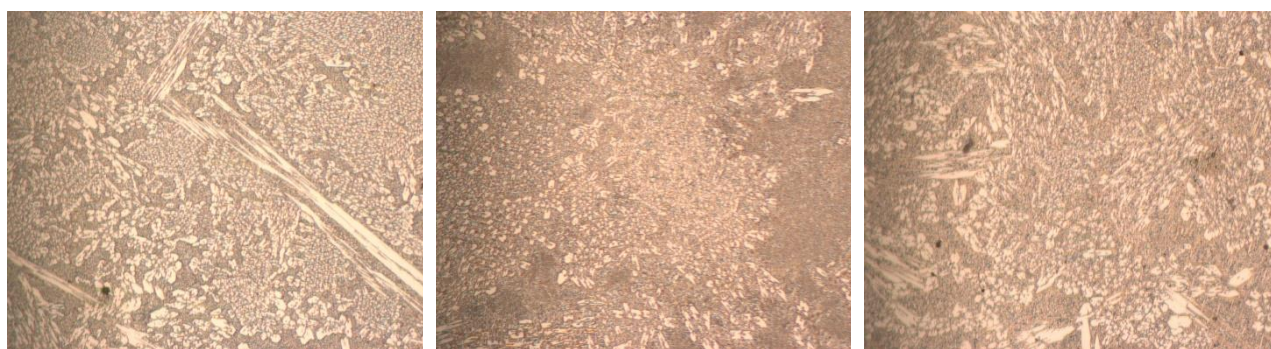
мікрорентгеноспектрального аналізу при порівнянні вигладжених зон, «кишень» для утримання мащення й основного металу (табл. 2). Встановлено, що при використанні запропонованого модифікатора захисні оксидні плівки на поверхні тертя змінюються від 0,32 мкм до 1,34 мкм у різних зонах і періодах експлуатації. 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 мастил і оцінки вмісту компонентів, що входять у плівки з шихтою, які формуються при експлуатації деталей.

Таблиця 2 – Середня товщина захисних плівок залежно від зміни вмісту 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	65,70	

При зміцненні й відновленні деталей наплавленням використовували вторинну сировину – детонаційну шихту від утилізації певного набору боєприпасів з нано- і дисперсною алмазною фракціями (рис. 6). Таку технологію використовували для забезпечення стабільної роботи культиваторних лап, які залежно від виготовлювача й умов експлуатації змінювалися по товщині від 6 до 5,5мм. Зміцнення здійснювали нанесенням смуг для підвищення їх зносостійкості, самозагострювання й опору пластичної деформації.

Для відновлювального наплавленням виробів використовували стандартно застосований у практиці електрод Т-620 із вмістом, % 3,0 С; 2,2 Si; 1,2 Mn; 22,5 Cr; 0,7 Ti; 0,8 В.



а

б

в

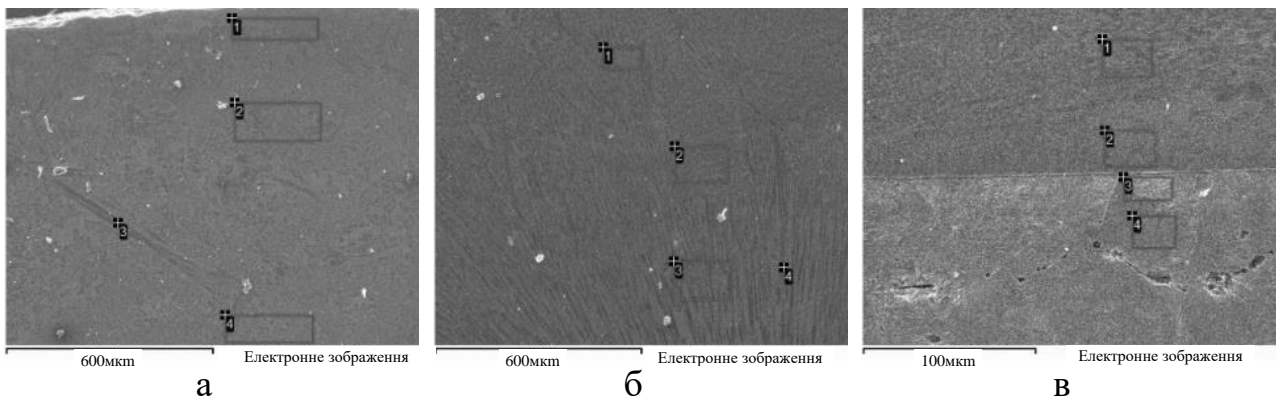
а – наплавлення електродом Т-620; б – наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням немагнітної фракції детонаційної шихти; в – наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти

