

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ДЕМБІЦЬКИЙ НАЗАР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**УДК 621.78**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ  
СТАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ  
МАШИН**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Н.В. Дембіцький

**Керівник роботи**

Куликівський В.Л.

кандидат технічних наук

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Дембіцький Назар Володимирович. Відновлення та поверхневе зміцнення сталених деталей сільськогосподарських машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі показано можливість вирішення проблеми підвищення довговічності деталей, відновлених електролітичними покриттями, шляхом використання не чистого заліза, а електролітичних сплавів на основі заліза, легованих хромом, молібденом, вольфрамом або титаном.

Легування залізних осаджень позитивно впливає на підвищення зносостійкості (в 2,1...2,4 разу вище, ніж зносостійкість чистого електролітичного заліза). Електролітичні сплави мають підвищену зносостійкість і по відношенню до загартованої сталі 45 (в 1,3 рази). При граничному терті на поверхнях, що труться, утворюються окисні плівки, які є об'єктами руйнування при терті. Легуючі елементи, присутні в електролітичних сплавах, входять до складу цих плівок, збільшуючи їхню міцність, і, таким чином, підвищують зносостійкість. Леговані покриття мають підвищену зносостійкість та в умовах сухого тертя.

Використання легованих електролітичних покриттів замість традиційного залізнення дозволить значно підвищити довговічність відновлених деталей (збільшити їх післяремонтні ресурси) та підняти рентабельність ремонтного виробництва. Це дозволить вирішити важливе народногосподарське завдання – імпортозаміщення дорогих запчастин та підвищення ефективності реновації вітчизняної та зарубіжної техніки.

*Ключові слова: електролітичні покриття, легуючі елементи, зносостійкість, ресурс*

## ANNOTATION

**Dembitsky Nazar Vladimirovich. Restoration and surface strengthening of steel parts of agricultural machinery.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The master's thesis shows the possibility of solving the problem of increasing the durability of parts restored by electrolytic coatings by using not pure iron, but electrolytic alloys based on iron alloyed with chromium, molybdenum, tungsten or titanium.

Doping of iron deposits has a positive effect on increasing wear resistance (2.1... 2.4 times higher than the wear resistance of pure electrolytic iron). Electrolytic alloys have increased wear resistance and in relation to hardened steel 45 (1.3 times). During the boundary friction, oxidizing films are formed on the friction surfaces, which are objects of destruction during friction. Alloying elements present in electrolytic alloys are part of these films, increasing their strength, and thus increase wear resistance. Alloy coatings have increased wear resistance and in conditions of dry friction.

The use of alloyed electrolytic coatings instead of traditional iron will significantly increase the durability of restored parts (increase their post-repair resources) and increase the profitability of repair production. This will solve an important economic task - import and lubrication of expensive spare parts and increase the efficiency of renovation of domestic and foreign equipment.

*Key words: electrolytic coatings, alloying elements, wear resistance, resource*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ЗАЛІЗНИХ ПОКРИТТІВ.....	8
РОЗДІЛ 2. ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА, ЛЕГОВАНИХ ХРОМОМ, МОЛІБДЕНОМ, ВОЛЬФРАМОМ ТА ТИТАНОМ.....	17
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМИ МЕТАЛАМИ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА.....	25
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** У сучасних умовах на перший план висувається завдання імпортозаміщення та підвищення конкурентоспроможності продукції машинобудування, а також ефективна реновація техніки. Традиційні конструкційні матеріали, а також матеріали, що використовуються для відновлення зношених деталей, далеко не завжди забезпечують необхідні характеристики працездатності та надійності, яким повинні відповідати деталі сучасних потужних та високопродуктивних машин. Тому дуже актуальним є завдання створення нових матеріалів удосконалення технологічних процесів їх зміцнення. Вирішення цієї задачі, в першу чергу, пов'язане з підвищенням рівня міцності поверхневих шарів важконавантажених деталей, що може бути досягнуто нанесенням на робочі поверхні таких деталей металевих покриттів, що відрізняються підвищеною твердістю та зносостійкістю.

Серед різноманітних покриттів, розроблених і використовуваних до теперішнього часу особливе місце займають електролітичні покриття, які можуть мати різні властивості і головною особливістю яких є те, що вони наносяться на сталеві поверхні при низьких температурах, що не викликають зміни структури і властивостей (міцності) матеріалу основи. Електролітичні покриття широко використовуються в ремонтному виробництві, тому що їх нанесення на зношені поверхні деталей є найбільш економічним способом відновлення початкових розмірів і працездатності. Найбільш високі властивості серед електролітичних покриттів мають електролітичні метали, тобто електролітичні осадання двох або кількох елементів. Електролітичні сплави, крім високої твердості та зносостійкості, мають низку інших цінних властивостей, тому їх використання як у ремонтній справі, так і в промисловості постійно розширюється. Однак, при цьому виникають певні труднощі, пов'язані з недостатньою вивченістю механізмів спільного осадження різних металів та формування структури властивостей багатокomпонентних осадів.

Тому дана робота, присвячена дослідженню електроосадження сплавів на основі заліза та вивченню металознавчих аспектів їхньої підвищеної міцності, зносостійкості та інших властивостей є актуальною.

**Мета дослідження.** Встановлення закономірностей процесів формування структури та властивостей електролітичних двокомпонентних покриттів Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-W, Fe-Ti та розробка на цій основі технологічних процесів відновлення та зміцнення деталей машин, що дозволяють підвищити їхню зносостійкість та інші службові властивості.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання: на основі аналізу літературних даних у галузі нанесення електролітичних покриттів на основі заліза виявити найперспективніші леговані покриття для відновлення та зміцнення високонавантажених деталей машин; дослідити вплив легування на експлуатаційні властивості покриттів на основі заліза та провести порівняльні випробування покриттів Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-W, Fe-Ti на втомну міцність та зносостійкість; на основі проведених досліджень розробити технологічні рекомендації щодо відновлення та зміцнення сталевих деталей електролітичними двокомпонентними сплавами для підвищення зносостійкості та довговічності цих деталей.

**Об'єкт дослідження:** електролітичні покриття на основі заліза, леговані хромом, молібденом, вольфрамом або титаном.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу значимих факторів на зносостійкість електролітичних покриттів на основі заліза, леговані хромом, молібденом, вольфрамом або титаном.

**Методи дослідження.** У роботі використовувалися такі методи дослідження структури та властивостей електролітичних покриттів: оптична та електронна мікроскопія, спектрометричний та рентгеноструктурний аналізи; вимірювання твердості та мікротвердості; визначення щільності та міцності зчеплення покриттів з основою; визначення втомної міцності та зносостійкості легованих залізних покриттів.

### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. Куликівський В. Л., Дембіцький Н.В. Вали посівних машин, умови їх роботи та основні дефекти. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції молодих учених і науково-педагогічних працівників *«Сільськогосподарські, біологічні, економічні, загальноосвітні та технічні науки»*, 20 травня 2021 р. М. Умань. Умань : ВПЦ «Візаві», 2021. С. 166-169.

2. Ярош Я.Д., Свіжевський Є.В., Дембіцький Н.В. Порівняльні випробування ґрунтообробних робочих органів. Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної онлайн конференції *«Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України»*, присвяченої 20-й річниці з дня створення факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України. м. Київ. 2021. С. 245-248.

