

**Артемчук В.В.**Дніпропетровський національний  
університет залізничного транспорту  
ім. академіка В. Лазаряна,  
м. Дніпропетровськ, Україна**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ШАРУВАТОГО  
ЗАЛІЗНОГО ПОКРИТТЯ ОТРИМАНОВОГО  
ПРОГРАМНИМ ЕЛЕКТРОЛІЗОМ****Вступ, постановка проблеми**

Як відомо, зносостійкість є одним із головних та визначаючих експлуатаційних параметрів як нової, так і відновленої деталі. Разом з іншими показниками, наприклад, втомною міцністю зносостійкість у найбільшій мірі визначає ресурс відновлених деталей.

Дослідження явища зношування деталей є вкрай важливим, оскільки розуміння процесів, що відбуваються в контактних поверхнях матеріалів дозволяє розробити або нові конструкторські рішення по використанню більш зносостійких матеріалів (на етапі проектування виробів), або застосувати більш ефективні мастильні матеріали, або розробити нові та вдосконалити існуючі технології відновлення зношених деталей. Метою вказаних заходів є підвищення зносостійкості, а головне ресурсу та надійності рухомого складу. В даній роботі зупинимось на проблемі підвищення ресурсу та надійності деталей локомотивів і вагонів шляхом нанесення зносостійких відновлюючих шаруватих електролітичних покриттів.

Процес зношування є складним, неоднозначним та багатофакторним. Для визначення та знаходження раціональних параметрів процесу відновлення деталей важливим залишається встановлення зв'язків за схемою «параметри процесу нанесення покриттів – тонка структура – зносостійкість».

Роботи по встановленню зв'язків між тонкою структурою та зносом є, але недостатньо [1 - 3], а з врахуванням шаруватості залізних покриттів взагалі невідомі. Можливо це пов'язано з великою кількістю різних варіантів нанесення залізних електролітичних покриттів та з доступними умовами і обладнанням. Крім того, у більшості робіт автори аналізують контактні пари виконані з різнорідних матеріалів: «сталі-чавуну», «сталі-бронзи», «сталі-алюмінієві сплави» та інші, проте на транспорті і в інших галузях промисловості не рідко зустрічається пара «сталь-сталь», хоча і з різними параметрами. Тому виникає необхідність проведення відповідних досліджень.

Метою даної роботи є дослідження процесів зношування шаруватого залізного електролітичного покриття, визначення структурні параметри, товщини шарів та їх співвідношення.

Процеси, що відбуваються у зоні контакту є складними та часто конкуруючими. Відомо, що електролітичне залізо має більшу стійкість до схоплювання у порівнянні із загартованою сталлю 45. Цим пояснюється більша зносостійкість при сухому та граничному терті при порівнянні наведеної пари. Враховуючи великий вплив адгезійного виду зношування на загальну величину зносу, створення умов для зменшення схоплювання є однією з головних задач при підборі режимів нанесення покриттів. Як відомо, знос контактуючих поверхонь залежить від багатьох факторів, наприклад, шорсткості поверхонь, твердості, контактного тиску, швидкості тертя, температури, наявності та умов змащування та інше. У той же час можна впевнено сказати, що зносостійкість пов'язана з міцнісними властивостями покриттів, одним із яких є мікротвердість. Мікротвердість прямо залежить від режимів осадження металу й відповідно структури покриття та є вигідним з точки зору визначення та контролю. Дослідження науковців показують, що оптимальною мікротвердістю з точки зору зносостійкості залізних покриттів є 4500 ... 5500 МПа [3, 5], а за даними [6] значення мікротвердості, наприклад, для контактної пари «покриття – чавун СЧ15-32» становить 5000 МПа. Тобто для електролітичного заліза немає чіткої прямо пропорційної залежності зносостійкості від мікротвердості, як для багатьох інших матеріалів. Хоча єдиної думки з даного питання немає, оскільки в роботах [7, 4] запропоновані залежності, де із збільшенням мікротвердості зростає зносостійкість. Однак власні дослідження показують, що питання спірне і значення мікротвердості, як визначального параметра зносостійкості може коливатися в залежності від багатьох факторів. Однак, спільною є думка авторів про залежність зносостійкості від структури покриття. Збільшення розмірів блоків мозаїки приблизно до 1000 ... 1200 Å і більше приводить до зниження мікротвердості та відповідно підвищенню пластичності осаду. Під дією багатократних знакозмінних пластичних деформацій відбувається відшаровування частинки з покриття, що викликано втомленим руйнуванням матеріалу. Дрібнення структури до 300 ... 350 Å приводить до зміцнення покриття та збільшення мікротвердості та зносостійкості. Однак подальше дрібнення структури покриття (тобто при  $D < 300$  Å) обумовлює утворення сітки суб- і мікротріщин, у тому числі і в тонких поверхневих шарах; в результаті властивості осадів погіршуються, а при  $D \leq 100$  ... 140 Å різко погіршуються [3]. Відбувається значне окрихтування покриття, енергії в контакті достатньо для подолання сил зв'язку частинки з поверхнею і частинка відокремлюється від покриття. При цьому видалена частинка, окислюючись, являє собою абразив, який прискорює процес зношування. Треба враховувати, що на відміну від об'ємного напружено-деформованого стану поверхневих шарів, при терті максимальні напруження виникають в мікрооб'ємах поверхневого шару, що пояснюється контактуванням окремими мікровиступами контактуючих тіл, що у свою чергу приводить до виникнення циклічної зміни знаків напружень. Крім того, важливим є пояснен-