Рисунок 6 – Мікроструктура по перетину зразків,  $\times 200$

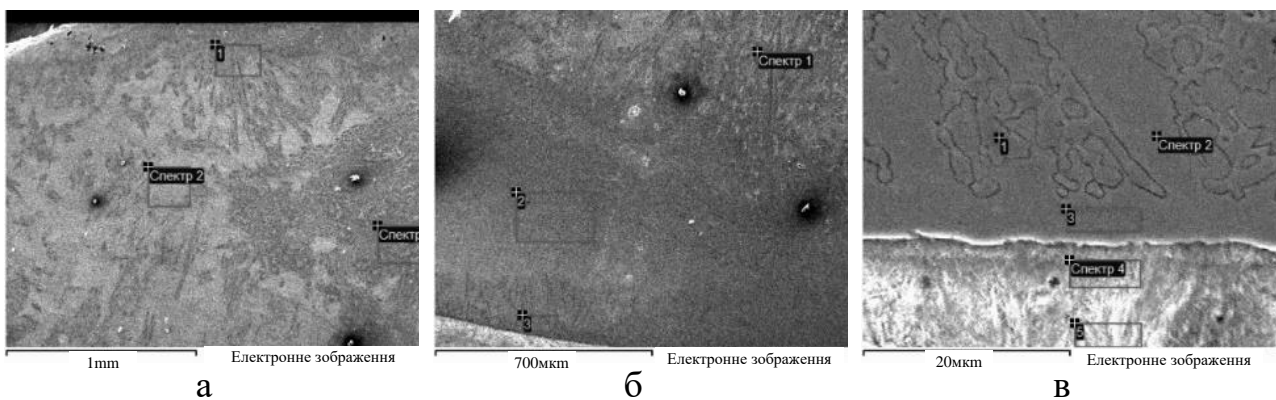


Показано, що застосування такого електрода при наплавленні тонкостінних виробів сприяє їх проплавленню, а також відзначається їхня підвищена схильність до дефектоутворення. Детальні комплексні дослідження показали, що ряд сформованих дефектів пов'язані з основним металом і це відбувається за рахунок впливання неметалевих включень, а також підвищених локальних напружень на границі розділу покриття – основний метал. Введення модифікуючої домішки в кількості 5-7% від частки електрода виключає їх формування, 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 (рис. 7-9). При цьому оцінювали 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.



а – поверхня наплавлення; б – середина; в – зона термічного впливу  
Рисунок 7 – Електронні фотографії структури наплавлених смуг електродом Т-620 із вказанням зон аналізу МРСА



а – поверхня наплавлення; б – середина; в – зона термічного впливу  
Рисунок 8 – Електронні фотографії структури наплавлених смуг електродом Т-620 з модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти із вказанням зон аналізу МРСА

Виявлено, що для детальних досліджень використовували бентонітову глину, яку вводили у спряження для легування сполучення пластичного мастила у патенті США. Її вплив було досліджено і в даній роботі при внесенні для зміцнення покриття.

Домішку 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 (рис. 9). Додаткове модифікування в три рази знижує перетин перехідної зони. Крім того, нанесення такого покриття на тонкостінну культиваторну лапу повністю проплавляють її, а при введенні бентонітової глини зберігає її основу до 50%.

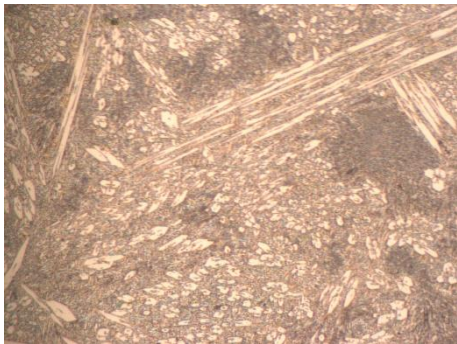
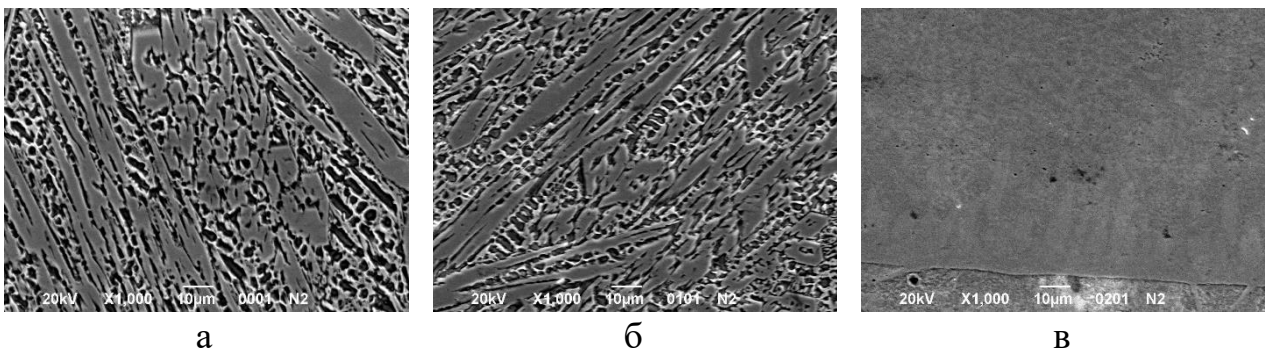


Рисунок 9 – Мікроструктура наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням бентонітової глини,  $\times 200$

Мікрорентгеноспектральним аналізом виявлено (рис. 10), що крім фази  $Me_7C_3$  виявляються 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.



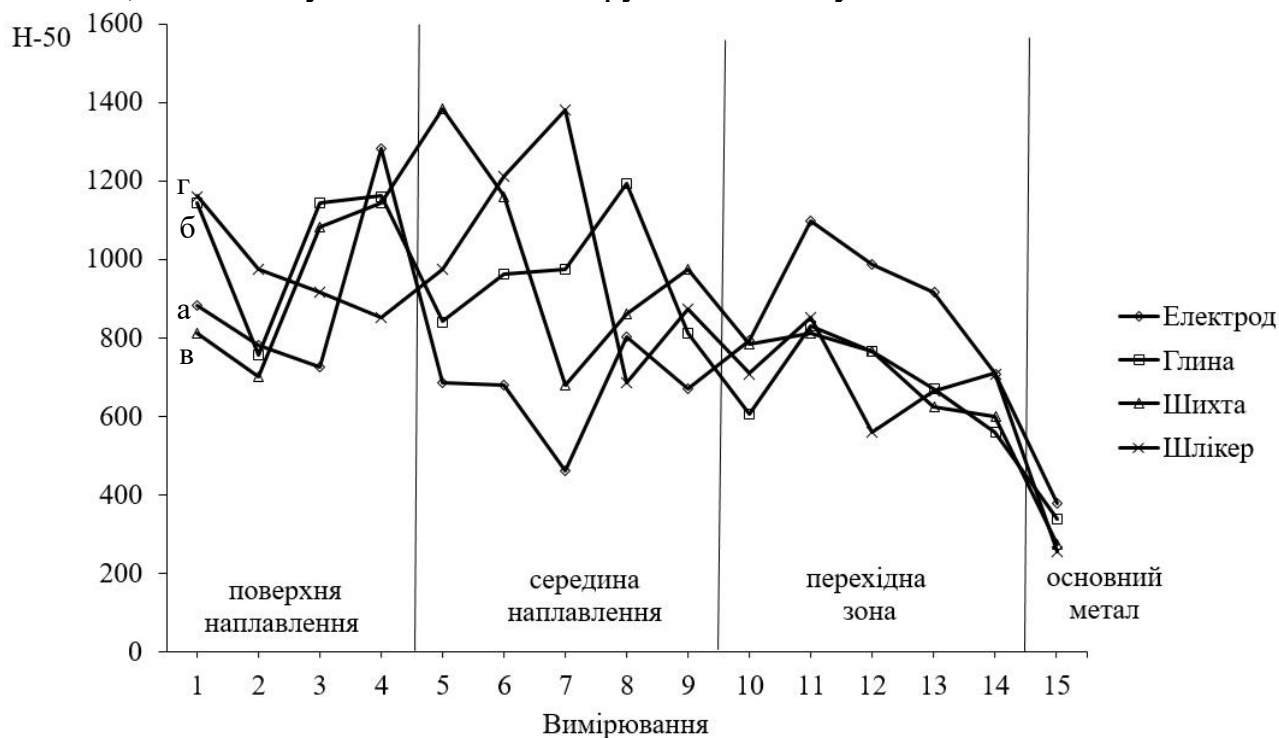
а – поверхня; б – середина; в – перехідна зона