3. Куликівський В. Л., Климчук А. А., Сливинський В.О., Скринська М.В., Дембіцький Н.В., Маркус В.І. Методика визначення розподілу тиску на поверхні робочих органів плугів. Збірник тез *VII-ї* всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 174-177.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено технологічні процеси відновлення та зміцнення деталей машин, що дозволяють підвищити їхню зносостійкість та інші службові властивості.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 34 сторінки комп'ютерного тексту, містить 2 таблиці і 8 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ЗАЛІЗНИХ ПОКРИТТІВ

Електролітичні залізні покриття, як показано в багатьох роботах, мають більш високу твердість, порівняно із залізом, отриманим металургійним шляхом. Незважаючи на те, що електролітичне залізо відрізняється високою хімічною чистотою (не містить вуглецю та інших домішок), його властивості наближаються до властивостей загартованої середньовуглецевої сталі. У той же час електролітичне залізо має дуже невисокі механічні властивості і велику пластичність і в такому вигляді непридатне до використання як конструкційного матеріалу для відновлення деталей машин. Очевидно, що високі механічні та експлуатаційні властивості, які має електролітичне залізо безпосередньо після осадження, пов'язані з особливостями його мікро- та субмікроструктури. Специфічна структура залізних осадів визначається особливостями кристалізації металу, які, як було показано вище, пов'язані з умовами електролізу. Багато дослідників якраз і обмежуються розглядом властивостей електроосаджених покриттів в залежності від умов електроосадження, не торкаючись металознавчих аспектів явищ [1, 4]. Такий підхід ускладнює науково обґрунтований вибір оптимальних умов електролізу для отримання осадів високої якості із заданими властивостями. Першочергове значення для розробки ефективних технологій відновлення зношених деталей машин електролітичним покриттям на залізній основі має вивчення взаємозв'язку структури (у тому числі і тонкої структури) електролітичних осадів з їх властивостями.

У літературі представлено велику кількість досліджень з залежностям мікротвердості, міцності зчеплення, внутрішньої напруги, крихкості, зносостійкості та інших властивостей залізних осадів від складу електроліту. його кислотності, температури, щільності електролізного струму та інших умов електролізу [6, 8,]. Роботи ж, у яких наведено результати дослідження впливу



параметрів мікроструктури та субмікроструктури залізних електролітичних покриттів, поодинокі і вони містять дуже неповні, уривчасті відомості з цих питань, особливо з металознавчих аспектів електролітичних сплавів. У роботах [8] наведені дані, отримані електронно мікроскопічними та рентгеноструктурними дослідженнями, які дозволяють скласти деяке уявлення про дислокаційну структуру електролітичного заліза. Показано, що дислокації зосереджені, головним чином, в зоні меж субзерен, що складають кристали електролітичного осаду. Кут розорієнтування між цими субзернами у залізному осаді становить  $1...8^\circ$ . У літературі є відомості про те, що підвищення щільності катодного струму призводить до зменшення розмірів субзерен і збільшення кута їх розвороту. Автори [5, 6] вважають, що розміри субзерен можуть бути прийняті за основну характеристику тонкої структури електролітичних осадів, оскільки вони пов'язані з щільністю дислокацій від якої, у свою чергу, залежать їх характеристики міцності. Справді, що менше розміри субзерен, тим більше питома площа їх меж і тим більше сприятливих місць для концентрації дислокацій. Названі закономірності характерні як заліза, але й інших металів, одержуваних методом електроосадження. Вважається, що особливості структури електроосаджених металів, зокрема висока концентрація лінійних дефектів, у всіх електроосаджених металів мають єдину природу, пов'язану з еволюцією дислокаційної структури в процесі зародження та зростання кристалів електролітичного осаду.

Бар'єрна дія меж зерен (і субзерен) у металевих матеріалах докладно описана у фундаментальних працях. Оскільки по різні боки від меж зерен кордону розташовуються по-різному орієнтовані зерна та деякі ефекти, пов'язані з межами зерен, викликані саме цією різницею, а не власне кордоном. Вважається, що межі зерен поділяють вільні від напруги кристали, однак поблизу зчленування кристалів поля напруг, пов'язані з наявністю в зоні кордонів великої кількості дислокацій можуть бути істотні. Тому межа між зернами (субзернами) як така є область, фізично відмінну від зерен,

розташованих з її сторонам [10]. Модельне уявлення про рух дислокацій у силовому полі прикордонної зони металевого зерна дозволяє оцінити сили, що діють на лів дислокацій (зародок тріщини) за його пружного контакту з міжзеренним дислокаційним кордоном [11]. Представляючи тріщину як ряд дислокацій, можна оцінити силу, що діє на головну дислокацію цього ряду, як

$$F' = (\sigma \cdot b')L \quad (1.1)$$

де  $\sigma$  – тензор напруги викликаний дислокаціями у кордоні;

$b'$  - Вектор Бюргерса дислокацій у тріщині;

$L$  – одиничний вектор напрямку лінії дислокації, що належить тріщині.

Значення цієї сили залежить від положення лідируючої дислокації до площини ковзання дислокацій у стінці (кордону). У загальному випадку площина ковзання головної дислокації у ряді дислокацій, що імітує тріщину, виявлятиме тенденцію до повороту вздовж кордону.

Залежність сил на тріщині від кута розвороту сусідніх зерен показано на рис. 1.1.

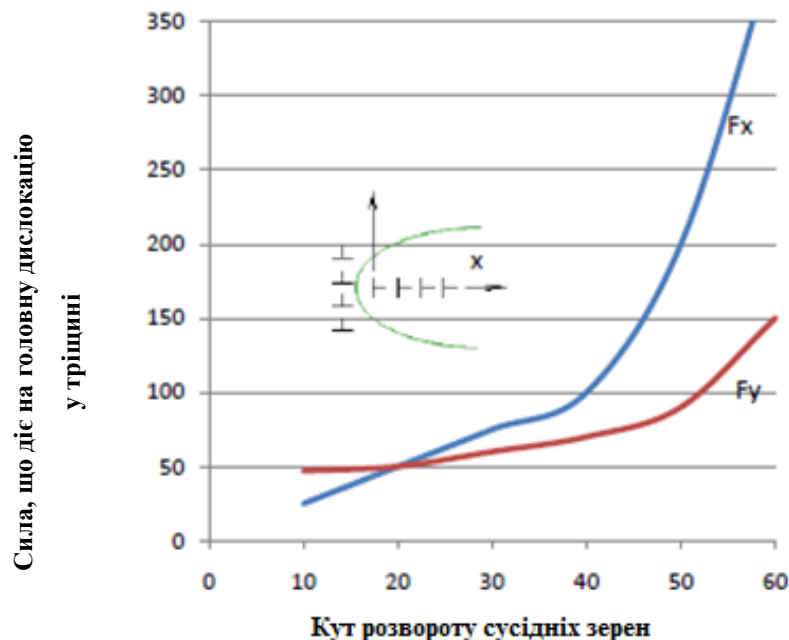


Рис. 1.1. Сили, які діють на тріщину (ряд дислокацій) з боку кордону залежно від кута розвороту суміжних зерен

Збільшення кута розорієнтування зерен навіть до  $1^\circ$  призводить до різкого збільшення опору межі тріщини, що рухається. Сили зростають також

пропорційно числу дислокаційних рядів, що становлять субмежу, і це може бути дуже важливим для поширення тріщин у кристалах з сильно розвиненою блоковою структурою, якими є кристали електроосадженого заліза. Опис великокутових кордонів за допомогою низки дислокацій носить формальний характер, проте, з використанням дислокаційної ядерної моделі, можна отримати цікаві результати, корисні для розуміння специфічних властивостей (підвищеної міцності) електролітичного заліза.