ня підвищеної зносостійкості електролітичного заліза безперервним створенням окисної плівки на його поверхні [6]. Тоді логічним є те, що відокремлені частки створюють умови для локального руйнування цієї плівки та схоплювання контактуючих поверхонь. Нижче наведемо більш глибокий аналіз механізму зношування електролітичного заліза.

При „жорстких” електричних режимах осадження заліза (з метою отримання більш мілкокристалічних осадів) на постійному струмі механічні властивості досягають граничного рівня, який приблизно відповідає рівню властивостей загартованої сталі 45 або 50 [4, 7].

Покращити механічні властивості відновлювального покриття можливо декількома шляхами. В роботі [8, 9] запропоновано відновлення деталей рухомого складу шаруватими покриттями на основі заліза. Розроблена нами технологія дозволяє отримувати електролітичні залісні покриття, властивості якого можна регулювати по товщині у широкому діапазоні. Покращення фізико-механічних властивостей покриття в цілому пов'язано з його шаруватою структурою при умові правильного підбору шарів. Отримувати шарувату структуру можливо різними способами, а саме за рахунок різних за складом електролітів та електричних режимів. Застосування першого варіанту, на нашу думку, є недоцільним в силу низки причин і тому в роботі не показані. Раціональним є отримання покриттів з різними за товщиною та властивостями шарами шляхом зміни електричних параметрів. В залежності від технічних та економічних можливостей ремонтного підприємства можна використовувати різні джерела струму. Одним з таких та відносно простих у виконанні є джерело асиметричного струму (рис. 1).

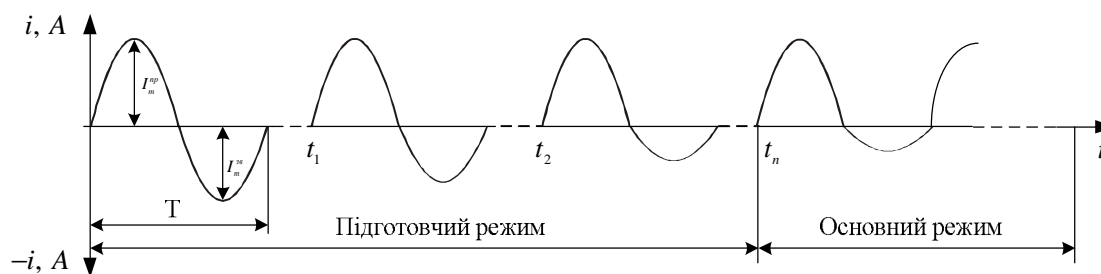


Рис. 1 – Часова діаграма асиметричного струму:  
 $I_m^{np}$ ,  $I_m^{zn}$  – максимальні значення прямого та зворотного струмів;  
 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  – моменти часу зміни катодно-анодного відношення