Рисунок 10 – Електронімікроскопічна структура по перетину покриття наплавленого металу електродом Т-620 при модифікуванні глиною

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% (рис. 11).

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.



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 11 – Середні значення мікротвердості при модифікуванні відновлювального покриття наплавленням

У **п'ятому розділі** «Експериментальне, математичне моделювання та оптико-математичний аналіз структуроутворення у виробках з різними умовами експлуатації» виконано експериментальне й математичне моделювання технологічних процесів додатковим модифікуванням при виробництві деталей у різних умовах їх використання.

Для уточнення підходу по оцінкам напружень при експлуатації, докладно розглянутих у публікаціях, змусило дослідників розробити ще одну модель розтягування довгих стрижнів, у яких зовнішня сила не бере участь у явному виді. Досвід підказує, що без зовнішньої сили розв'язання пружно-пластичних завдань вони виходять набагато більш стійкими. Розроблена модель не повинна суперечити принципу мінімуму ентропії. Основою створення моделі є порівняння робіт пружних і пластичних деформацій.

Виходячи з результатів досліджень, у подальших розробках ефективним є підхід до моделювання й прогнозуванню процесів розвитку напруженого стану

при експлуатації шляхом вибору ефективних, якісних матеріалів колони, забезпечення стабільним станом.

Експериментальне моделювання мінливості проводили з теоретичним описом фаз оптико-математичним методом.

Дослідження проводили на стандартних зразках листової сталі 20 товщиною 5мм. Здійснювали деформацію циклічним розтягування на 12%. При цьому аналізували зразки, вирізані уздовж і поперек прокатки (рис. 12).

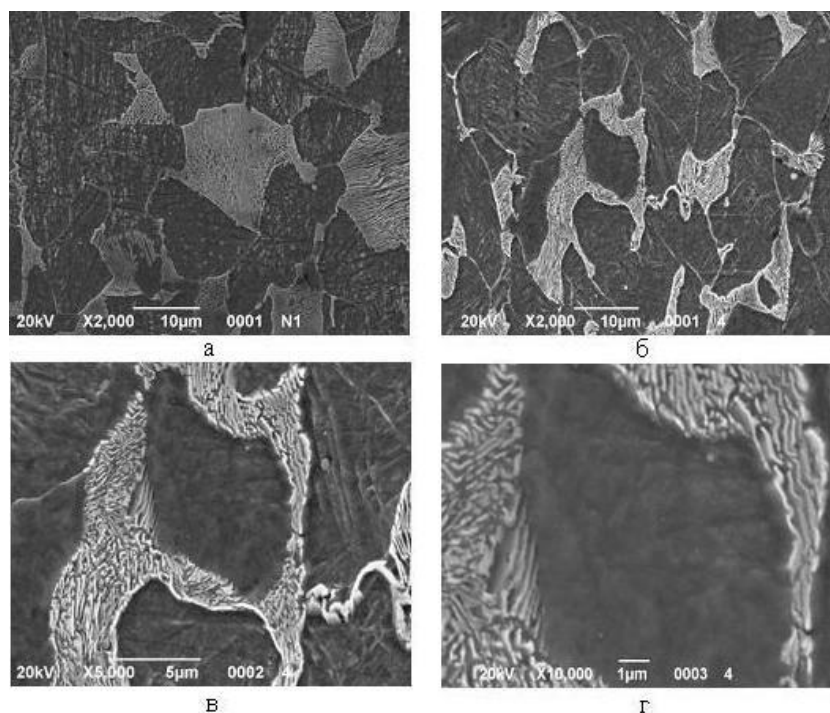


Рисунок 12 – Мікроструктура Сталі 20пс у вихідному стані (а), після деформації: загальний вид (б), локальні зони (в, г)

Такий експеримент 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. До деформації вона становила 0,87, а після – 0,36, що свідчить про істотну деградацію металу й дозволяє по цій характеристиці відслідковувати стан устаткування при його обслуговуванні.

Металографічними дослідженнями виявлено, що в процесі розтягування формувалися тріщини, надриви від неметалевих включень, а також відшарування металу від поверхні зразка.

У 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%.