Безпосередньо з даної моделі випливає, що збільшення кута розвороту призводить до різкого зменшення максимальної напруги, що діє в площині ковзання дислокацій, що становлять кордон. Внаслідок цього змінюється характер сил, що діють на тріщину (рис. 1.2).

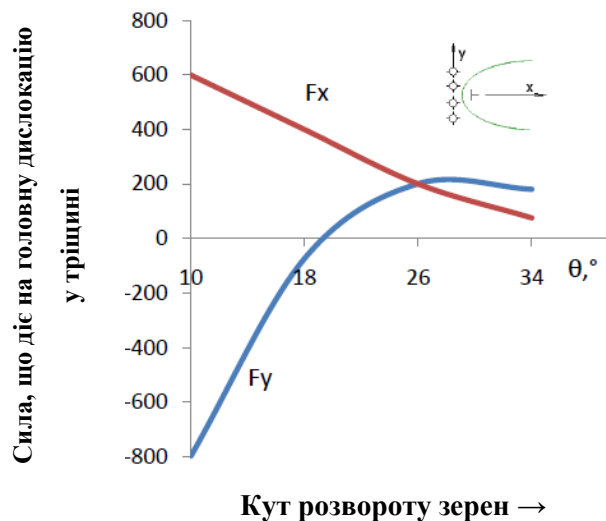


Рис. 1.2. Складові сил, що діють на тріщину з боку висококутової межі, залежно від кута розвороту зерен

Видно, що сила відштовхування  $F_x$  спочатку зростає до кутів розвороту  $15^\circ$ , що становить  $F_y$  (діюча вздовж кордону) при цих кутах змінює знак. Подальше збільшення розорієнтування призводить до різкого зменшення сил, що діють тріщину, тобто. кордон перестає бути ефективним перешкодою по дорозі ковзання дислокаційної тріщини. Відмінність у кристалографічному орієнтуванні зерен, що лежать по обидва боки від кордону, може спричинити виникнення пружних спотворень у прикордонних областях у процесі зростання електроосадженого покриття. Методом фотопружності на свіжовирощених

кристалах було виявлено значну залишкову напругу, що тягнеться на великі відстані в глиб стикуючих зерен [9, 10]. При кутах розорієнтування до  $15^\circ$  поля напруг навколо похилих кордонів мають переважно осередковий характер. Експериментальні дослідження показують, що внесок залишкових напруг у опір меж прориву тріщин може становити 20...30%. В результаті зупинки тріщин перед бар'єром у її вершині утворюються смуги ковзання, для яких межа також може бути перешкодою. При цьому тріщина залишається заблокованою створеною нею областю пластичної дислокації. В результаті сумарного впливу стискаючих напруг від смуг ковзання та присутності кордону в зоні контакту виникає складний напружений стан [13]. У безпосередній близькості від межі знижує напруги можуть досягати значень по порядку величини порівнянних з напругами, що розтягують, в кінчику тріщини і, таким чином, перешкоджати її руху. Згідно з дислокаційною моделлю [11] руйнування металу відбувається при досягненні в його структурі критичної щільності дислокацій, причому енергетика руйнувань подібна до енергетика плавлення. Ці положення справедливі й у металу, отриманого електролітичним осадженням.

Накопичення металу дислокацій та інших дефектів можна характеризувати збільшенням питомого обсягу металу чи зменшенням його щільності. У металів, що виділяються на катоді з високою перенапругою, однією з причин, що викликають зміну питомого обсягу осаду (або зміна щільності), може бути розряд іонів водню на катоді.

Дія водню на залізо, як і на інші метали, призводить до збільшення внутрішньої напруги в покриттях і збільшення щільності дислокацій в них, що сприяє підвищенню крихкості електроосажденного металу. При цьому водень, що входить до складу електролітичного заліза, може утворити із залізом тверді розчини (типу протонних), перебуваючи в пустотах кристалічних ґрат у частково іонізованому стані. У відносно великих дефектах - порах і порожнечках, а також, мабуть, у зонах дислокацій із сильно спотвореною ґратами, водень може бути присутнім в атомарній або навіть молекулярній формах.

Вважається, що при додаванні одного атома водню в типові металеві решітки відбувається збільшення обсягу кристале на ту саму величину  $\Delta v = 2,9 \text{ \AA}^3$  незалежно від матеріалу. Оскільки при електроосажденні заліза разом з ним на катоді виділяється велика кількість водню можна припустити, що надорощання, поряд з поляризацією, є головною причиною формування дефектів структури електроосажденного заліза. Водень і скупчення дислокацій можуть стати причиною значних мікроспотворень у решітці заліза та появи субмікротріщин.

Критерієм оцінки вкладу дефектів названого вище типу у загальну дефектність електроосажденного металу може бути щільність електролітичного осаду. Усі порушення впорядкування атомів у решітці заліза, а як і різні дефекти структури (одномірні, двовимірні і тривимірні) неминуче призводять до зміни щільності металу.

Спосіб визначення параметрів субмікроструктури заліза щодо зміни щільності електролітичного осаду дозволяє провести ряд безперервних властивостей осадів, починаючи від монолітних і щільних до пухких і пористих. Використання цього параметра для оцінки властивостей структури електроосажденного заліза може відкрити нові можливості розкриття залежностей субмікроструктури залізних осадів від складу електроліту та режимів електролізу. Ця оцінка для зносостійких залізних покриттів, що використовуються в ремонтному виробництві, надзвичайно важлива, тому що такі покриття, що використовуються на практиці режимах електролізу, завжди тією чи іншою мірою виходять пористими.

Аналіз літературних джерел з електроосадження залізних покриттів дозволяє зробити висновок, що зносостійкість таких покриттів визначається такими механічними властивостями як мікротвердість, межа міцності, модуль пружності, а так само внутрішніми напругами в покриттях, що узгоджується з прийнятими уявленнями про зношування металів.

Модуль пружності, як відомо, є мірою міцності зв'язку атомів (іонів) у кристалічній решітці електроосадженого осаду. Очевидно, що від величини модуля пружності залежить опір покриття дії контактних напруг, що виникають при терті. Чим вище значення модуля пружності, тим важче відокремити від електроосадженого на поверхні тертя мікрочастинок зносу. У поєднанні з високою міцністю, що залежить від структури металу, що зношується, високий модуль пружності (структурно нечутлива характеристика) може забезпечити електроосадженому покриттю виключно високу зносостійкість.

Однак, експериментальних даних щодо дослідження впливу складу електроліту та режимів електролізу на модуль пружності залізних осадів у відомій літературі практично немає. Відсутні також дані про взаємозв'язок модуля пружності з дефектністю і напруженістю кристалічної решітки електроосадженого заліза. Окремі роботи, в яких згадується про вплив режимів електроосадження на модуль пружності залізних осадів не можуть дати повної та надійної інформації про характер пружних властивостей залізних покриттів та їх зв'язок з експлуатаційними властивостями відновлених залізненням виробів.