Регулювання структури по товщині при застосуванні асиметричного струму виконують змінюючи катодно-анодне відношення  $\beta = J_k / J_a$ , де  $J_k$ ,  $J_a$  – густина струму катодна та анодна відповідно. Підготовчий режим передбачає поступове збільшення значення  $\beta$  з метою отримання максимальної міцності зчеплення і триває до 15 хв. В основному режимі відбувається регулювання значення  $\beta$  в необхідному діапазоні. При наближенні  $\beta \rightarrow 1,1$  (в основному режимі не використовується) розміри блоків мозаїки найбільші, покриття м'які, зносостійкість низька. При наближенні  $\beta$  до 10 осад отримується мілкодисперсний, високонапружений, з високою мікротвердістю. Теоретично можна отримувати  $\beta$  більшу за 10, але такі покриття для експлуатації не придатні. Відношення  $\beta = 10$  на нашу думку, також використовувати не доцільно, крім умов, коли необхідно отримати поверхню з широко розвиненою мережею тріщин, наприклад, для утримання мастила. Проведені експерименти дозволили визначити (орієнтовно) залежність розмірів блоків мозаїки від значення  $\beta$  (рис. 2).

Як видно з рис. 1 величина  $\beta$  впливає на тонку структуру покриття в широких межах. Особливістю процесу є те, що у робочий (основний) період із заданою періодичністю система автоматики перемикає джерело напруги, змінюючи значення  $\beta$ , а також при необхідності перемикає з асиметричного на постійний струм та назад. Періодичність перемикань та зазначені вище параметри залежать від властивостей, якими повинні володіти відновлювальні шари.

Більш прогресивною і такою, що володіє більшими можливостями є установка програмного імпульсного електролізу. Установка дозволяє оператору задавати фактично будь-яку форму струму, у тому числі асиметричну, синусоїдальну, постійну, імпульсну; деякі форми наведені на рис. 3. Також установка дозволяє регулювати в широких межах параметри імпульсів такі, як максимальні значення прямого та зворотного імпульсів, їх тривалість, наявність (відсутність) та тривалість пауз. Регулюючи параметри імпульсів по заданій програмі в результаті отримували мікрочасти з різними властивостями. Тобто шари по товщині покриття відрізнялись розмірами блоків мозаїки, мікротвердістю, міцністю та інш. Також регулюванню піддавали і товщину шарів.