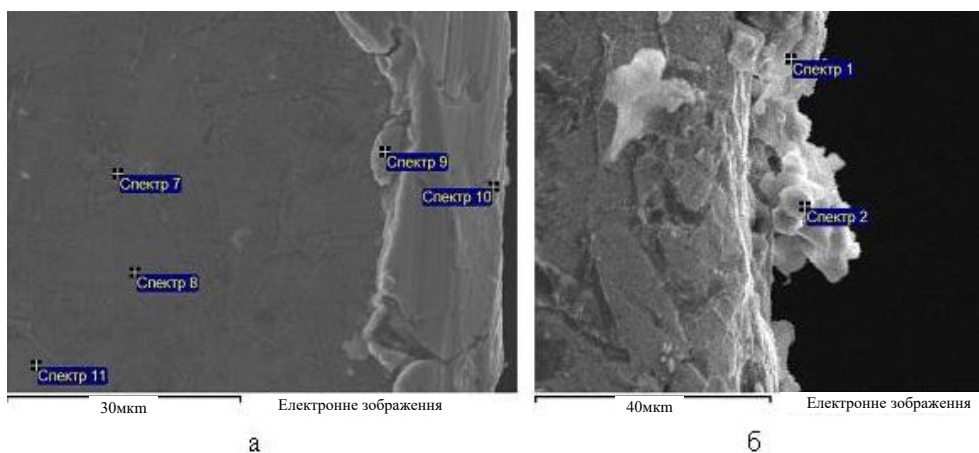
В поверхні деформованих зразків виявлені найбільші структурні зміни після пластичної деформації з формуванням зон екструзії.

Для опису сформованих фаз та їх мінливості при пластичній деформації використовували оптико-математичний метод, який на підставі рівнянь Нов'є-Стокса дозволяє оцінити дифузійні процеси, що відбуваються, і щільність фрагментів. Така оцінка базувалася на абсолютних величинах кінцеворізницевих показників 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.

В процесі пластичної деформації формуються різні дефекти в металі. Це тріщини, пори й деградація структурних складових. Аналіз дефектів виявив, що в порах і тріщинах, які насичені різними компонентами, пов'язаними з якістю металу, підготовкою зразків для досліджень і ліквідацією.

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 (рис. 13).



а – вихідний; б – після деформації

Рисунок 13 – Мікроструктура на поверхні зразків

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 (рис. 14, табл. 3).

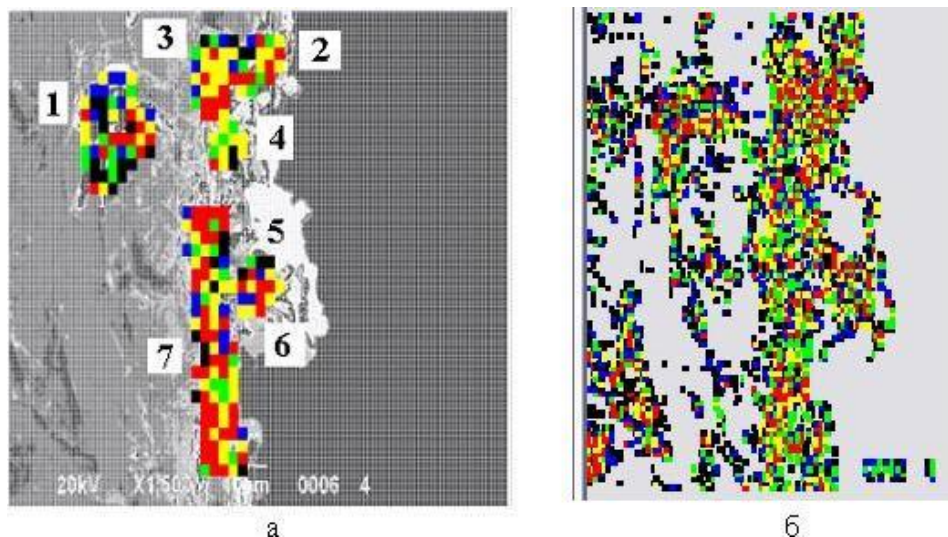


Рисунок 14 – Розподіл структурних складових з підвищеним вмістом вуглецю (кольори відповідно до табл. 3) у зоні екструзії (а) і поблизу поверхні (б) після циклічної деформації розтягуванням

Таблиця 3 – Розподіл 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

Вперше при модифікуванні провели аналіз структурних змін в покритті з модифікування його бентонітовою глиною оптико-математичним описом фаз і їх часток щодо вихідного стану.

Для цього за критерієм Колмогорова порівнювали гістограми кольорів зображень. Аналізували статистичні результати по 15 інтервалах, сформованих фаз. В даному варіанті досліджень використовували для наплавлення покриття вуглецевий електрод, щоб чітко виявити вплив модифікуючої домішки.

Порівняння показали більшу однорідність в розподілі фаз при модифікуванні бентонітовою глиною (табл. 4).

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 (рис. 15). Головним чином це феритні комбінації (01-09) і тільки п'ять включають бейніт (10), три карбидні FeC (11) і інші також не стехіометричного складу Fe<sub>x</sub>C<sub>y</sub> (12, 13).

Таблиця 4 – 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*)-	9,4-	0,7-	4,0-	0,4-	2,7-
	56,6	4,9	1,6	18,0	1,1	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-	6,9-	8,5-4,3	4,1-	11,2-
		2,7	0,9		0,5	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.