У численних роботах, присвячених дослідженню зносостійкості залізних покриттів, ця зносостійкість пов'язується безпосередньо з мікротвердістю осадів. Однак, підвищення мікротвердості за рахунок зміни (посилення) умов електролізу, позитивно впливає на зносостійкість лише до певної межі. Перевищення цієї межі, зазвичай, досить високо ( $\sim 8000$  МПа) призводить до зниження зносостійкості електроосадженого заліза.

Відомі з літератури дані не відповідають питання, як мікротвердість пов'язана зі структурою осадів, зокрема з тонкою субструктурою, лише на рівні якої розвиваються початкові процеси руйнації металу. Тому залишаються неясними причини, що зумовлюють ті чи інші «оптимальні» режими електролізу та той чи інший рівень твердості електролітичних залізних осадів. Ймовірно, ці явища пов'язані зі зміною тонкої структури електролітичного заліза, з'ясувавши механізм цих змін можна отримувати покриття із заданими властивостями.

Внутрішня напруга в електролітичних залізних покриттях, поряд з мікротвердістю, часто найвизначнішою властивістю електролітичних покриттів. Методи вивчення внутрішніх напруг при цьому дуже різні: метод пошарового зняття покриттів, різні модифікації методу методу гнучкого катода (метод Северина), метод розрізних кілець (метод Давиденкова), рентгенодифрактометричні методи та ін. Останній метод можна визнати найбільш підходящим для дослідження внутрішніх напруг на субмікроскопічному рівні.

При визначенні рівня внутрішньої напруги в електролітичних опадах слід мати на увазі, що згодом цей рівень змінюється, мабуть, через поступову дифузію водню з покриття, а так само через релаксацію локальних піків напруг за рахунок деякого пластичного перебігу електроосажденного металу. Тому для визначення внутрішньої напруги рентгенівським методом зразки з електролітичними покриттями повинні бути витримані деякий час (~20 діб). У цьому випадку буде отримано найбільш достовірні та порівнянні результати. З огляду на вищевикладене можна зробити висновок, що електролітичне осадження металів, зокрема заліза, може розглядатися як своєрідний спосіб отримання високоміцного стану металу шляхом формування високодисперсних нерівноважних структур, насичених дефектами (дислокаціями). Дослідження структури та властивостей покриттів показують, що залізні покриття у процесі електрокристалізації насичуються дефектами та гранично зміцнюються. У цьому їх твердість досягає 6000...6500 МПа, величина субзерен (блоків мозаїки) зменшується до 100...120 Å.

### **Висновки по розділу**

При спробах отримати твердіші покриття шляхом жорсткості режимів електролізу виходить переупрочнення металу, покриття пронизується тріщинами і, часто, руйнується. Тому актуальним є завдання отримання високотвердих та

зносостійких покриттів іншим шляхом, а саме легуванням електроосадженого заліза.



## РОЗДІЛ 2

# ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА, ЛЕГОВАНИХ ХРОМОМ, МОЛІБДЕНОМ, ВОЛЬФРАМОМ ТА ТИТАНОМ

Зносостійкість – найважливіша характеристика машинобудівних матеріалів, у тому числі покриттів на поверхнях деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного тертя. Від зносостійкості деталей залежить тривалість експлуатації машин, а деяких випадках – їх працездатність. Зносостійкість металевих матеріалів залежить від комплексу взаємопов'язаних факторів та параметрів, таких як твердість, хімічний склад, характеристики структури та субструктури, напруженість та ін. Крім того, на зносостійкість деталей впливають умови, в яких відбувається зношування.

Основні умови зношування, від яких залежить його інтенсивність, такі: навантаження, швидкість відносного переміщення поверхонь, що труться, і зовнішнє середовище.

Для випробування електроосаджених покриттів нами була використана стандартна машина тертя СМЦ-2, яка дозволяє змінити умови зношування у широкому діапазоні. Випробовували серії зразків (роликів) з електролітичними покриттями на периферії чистим електролітичним залізом і електролітичними сплавами Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-W і Fe-Ti. Товщина всіх видів покриттів складала 0,3...0,4 мм. Після нанесення покриттів ролик шліфували до Ra=0,5...2,0 мкм. Як кон тртілї використовували колодки зі сталі 45, піддані нормалізації (HRC35...40).

Випробування проводили в умовах граничного (напівсухого) тертя, оскільки більшість деталей, що відновлюються, працюють саме в таких умовах. Питоме навантаження складало 7,5 МПа, частота обертання ролика (зразка) - 1000 хв-1, тривалість випробування - 6 годин загальний шлях ковзання - 54000

м). Знос визначали ваговим методом. На кожному зразку, крім того, досліджували хімічний склад (визначали вміст елементів, що легують).

Електроосадження досліджуваних покриттів на зразки (ролики) проводилося за однакових режимів електролізу: показник асиметрії змінного струму  $\beta=6$ , щільність катодного струму –  $D_k = 30 \text{ А/дм}^2$ , температура електроліту  $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , кислотність –  $pH = 0,8$ . Для отримання осадів з різним вмістом легуючих елементів (Cr, Mo, W та Ti) використовували електроліти на основі хлористого заліза з різним вмістом солей легуючих елементів.

В результаті проведених дослідів були отримані залежності зносу залізохромистих, залізомолібденових, залізовольфрамових та залізититанових сплавів від концентрації солей відповідних легуючих елементів в електролітах, використаних для їхнього осадження. Були також отримані залежності вмісту легуючих елементів у сплавах від вищеназваних параметрів (рис. 2.1...2.4).

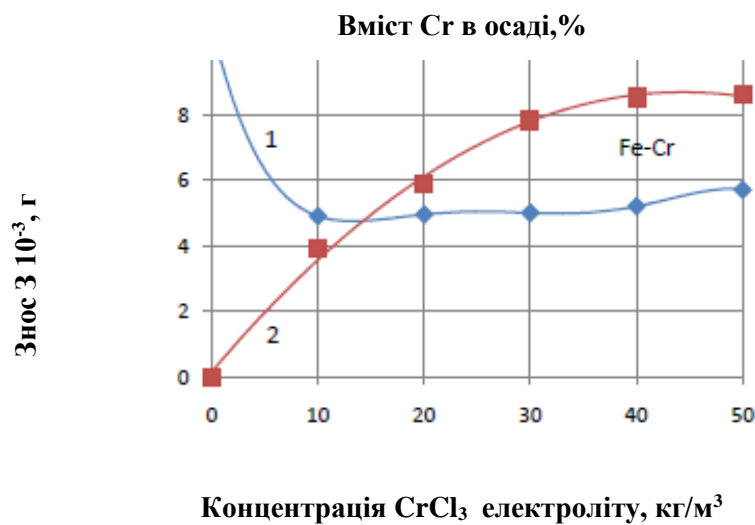


Рис. 2.1. Залежності зносу електролітичного залізохромистого сплаву (1) та вмісту в ньому хрому (2) від концентрації хлориду хрому в електроліті.