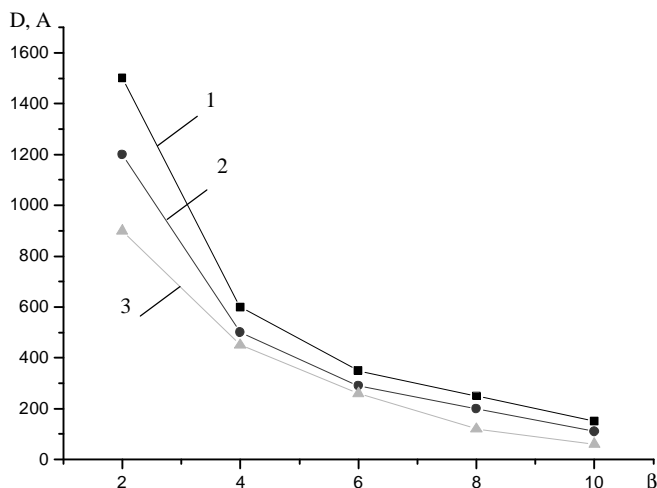


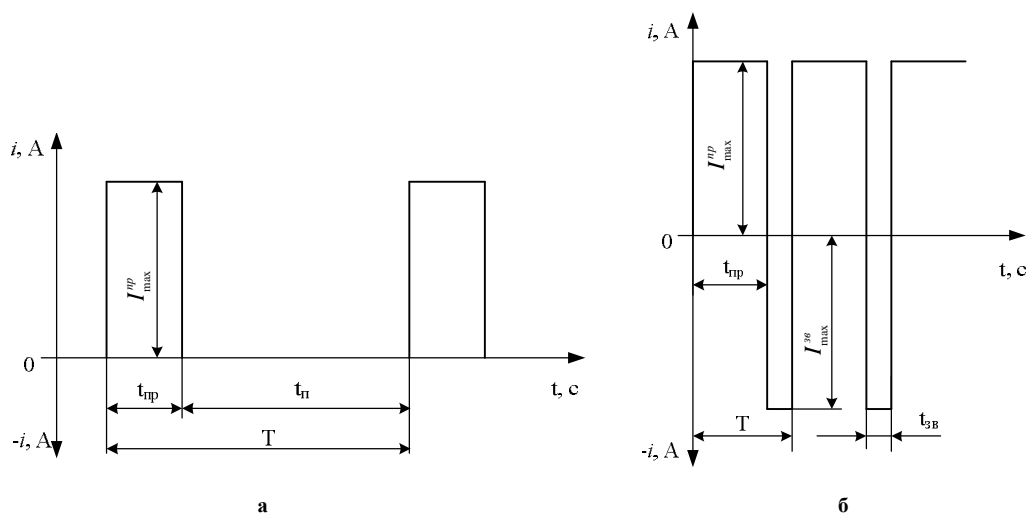
Рис. 2 – Залежність розмірів блоків мозаїки від значення  $\beta$  при катодних густинах струму:  
 1 –  $20 \text{ A/dm}^2$ ;  
 2 –  $30 \text{ A/dm}^2$ ;  
 3 –  $40 \text{ A/dm}^2$

Для визначення впливу шаруватої структури на зносостійкість покриття, експерименти проводили в два етапи. Покриття осаджували при певних режимах, створюючи групи з приблизно однаковими значеннями  $D$  в кожній групі. Після проведення експериментів результати об'єднували в масиви (табл. 1). На другому етапі планували експерименти для визначення впливу шаруватості на зносостійкість. Для цього варіювали розмірами блоків мозаїки, кількістю та товщиною шарів. Покриття наносили таким чином, щоб шари 1 та шари 2 будувались по товщині почергово. Експерименти проводили при сухому та граничному терті за стандартною методикою на машині тертя СМЦ-2; в даній роботі представлені результати дослідження зносостійкості шаруватого покриття при сухому терті. Результати експериментів порівнювали між собою та з покриттями, що мали суцільну (моношарову) структуру.

Таблиця 1

## Розміри блоків мозаїки у шарах покриття

Варіант режиму	Розмір блоків мозаїки шару 1 $D_1$ , Å	Розмір блоків мозаїки шару 2 $D_2$ , Å
1	700 ... 600	350 ... 300
2	1100 ... 900	350 ... 300
3	1800 ... 1500	350 ... 300
4	700 ... 600	1100 ... 900
5	700 ... 600	1800 ... 1500
6	1800 ... 1500	1100 ... 900