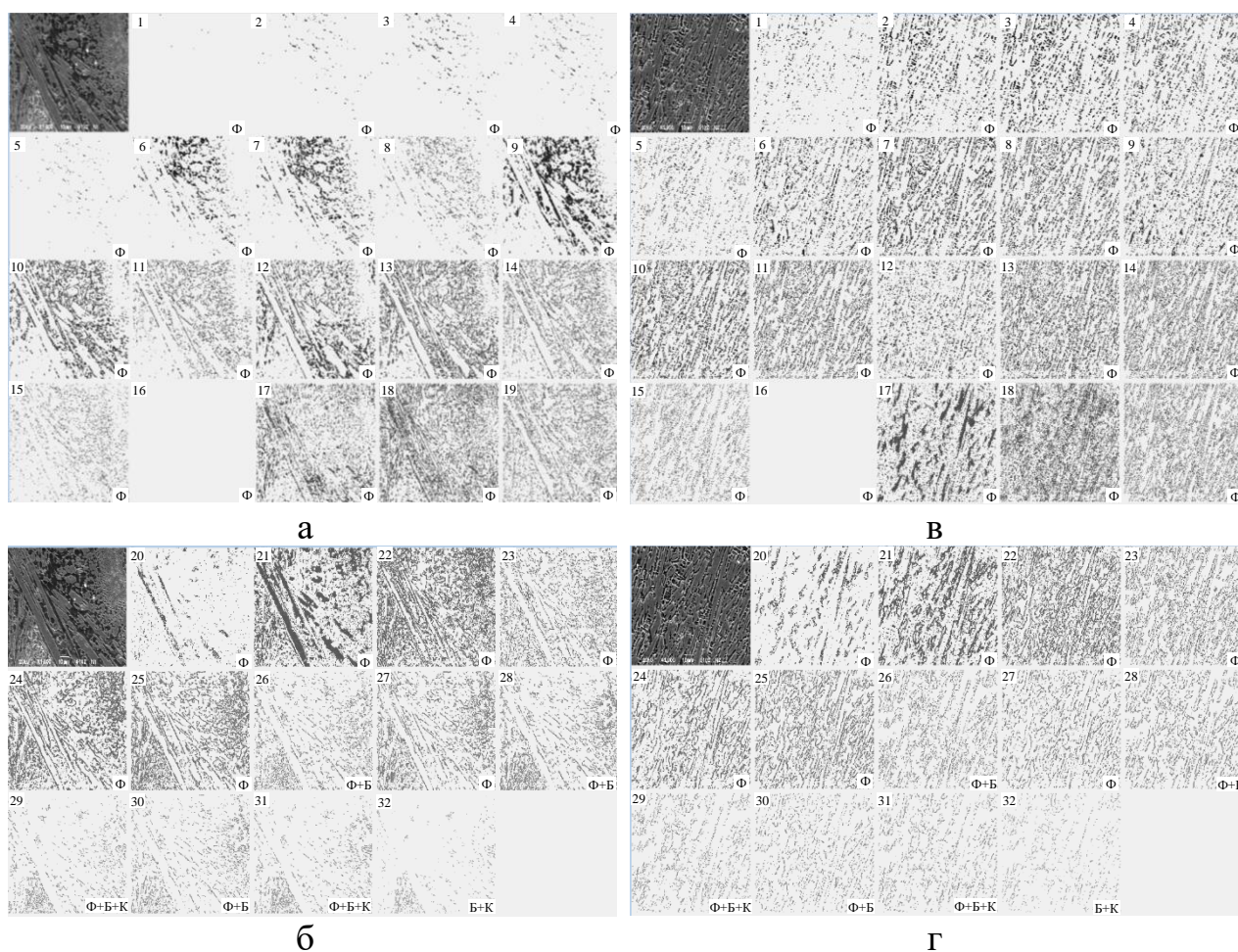


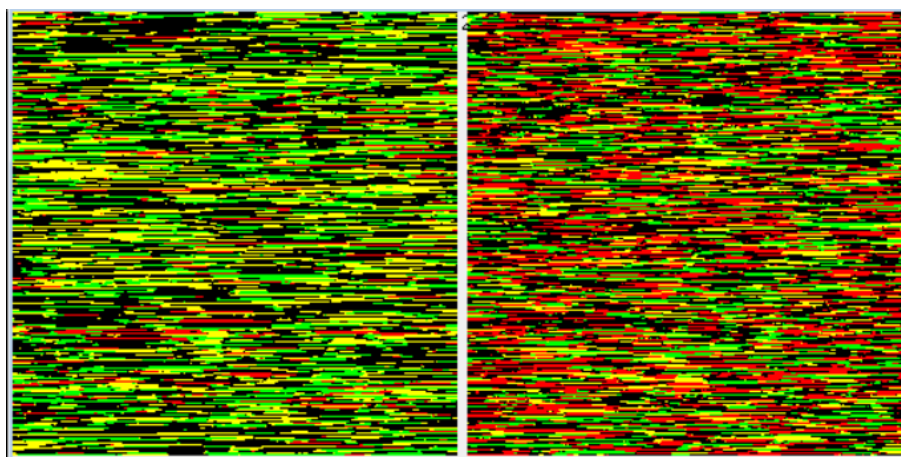
Рисунок 15 – Характерні зображення електронних мікрофотографій структури при взаємодії фаз в середині покриття без модифікування (а, б) з введенням бентонітової глини (в, г)

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 майже в 2 рази) і взаємодії ферит-аустеніт-карбіди підвищується (48,62% – в 2 рази), при модифікуванні зростає майже в 8 разів взаємодія ферит-аустеніт (табл. 5).

Таблиця 5 – Відсоток фаз у фрагментах 3×3 (фото рис. 16)

Перша фотографія (рис. 8, б)	Друга фотографія (рис. 10, б)	Фази та 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

Введення модифікуючої домішки бентонітової глини істотно змінює кристалічну решітку карбідних фаз. При металографічних дослідженнях виявлено поділення стрічастих виділень карбідів нестехіометрического складу на більш тонкі, що формуються при кристалізації, а також їх інтенсивне подрібнення. Частка таких карбідів при модифікуванні зростає в 2 рази (рис. 16).



а

б

а – електрод Т-620; б – з додатковим введенням бентонітової глини

Рисунок 16 – Сформовані фази при наплавленні

На рис. 16 позначені кольори: 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.