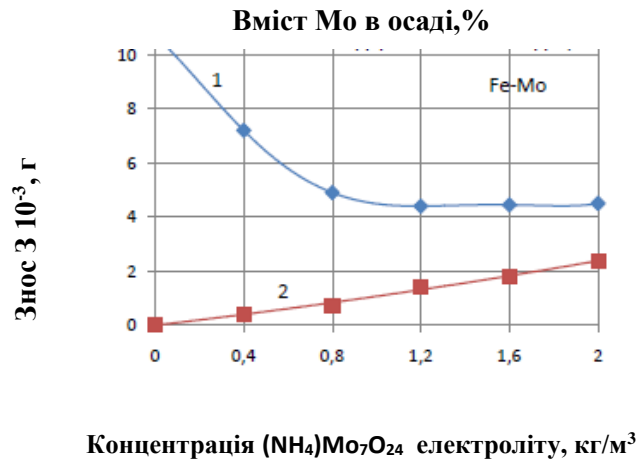


Рис. 2.2. Залежності зносу електролітичного залізомолібденового сплаву (1) та вмісту в ньому молібдену (2) від концентрації молібдату амонію в електроліті

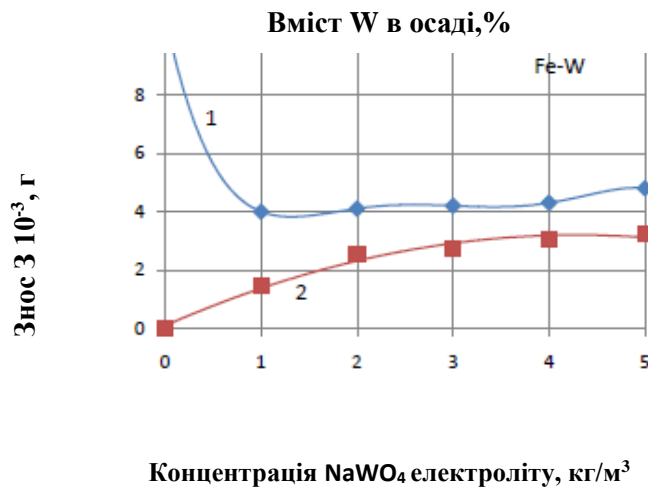


Рис. 2.3. Залежності зносу електролітичного залізовольфрамового сплаву (1) та вмісту в ньому вольфраму (2) від концентрації вольфрамату натрію в електроліті

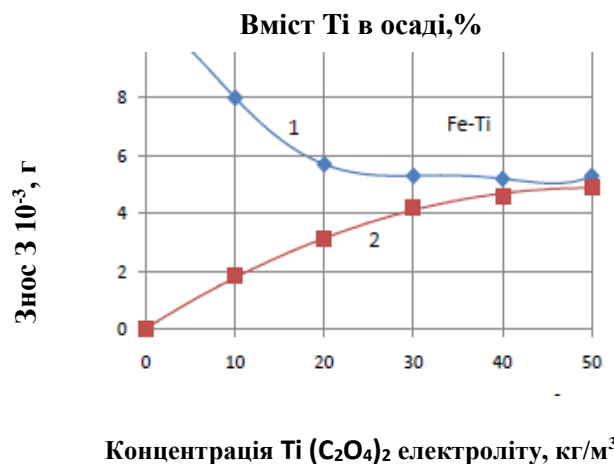


Рис. 2.4. Залежності зносу електролітичного залізитананого сплаву (1) та вмісту в ньому титану (2) від концентрації титану в електроліті

Аналізуючи отримані графіки можна дійти невтішного висновку, що легування залізних осадів усіма дослідженими елементами позитивно впливає на зниження інтенсивності зношування. Найвищу зносостійкість має електролітичний залізовольфрамовий сплав, що містить 1,5...2 % W. Найвища зносостійкість залізомолібденового сплаву проявляється при вмісті в ньому 1,5...2 % Mo. Слід скасувати, що зносостійкість електролітичних сплавів залізовольфрам і залізо-молібден при однаковому вмісті в них легуючих елементів (вольфраму або молібдену) приблизно однакова

Дещо меншу зносостійкість мають сплави залізо-хром, із вмістом у них хрому близько 4%. Нарешті, найменшою зносостійкістю відрізняються залісотитанові електролітичні метали. Максимум зносостійкості цих сплавів досягається за вмісту титану близько 4,5 %. Порівняльна (стосовно чистого електролітичного залізу) зносостійкість легуваних сплавів представлена на діаграмі.

Як видно, всі електролітичні сплави мають дуже високу зносостійкість - більш ніж у 2 рази вище, ніж зносостійкість чистого електролітичного заліза, хоча один від одного ці сплави за зносостійкістю відрізняються незначною мірою. Різниця у зносостійкості сплавів залізо-хром, залізо-молібден, залізовольфрам і залізо-титан пояснюється, мабуть, різницею в їх твердості, яка, у свою чергу, багато в чому залежить від характеристик атомів легуючих елементів.

Отримані дані вказують на доцільність легування електролітичного заліза кожним із досліджених елементів, що легують, оскільки вони значно підвищують зносостійкість залізних осадів.

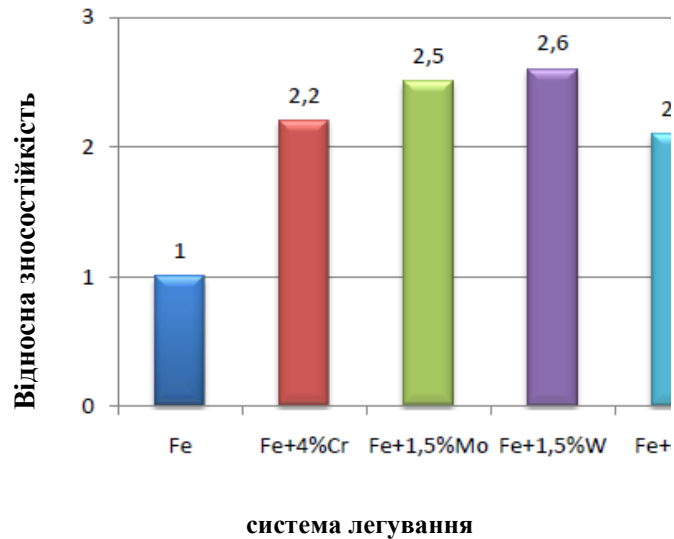


Рис. 2.5. Відносна зносостійкість легованих сплавів на основі заліза в умовах граничного тертя

Електролітичні сплави мають підвищену зносостійкість не тільки в порівнянні з чистим електролітичним залізом, але і в порівнянні з загартованою сталлю 45. Наші експерименти показали, що в умовах граничного тертя зразки з цієї сталі за 6 годин зношування отримали знос рівний в середньому  $Z=5,3 \cdot 10^{-3}$  г, у той час, як величина зношування електролітичних сплавів у цих умовах становила менше  $Z < 5,0 \cdot 10^{-3}$ . Наприклад, знос залізовольфрамового покриття становив  $Z=3,9 \cdot 10^{-3} \dots 4,1 \cdot 10^{-3}$  р, що у 1,3 рази нижче, ніж знос загартованої середньовуглецевої сталі.

Підвищену зносостійкість електролітичних сплавів у порівнянні з загартованою сталлю, мабуть, можна пояснити тим, що при навантаженні тертям на локальних ділянках поверхонь, що труться, контактують з поверхнею контртіла, виникає підвищена температура, яка може досягати сотень градусів. Це спричиняє відпуск загартованої сталі та зниження її твердості, у той час, як у електролітичних сплавах, що мають, як було показано вище, зернограничне зміцнення, локальне підвищення температури майже не впливає на твердість.

Крім того, при граничному терті, як відомо, на поверхнях, що труться, утворюються окисні плівки, які якраз є об'єктами руйнування при терті. Легуючі елементи, присутні в електролітичних сплавах, очевидно, входять до складу

таких плівок, збільшуючи їхню міцність порівняно з окислами чистого заліза, що і відбивається на підвищеній зносостійкості легованих електролітичних осадів порівняно з вуглецевою сталлю.

У багатьох випадках реальної експлуатації деталей машин мастило між поверхнями, що труться, з тієї чи іншої причини може бути відсутнім (наприклад, мастило коленвала в момент запуску двигуна) і створюються умови для сухого тертя. При цьому виникає питання про величину питомих навантажень на контактуючі поверхні при яких відбувається схоплювання поверхонь, що труться.

Для з'ясування стійкості легованих залізних покриттів проти схоплювання був проведений експеримент, в якому ролики із залізними покриттями, легованими різними елементами, навантажувалися при терті про колодки без мастила доти, доки не наставало схоплювання зразка (ролика) та контртіла (колодки).

Випробування проводилося машиною тертя СМЦ-2, де після кожних двох хвилин роботи (2000 оборотів шпинделя) підвищувався тиск на 0,25 МПа. Навантаження здійснювалося підтягуванням пружини навантажувача машини. Дослід закінчувався, коли на блискучій поверхні ролика помічалися смужки (сліди) і при цьому машина починала видавати характерний звук, що вібрує.

Випробування показали, що сталь 45 практично миттєво схоплювалася з матеріалом контртіла (сталлю 45) при тиску 0,25...0,5 МПа. Електролітичні покриття витримували без схоплювання значно більші навантаження – 1,25...1,5 МПа.

У деяких роботах, підвищена стійкість електролітичного заліза проти схоплювання, пояснюється високою швидкістю утворення на поверхнях окисних плівок, що труться (набагато вищою, ніж на поверхні сталі). Це становище, очевидно, справедливе й у електролітичних сплавів з урахуванням заліза. Найбільш активні по відношенню до кисню елементи, титан і хром, сприяють

при введенні їх до складу електролітичних залізних покриттів, підвищення опору покриттів проти захоплювання.

Окисні плівки, що утворюються на поверхні електролітичних покриттів, захищають електроосаджений метал (ювенальні поверхні) від безпосереднього контакту з поверхнею контртіла. Схоплювання поверхонь, що труться, при тисках вище 1,25 МПа, пояснюється руйнуванням окисних плівок під дією підвищених локальних силових навантажень і підвищених температур на окремих ділянках (мікроділянках) поверхонь, що труться.

При тисках нижче 1,25 МПа схоплювання немає, оскільки швидкість зростання окисних плівок (чому сприяють легуючі елементи) перевищує швидкість їх руйнації при терті, тобто. процес зростання окисних плівок переважає поверхні тертя над процесом їх руйнації. Окисна плівка, що оточує вогнище елементарного руйнування, перешкоджає поширенню цього вогнища, яке моментально затягується новою плівкою, тому зношування відбувається без захоплювання і без значних слідів глибинного виривання металу

Результати випробувань при тиску 1,0 МПа електролітичних сплавів на зношування в умовах сухого тертя показали, що легуючі елементи значно знижують інтенсивність зношування електролітичних покриттів на основі заліза (рис. 2.6).

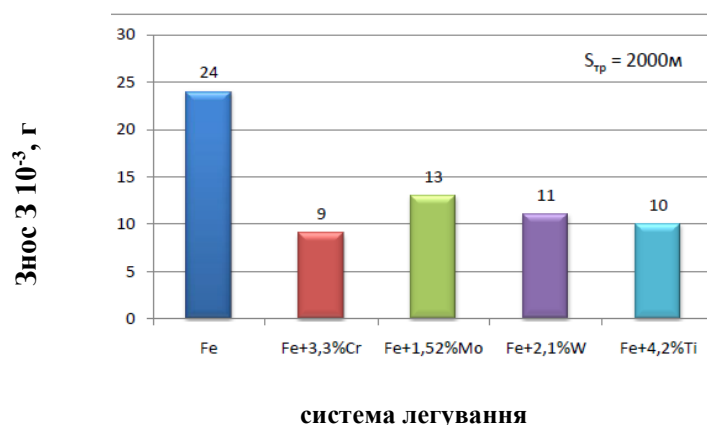


Рис. 2.6. Порівняльний знос легованих електролітичних покриттів на основі заліза при сухому терті. Шлях тертя 2000 м, питоме навантаження 1,0 МПа

Вважається, що між зносостійкістю та твердістю металевих матеріалів існує пряма залежність, тобто що вище твердість матеріалів, то вище їх зносостійкість. Такий висновок було зроблено в результаті вивчення зношування сталей, що застосовуються в машинобудуванні та зміцнюються різними видами термічної та хіміко-термічної обробки. Проте, щодо електролітичних покриттів цей висновок не зовсім правильним.

Наші експерименти показують, що як в умовах граничного тертя, так і в умовах сухого тертя підвищення зносостійкості покриттів спостерігається лише за підвищення твердості покриттів в інтервалі від 5500 МПа до ~ 8000 МПа. Подальше підвищення твердості залізних покриттів, чи шляхом збільшення жорсткості режимів електролізу, чи підвищенням ступеня легування електролітичних залізних сплавів, що не призводить до підвищення зносостійкості покриттів або навіть дещо знижую зносостійкість.

Це пов'язано, мабуть, з охрупчиваниєм електролітичних покриттів при спробах отримання максимальної твердості. При зношуванні крихких покриттів відбувається відділення високотвердих фрагментів зношування з поверхонь тертя та абразивний вплив їх на ці поверхні. В результаті інтенсивність зношування збільшується, чому багато в чому сприяє тріщину структури високотвердих покриттів.

### **Висновки по розділу**

Таким чином, твердість (мікротвердість) електролітичних легованих залізних покриттів для забезпечення їх максимальної зносостійкості не повинна перевищувати 8000 МПа.



### РОЗДІЛ 3

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМИ МЕТАЛАМИ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА

На підставі проведених досліджень можна запропонувати схему технологічного процесу електроосадження залізних легованих покриттів на поверхні зношених деталей на прикладі залізохромового сплаву.

1. Очищення деталей від олій та інших забруднень. При цьому доцільно використовувати промивання деталей у бензині або в інших органічних розчинниках (уайт-спірит, ацетон та ін).

2. Ізоляція місць, що не підлягають покриттю. Місця, на які не потрібно наносити електролітичні покриття, ізолюються поліхлорвініловою плівкою або стрічкою. Для цієї мети можна використовувати також перхлорвініловий лак. При підпаданні лаку на поверхню, що підлягає покриттю електролітичним сплавом, необхідно ретельно видалити сліди цього лаку, аж до зачистки наждачним папером, оскільки в іншому у разі покриття може вийти з дефектами.