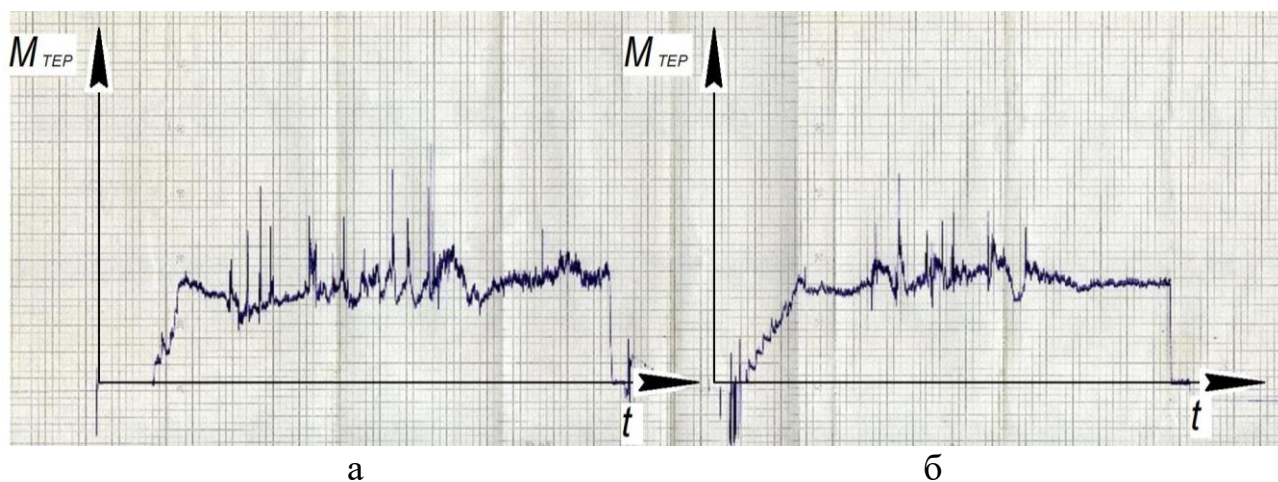
У шостому розділі «Оцінка експлуатаційної стійкості аналізованих виробів» розглянуто вплив модифікуючих домішок на підвищення експлуатаційних властивостей зміцненої поверхні та її формування. Для пояснення цього використовували результати виконаних досліджень по модифікуванню немагнітною часткою вторинної сировини від утилізації боєприпасів, а також бентонітовою глиною.

Одержана більш поширена інформація про можливість використання інших природних домішок – глини різних родовищ районів України базувалося на додатковому аналізі.

Модифікування пластичного мастила детонаційною шихтою від утилізації боєприпасів зменшує задири (схоплення) при експлуатації в різбових з'єднаннях в 2 рази, збільшуючи їх експлуатаційну стійкість (табл. 6, рис. 17). Випробуваннями на знос при робочих навантаженнях 0,05-0,45 кН встановлено, що при використанні домішки детонаційної шихти істотно зменшується не тільки число задирів, а й вони наступають 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 забезпечується зменшення цього показника.

Таблиця 6 – Випробування на знос при використанні пластичного мастила з введенням графіту і детонаційної шихти

№ за/п	Пластичне мастило	Знос, г		$f_{тер}$
		диска	колодки	
1	З додаванням графіту	0,0518	0,0077	0,34
2	З детонаційною шихтою	0,0260	0,0052	0,30

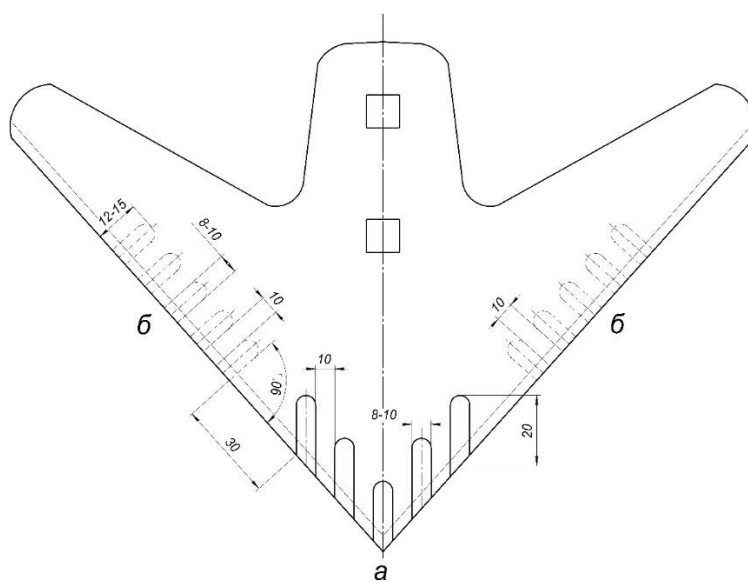


а – знос з домішкою детонаційної шихти, б – з введенням графіту

Рисунок 17 – Характер зношування сполучень з пластичним мастилом. Піки характеризують наявність локальних задирів і їх інтенсивність при навантаженні 0,05-0,45 кН

У 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 (рис. 18).

Порівняльними стендовими випробуваннями на зношування показано, що модифікування покриттів в процесі їх нанесення немагнітною фракцією детонаційної шихти забезпечує зниження напружень, розмір зерна, сприяє подрібненню фаз карбідів і формуванню хвилястої міцнішої зони покриття – основа.



а – носок; б – крила

Рисунок 17 – Схема наплавлення зміцнюючих смуг на поверхню стрілкової лапи культиватора

Встановлено, що наплавлення з додатковим модифікуванням рідкої ванни бентонітовою глиною також знижує рівень формуємих напружень в покритті та коерцитивної сили на 26-42%.

Показана можливість використання для модифікування природного продукту - глини і вторинної сировини – немагнітною фракції детонаційної шихти з алмазами від утилізації боєприпасів (табл. 7). При введенні глини і шихти в покриття методом наплавлення зносостійкість підвищується в 1,3 і 2 рази по відношенню до покриття, виконаному тільки електродом, а також по відношенню до вихідного матеріалу культиваторної лапи в 2 і 3 рази відповідно.

У результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених згідно схеми та технології ХНТУСГ (рис. 19), ресурс досягає 3185 га на один робочий орган, а величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм (рис. 20, а, в), при цьому стандартно виготовлені лапи змінюються від 39 до 86 мм (рис. 20, б, г) та мають більш високі за рівнем експлуатаційні показники в 2,5 рази. Це забезпечується за рахунок зміни

структури, фізико-механічних властивостей (мікротвердість, коерцитивна сила, міцності 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 зміцненої лапи у вигляді «птичих лап з когітками» (рис. 20, д, е) з часткою покриття в зоні тертя при деформації забезпечує досить стабільну структуру у експлуатації.

Таблиця 7 – 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



а



б

а – вид зверху, наплавлення смуг на носок; б – вид знизу, розташування смуг на крилах

Рисунок 19 – Зовнішній вигляд зміцнюючих смуг, нанесених на нові культиваторні лапи Tiger Mate II

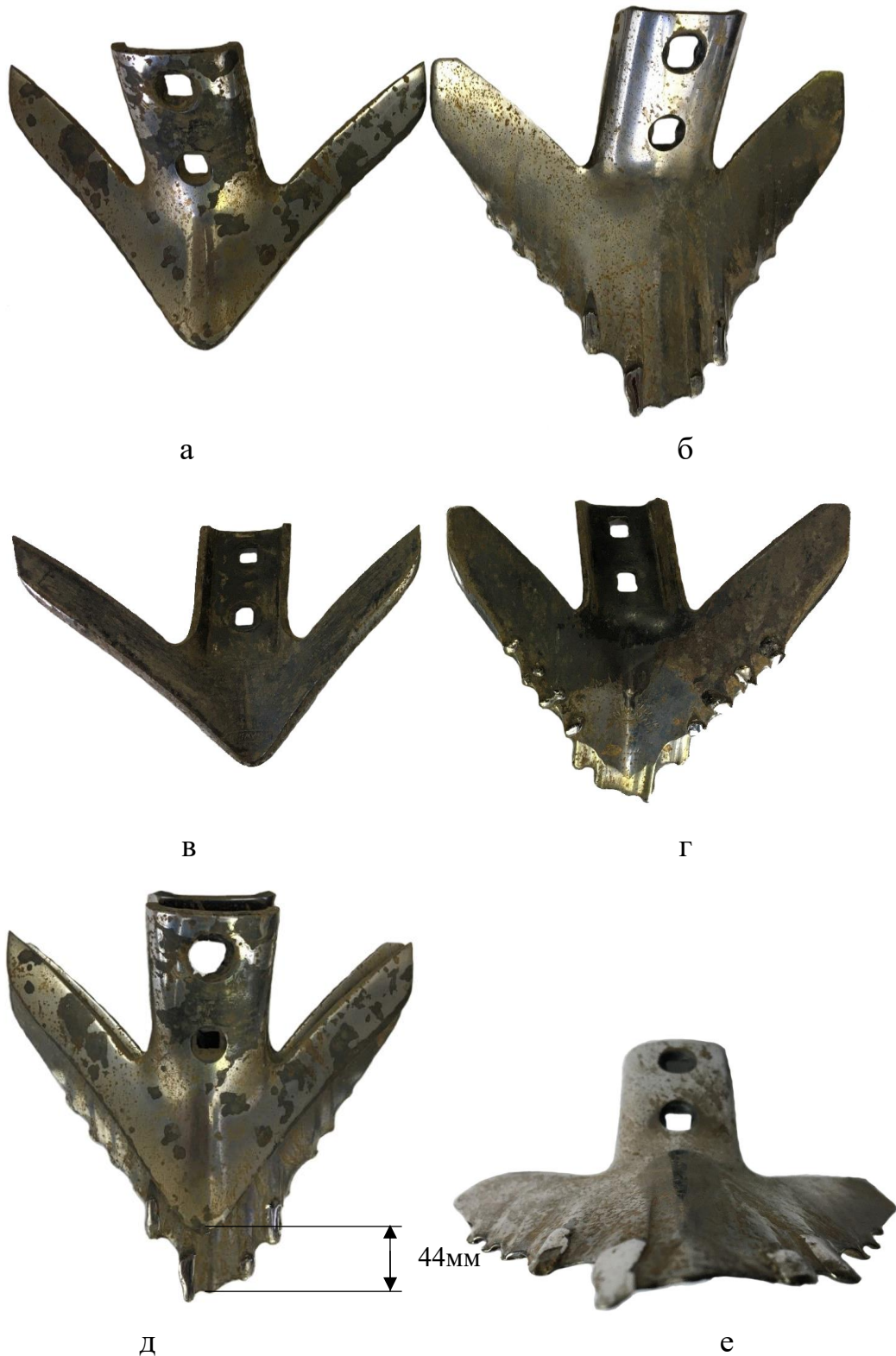


Рисунок 20 – Базова (а, в) та зміцнена (б, г, е) культиваторні лапи після напрацювання 3185 га та одержана різниця в розмірах при їх накладенні (д)

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 –

вторинна сировина (детонаційна шихта від утилізації боєприпасів). Економічна ефективність впровадження розробленої технології зміцнення в розрахунку на 1210 шт. лап (тільки 10 культиваторів) складе 196927,5 грн.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені нові науково обґрунтовані експериментальні та теоретичні результати, промислові випробування які узагальнюють і забезпечують вирішення поставленої актуальної науково-технічної проблеми – підвищення стійкості виробів різного призначення із застосуванням модифікуючих домішок.

У 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 55%.

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 сталі, 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 однаково 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 призводить до деформації (розтягування) труб у цій зоні.

У результаті значних деформацій в трубах колони інтенсифікуються пороутворення, дифузія вуглецю (за рахунок руйнування цементиту перлітної складової) та 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 кромek лап культиваторів є необоротним процесом під час взаємодії з 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 перекис 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 стрілочастих лапах у різних напрямках до 25-30% та 70%. Результати досліджень дозволили визначити межу бракувальної норми, яка становить 10% зміни показань Нс. 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 – обмазку 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<sub>7</sub>C<sub>3</sub> а також Me<sub>x</sub>C<sub>y</sub> в усіх 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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 наноалмазов 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. *9<sup>th</sup> 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 пошкодженість 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. Состав детонационной шихты с алмазной фракцией для модифицирования покрытий / 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 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).

C. 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 стрілочатих 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 стрілочатої 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.*

## АНОТАЦІЯ

**Рибалко І.М.** Експериментальні, теоретичні і технологічні основи зміцнення виробів з використанням модифікуючих домішок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. 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 видобутку – 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.

Для підвищення експлуатаційної стійкості різьбових з'єднань, пошкоджуваність яких становить 55% всіх відмов і аварійних ситуацій, запропоновано спосіб введення і складу використання модифікуючої домішки в пластичне мастило таких з'єднань. Встановлено, що детонаційна шихта від утилізації боєприпасів особливої фракції, складу, способу підготовки, забезпечує формування вторинних захисних структур (оксидних плівок) і зниження коефіцієнту тертя.

Запропоновано спосіб введення модифікуючої домішки у рідку ванну при наплавленні культиваторних лап. 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 зменшенням температури рідкої ванни за рахунок нерозчинної 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%.

У 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.

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

## АННОТАЦІЯ

**Рыбалко И.Н.** Экспериментальные, теоретические и технологические основы упрочнения изделий с использованием модифицирующих добавок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по

специальности 05.02.01 - материаловедение. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко МОН Украины. Харьков, 2021.

Представленная к защите работа базировалась на теоретических, экспериментальных и технологических исследованиях с использованием новых, эффективных, менее затратных подходов к повышению стойкости изделий различного назначения. Для этого использовали вторичное сырье – немагнитную детонационную шихту от утилизации боеприпасов, и естественной добычи - бентонитовую глину. В работе рассматривались насосно-компрессорные трубы, собранные из стали Р-110 при диаметре 73 мм, толщине стенки 5,5 мм и культиваторные лапы толщиной 6...6,5 мм. Объединение в единую работу этих различных изделий связано с использованием одинаковой детонационной добавки для повышения различных свойств изделий при их производстве, но разных направлений в обслуживании и эксплуатации.

Для повышения эксплуатационной стойкости резьбовых соединений, повреждаемость которых составляет 55 % всех отказов и аварийных ситуаций, предложен способ ввода и состава использования модифицирующей добавки в пластичную смазку таких соединений. Установлено, что детонационная шихта от утилизации боеприпасов особой фракции, состава, способа подготовки, обеспечивает формирование вторичных защитных структур (оксидных пленок) и снижение коэффициента трения.

Предложен способ введения модифицирующей добавки в жидкую ванну при наплавке культиваторных лап. Для этого использовали нанесения примеси на электрод Т-620 в виде обмазки. Исследованиями установлено, что введение модифицирующей добавки немагнитной части детонационной шихты в количестве 5-7% от электрода исключает формирования дефектов, связанные с уменьшения температуры жидкой ванны за счет нерастворимой алмазной фракции, играет роль локальных микроохладителей. При этом структура металла измельчается. Карбидная фаза выделяется в виде зернистых включений, более равномерно распределенных в матрице.

Для детальных исследований использовали также природный компонент – бентонитовую глину. Примесь наносили на электрод в количестве оптимальной 6-8% от его доли. Сравнительные металлографические исследования показали, что введение такой примеси способствует формированию более однородной структуры практически по всем зонам покрытия за счет измельчения игольчатых выделений карбидов и формирования их зернистыми. В обоих вариантах покрытий (с введением модификатора глины и без нее) кристаллизуется мартенситная структура отпуска матрицы. Дополнительное модифицирование в три раза снижает сечение переходной зоны. Нанесение покрытия на тонкостенную культиваторную лапу полностью проплавляет ее, а при введении бентонитовой глины сохраняет ее основу до 50%.

В результате проведенных исследований разработан и предложен новый способ упрочнения культиваторных лап. Способ заключается в нанесении



упрочняющих полос на носок с лицевой стороны лапы и с тыльной – на ее крыльях. Согласно анализу процессов износа, оптимальным является нанесение наплавкой упрочняющих полос на носок размером 20 мм, а на крылья – 12-15 мм с расстоянием между ними не менее 10 мм, чтобы предотвратить перекрытие зон термического влияния.

**Ключевые слова:** деградация, насосно-компрессорные трубы, культиваторная лапа, немагнитная детонационная шихта, бентонитовая глина, пластичная смазка, модифицирование покрытия наплавкой.

## ANNOTATION

**Rybalko I.M.** Experimental, theoretical and technological basics of hardening products by using modifying agents. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.02.01 – Materials Science. Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation presented for defence is 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 ammunition recycling and bentonite clay extracted from natural deposits. The thesis considers a 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.

To increase the operational durability of threaded joints whose damage leads to 55% of all failures and emergencies, a method for introducing a modifying agent to the lubricating grease of such joints is proposed and the agent's composition is defined. It was found that a detonation charge obtained by recycling ammunition of a special grading, composition and preparation method ensures the formation of secondary protective structures (oxide films) and reduces the friction coefficient.

A method is proposed to introduce a modifying agent into the molten weld pool while building up cultivator shares. For this purpose, an additive in the form of a coating was applied onto electrode T-620. Investigations have found that, introducing the modifying agent of the nonmagnetic part of the detonation charge as 5-7% of the electrode's part, eliminates 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 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 have shown that the introduction of such an additive facilitates the formation of a more homogeneous structure practically in all 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 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.

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

---

Підписано до друку 30.08.2021.  
Формат паперу 60x84 1/16. Папір для множних апаратів  
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,0  
Тираж 100 прим.

---

Надруковано у копіцентрі PandaPrint  
(ФО-П Панарін В.С.)  
61050, м. Харків, м. Фейєрбаха, 17