3. Монтаж деталей, що відновлюються, на підвіски. Під час проведення цієї операції необхідно забезпечити хороший електричний контакт між деталлю та підвісним пристроєм.

4. Електролітичне знежирення деталей. Для повного видалення масляних забруднень деталі завішуються у ванну електролітичного знежирення на катодну штангу. Для знежирення використовується електроліт наступного складу (кг/м<sup>3</sup>):

- їдкий натрій 40...50;
- вуглекислий натрій 40...50;
- тринатрійфосфат 20...25;
- рідке скло 2...3.

Температура електроліту  $t = 70...80^{\circ}\text{C}$ , густина катодного струму  $D_k=10\text{A}/\text{дм}^2$ ; щільність анодного струму  $D_A = 5 \text{ A}/\text{дм}^2$ . Процес знежирення полягає у витримці деталей на катоді протягом 5...8 хвилин із наступною

витримкою на аноді протягом 1 хвилини. При електролітичному знежиренні застосовуються сталеві аноди.

5. Проміжне промивання. Після електрохімічного знежирення деталі промиваються по 3...5 хвилин спочатку у гарячій, а потім у холодній проточній воді.

6. Анодне травлення. Ця операція застосовується для видалення окисної плівки з поверхні, що відновлюється з метою отримання міцного зчеплення майбутнього покриття з основним металом. Для анодного травлення використовується ванна з електролітом наступного складу (кг/м<sup>3</sup>):

- сірчана кислота 290...300;
- сірчаноокисле залізо 10...20.

Режими травлення призначаються залежно від матеріалу деталей (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Режими анодного травлення для різних матеріалів

№ режиму	Матеріал деталі і термообробка	$D_a$ , А/дм <sup>2</sup>	Час витримки, хв.
1.	Сталь Ст3...Ст5	20	2
2.	Сталь 10...30	40	2
3.	Сталь 40, 40×; загартування	60	4
4.	Чавун сірий	20	2

7. Промивання. Після анодного травлення деталі ретельно промивають у холодній воді видалення слідів сірчаної кислоти лежить на поверхні деталі.

8. Нанесення покриття. Осадження металу залізо-хром проводиться з електроліту наступного складу (кг/м<sup>3</sup>):

- хлористе залізо 350;
- хлористий амоній 200;
- соляна кислота 1,5;
- хлористий хром 10...50.

Температура електроліту  $t_{\text{тк}} = 20...30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\text{pH} = 0,5 \dots 0,8$ ; аноди сталеві (сталь 10...15 у чохлах). Електролізний струм асиметричний промислової частоті.

Деталь завантажується у ванну та витримується без струму протягом 0,5...1,5 хв, потім протягом 10 хвилин дається розгінний режим: початок – показник асиметрії  $\beta=2$ , щільність катодного струму  $D_{\text{к}}=5 \text{ А/дм}^2$ ; закінчення – показник асиметрії  $\beta=6$ , щільність катодного струму  $D_{\text{к}}=30...40 \text{ А/дм}^2$ .

Мінімальна відстань між анодом та катодом (деталлю) має бути 50...100 мм (залежно від розмірів деталі). У разі покриття внутрішньої поверхні відстань між анодом і катодом (внутрішньою поверхнею деталі) повинна бути не менше 15 мм.

При тривалому знаходженні електроліту в неробочому стані (понад 2 доби) перед початком роботи його необхідно підкислити до  $\text{pH}=0,8$  і пропрацювати на технологічні катоди протягом 2...3 годин.

9. Нейтралізація. Нейтралізація кислих компонентів робочого електроліту, що залишилися на поверхнях та в поглибленнях деталей, проводиться розчином вуглекислого натрію ( $50 \text{ кг/м}^3$ ) при температурі  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 2...5 хв.

11. Промивання та сушіння. Після нейтралізації деталі промиваються в гарячій воді і сушать стисненим повітрям або в сушильній шафі при інтенсивній вентиляції.

12. Контроль якості. Якість покриття визначається візуально. Покриття вважається якісним, якщо його поверхня гладка та рівна, без дендритів, здуття та лущення.

Приготування електроліту для осадження залізохромних покриттів в такий спосіб.

Хлористе залізо готується шляхом розчинення сталевої стружки (від маловуглецевих якісних сталей 10, 15 або 20) у технічній соляній кислоті. Для приготування, наприклад, 10 літрів розчину хлористого заліза з концентрацією  $180 \text{ кг/м}^3$  потрібно 0,6 кг сталевої стружки і 2,6 кг соляної технічної кислоти

щільністю 1,14. Розчин кислоти підігрівають до температури 30...40 °С і завантажують до нього невеликими порціями сталеву стружку, витримуючи до повного розчинення стружки. Інші компоненти розчиняють в окремих ємностях, фільтрують і зливають у ванну. Електроліт до розрахункового обсягу доводять дистильованою водою.

Електроліти для електрохімічного травлення та анодного травлення готуються також з використанням дистильованої води, в якій розчиняють відповідні компоненти і через фільтр розчини зливають у загальну ванну.

У процесі експлуатації електролізної ванни та ванн електрохімічного знежирення та анодного травлення проводиться їх періодичне обслуговування, яке полягає в наступному:

- контроль та коригування кислотності та підтримання рівня електроліту у ванні;
- контроль та коригування складу електроліту;
- фільтрування електроліту.

Цеховий контроль кислотності електроліту виробляється універсальним індикаторним папером або рН-метром. Коригування кислотності, при необхідності проводиться шляхом періодичної добавки соляної кислоти питомої ваги 1,14.

Контроль електроліту за складом у робочій ванні залізнення проводиться зазвичай один раз на тиждень. Також один раз на тиждень контролюється склад електроліту у ванні анодного травлення, а у ванні електрохімічного знежирення контроль складу електроліту проводиться двічі на місяць. Контроль електролітів у всіх ваннах проводиться хімічним аналізом.

Для перевірки працездатності деталей з електролітичними легованими покриттями було вибрано поршневі пальці, які працюють при високих навантаженнях в умовах граничного тертя.

Випробовувалися поршневі пальці двигуна СМД-14 (деталь СМД-0306-1А): серійні пальці зі сталі 12ХНЗА, що мають після хіміко-термічної обробки

твердість HRC 56 і ті ж пальці, відновлені залізохромними покриттями (0,15 мм на бік). Вміст хрому в покритті становило 4,8% мікротвердість відновленої поверхні  $H_{\mu}=7740$  МПа.

Серійні поршневі пальці встановлювалися на першому та третьому циліндрах двигуна, на другому та четвертому циліндрах – пальці, відновлені залізохромистими покриттями.

Стендові випробування двигуна СМД-14 із серійними та експериментальними деталями. Випробування двигуна проводилося на стенді КІ-3824 за ДСТУ. Тривалість випробувань становила 800 годин, що відповідало 200 циклам, що повторюються (випробування на надійність). За час випробувань двигун двічі розбирався: після 800 годин роботи та після завершення експерименту. Випробовувалися поршневі пальці (деталь СМД-0306-1А): серійні зі сталі 12ХНЗА, що мають після хіміко-термічної обробки твердість  $H_{RC}-56$ , і експериментальні, виготовлені зі сталі 45 з покриттям залізо-хром, що пройшли хіміко-термічну обробку.  $1000 \text{ кг/см}^2$ . Мікротвердість серцевини –  $824 \text{ кг/мм}^2$ . Результати представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. – Результати зношування поршневих пальців і сполучених з ними бобишок поршнів і втулки верхньої головки шатуна.

Найменування сполучення	Монтаж. Зазор, мм	Зношування після 800 годин роботи, мм втулка/валик	Зазор в парах після 800 годин роботи, мм	Збільшення зазору, мм
Серійні пальці				
Поршковий палець – бобишка поршня	-0,002	0,083/0,05	0,133	0,135
Поршковий палець – втулка шатуна	+0,008	0,069/0,043	0,112	0,104
Експериментальні пальці				
Поршковий палець із покриттям залізо-хром - бобишка поршня	-0,003	0,074/0,011	0,856	0,088
Поршковий палець із покриттям залізо-хром – втулка шатуна	+0,004	0,06/0,008	0,068	0,064

При розбиранні двигуна після 800 годин роботи всі випробувані деталі мали хороші поверхні тертя.

На підставі отриманих результатів можна зробити такі висновки:

а) Порівняльні стендові випробування серійних та експериментальних поршневих пальців показали, що зношування експериментальних пальців з покриттям залізо-хром, в середньому, в 2 рази менше серійних поршневих пальців.

б) Зношування сполучених поверхонь бобишок поршня і втулок шатунів відповідно в 1,2 рази і в 1,6 рази менше порівняно зі зносом у парі з серійними пальцями.

в) Зношування експериментальних пальців зі сталі 45 з покриттям залізо-хром і подальшою хіміко-термічною обробкою приблизно в 5 разів менше серійних.

г) Зношення сполучених поверхонь бобишок поршня та втулок шатунів у 1,1 рази менше серійних.

Виробничі випробування електролітів та покриттів.

Виробничі випробування електроліту для осадження металу залізо-хром та осадження металу проводилися на ділянці відновлення деталей. Були відібрані ряд деталей для відновлення: розподільний вал /204-1006015-В/, площа поверхні, що покривається 2,9 дм<sup>2</sup>, вага 6,4 кг, товщина шару сплаву залізо-хром 0,2-0,25 мм; провідний вал коробки передач /2001701030/, площа поверхні, що покривається 0,8 дм<sup>2</sup>, вага 7,2 кг, шийки валу під підшипники відновлювалися на товщину 0,25-0,3 мм; ведений вал коробки передач /00-1760305-А/, площа поверхні, що покривається 3,6 дм<sup>2</sup>, вага 14,2 кг, товщина шару сплаву на шийках 0,25-0,3 мм; шворень поворотної цапфи /200-30010-МА/, поверхня, що покривається 2,5 дм<sup>2</sup>, вага 3,5 кг, товщина шару сплаву 0,3-0,4 мм та інші деталі.

## **Висновки по розділу**

Випробування показали стабільність електроліту у роботі, високу швидкість осідання та технічну можливість відновлення деталей двигуна автомобіля МАЗ-205 та інших деталей.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведених у цій роботі досліджень показано можливість вирішення проблеми підвищення довговічності деталей, відновлених електролітичними покриттями, шляхом використання не чистого заліза, а електролітичних сплавів на основі заліза, легованих хромом, молібденом, вольфрамом або титаном.

Легування залізних електролітичних осадів хромом, молібденом, вольфрамом та титаном призводить до підвищення їх твердості. Найбільшою мірою твердість збільшується при легуванні електролітичного осаду вольфрамом, трохи меншою мірою – молібденом. Ці елементи сприяють значному зменшенню розмірів субзерен (і зерен) та збільшенню щільності дислокацій у легованих осадах.

Легування залізних осаджень позитивно впливає підвищення зносостійкості (в 2,1...2,4 разу вище, ніж зносостійкість чистого електролітичного заліза). Різниця у зносостійкості сплавів пояснюється, головним чином, відмінністю їх твердості. Електролітичні сплави мають підвищену зносостійкість і по відношенню до загартованої сталі 45 (в 1,3 рази). При граничному терті на поверхнях, що труться, утворюються окисні плівки, які є об'єктами руйнування при терті. Легуючі елементи, присутні в електролітичних сплавах, входять до складу цих плівок, збільшуючи їхню міцність, і, таким чином, підвищують зносостійкість. Леговані покриття мають підвищену зносостійкість та в умовах сухого тертя.

Таким чином, використання легованих електролітичних покриттів замість традиційного залізнення дозволить значно підвищити довговічність відновлених деталей (збільшити їх післяремонтні ресурси) та підняти рентабельність ремонтного виробництва. Це дозволить вирішити важливе народногосподарське завдання – імпортозамщення дорогих запчастин та підвищення ефективності реновації вітчизняної та зарубіжної техніки.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Київ : Техника, 1976. 291с.
2. Костецкий Б.И. Механохимические процессы при граничном трении. Москва : Наука, 1972. 170с.
3. Бершадский Л.И. Масштабное переупорядочение структуры и энтропийные эффекты при трении и износе металлов. Физика износостойкости поверхности металлов: сб. науч. трудов. Ленинград : ФТИ, 1988. С. 166 - 182.
4. Попов С.М. Кореляційні залежності структури та властивостей сплавів при визначенні зносостійкості. Металознавство та обробка металів. 2003. № 2. С. 42-47.
5. Лабунець В.Ф. Тенденції створення захисних структур триботехнічного призначення. Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. / Нац. авіац. ун-т. 2006. Вип. 45. С. 107-118.
6. Кіндрачук М.В. Трибологія покриттів матрично-наповненого типу. Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. / Нац. авіац. ун-т. 2007. Вип. 48. С. 127-141.
7. Андреев А.А. Осаждение PVD-методами наноструктурных покрытий с высокими механическими параметрами. Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. 6-й Междунар. конф. – Харків : ННЦХФТИ : ИПЦ Контраст, 2005. С. 144-153.
8. Баева Л.С. Повышение долговечности деталей машин методом нанесения многокомпонентных защитных диффузионных покрытий. Наука производству. 2000. № 2. С. 29-31.
9. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10T наноструктурирующей фрикционной обработкой. Обработка металлов. 2015. С. 80–92.

10. Борисенок Г.В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1981.424с.
11. Титаноалюминидные покрытия на стали 12х18н10т с барьерным слоем нитрида титана. Специальная электрометаллургия. 2011. №2. С. 50–55.
12. Константинов В. М. Оценка износостойкости покрытия TiN на упрочненной и не упрочненной стальной основе. Вестник БарГУ. Серия: Физико-математические науки. Технические науки научно-практический журнал. 2013. № 1. С. 102–107.
13. Похмурский В.И. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. Київ : Наук. думка. 1980. 188с.
14. Гуменюк І. А. Зносостійкість сталі 12Х18Н10Т з дифузійнолегованим покриттям системи хром-алюміній. Науковотехнічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології», 15-16 листопада 2017, м. Київ: матеріали. Київ: НАУ, 2017. С. 80.
15. Корнієнко А.О. Триботехнічні характеристики термооброблених композиційних електролітичних покриттів з наповнювачами евтектичного сплаву. Проблеми тертя та зношування. 2017. №4. С. 63–68.