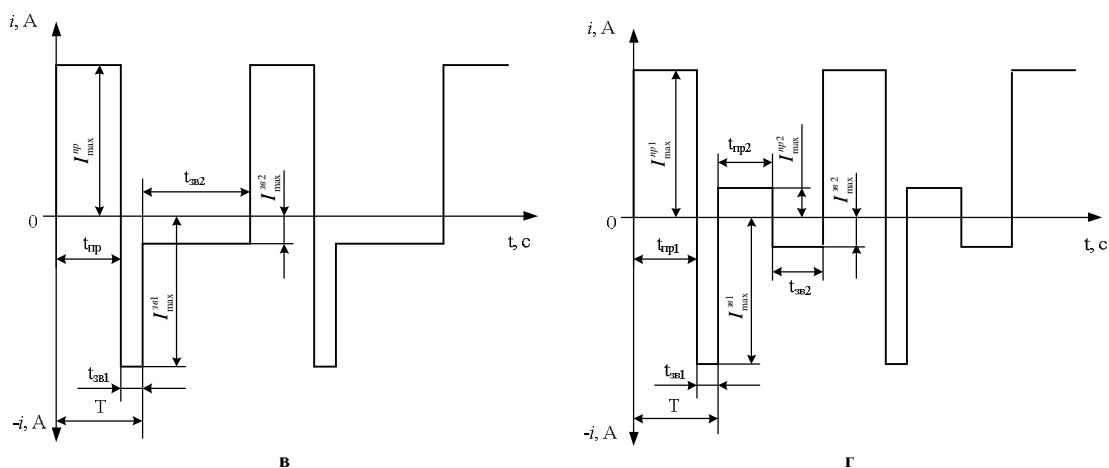


Рис. 3 – Часові діаграми струмів:  
 а – імпульсного уніполярного; б – імпульсного реверсованого;  
 в, г – імпульсного із псевдопаузами (термін автора)

Зробимо важливе зауваження. Шарувате покриття буде працездатним тільки за умови, якщо між шарами існує міцний зв'язок. Треба розуміти, що отримувані в результаті програмного електролізу шари не є відокремленими між собою, а межа, що виникає між шарами є границею, що розділяє різні за мікро-структурою шари і може умовно називатись міжфазною границею, яка також відіграє певну роль у зміцненні та підвищенні зносостійкості. Зазначена міжфазна границя не впливає на когезію покриття. І навпаки, якщо між шарами є границя, яка утворена під дією інших причин, наприклад, появи гідроксидів на поверхні, не розчинення пасивної плівки і т.д., то це є порушення технології, яка приводить до погіршення властивостей покриття або його браку. В розробленій технології, в наслідок дії зовсім іншої природи утворення шаруватості, зменшення когезії не спостерігалось.

В результаті проведених експериментів були побудовані залежності (рис. 4, 5).

Характер кривих (рис. 4) показує, що знос суттєво залежить від тонкої структури. Однак знаходження і застосування навіть оптимальних розмірів блоків мозаїки з точки зору зношення має свої обмеження. При терті, особливо при великих питомих навантаженнях, поверхневі шари покриття зміцнюються, при цьому збільшуються внутрішні напруження, які приводять до появи субмікротріщин, які розвиваються в мікро-, а в деяких випадках (при жорстких режимах тертя) і макротріщини, що приводить до швидкого зносу і руйнування шару заліза. З приводу зміцнення при терті поверхневих шарів існують протилежні думки: в роботі [4] йдеться про деформаційне зміцнення при питомому навантаженні 2,5 МПа і більше. Автор стверджує, що у поверхневому шарі деформаційні викривлення накладаються на електрокристалізаційні, а додаткове зміцнення у покритті від дії сил тертя приводить до зменшення зносу. У якості доказу висунутого припущення автор говорить про збільшення мікротвердості у зоні контакту [4]. Протилежна думка представлена в роботі [3], в якій стверджується, що в контакті відбувається знеміцнення та руйнування поверхні покриття. Враховуючи певні протиріччя в існуючих дослідженнях, можна зробити припущення, що зміцнення або знеміцнення залежить від умов тертя, у тому числі температурної складової. Якщо температура не перевищує деяку критичну, яка залежить від матеріалу покриття, то ймовірно відбувається процес зміцнення. Підвищений нагрів, навпаки створює умови для знеміцнення поверхневих шарів, інтенсивність зношування зростає, знос переходить у катастрофічний. Про це ж свідчать і літературні джерела [2 - 6]. Аналіз отриманих залежностей (рис. 4) свідчить про існування подібності характеру зносу від параметрів тонкої структури (рис. 4 а, б), хоча і містить певні відмінності. Деяко неочікуваними виявилися результати, які пов'язані з визначенням мінімального зносу в залежності від значень блоків мозаїки. Якщо при навантаженнях 1...2 МПа мінімальний знос знаходиться при розмірах блоків мозаїки 250...400 Å, то при збільшенні навантаження до 5 МПа розмір блоків мозаїки, при яких знос мінімальний, складає 400...600 Å. Тобто із збільшенням навантаження розмір блоків мозаїки з мінімальним зносом зміщується в сторону їх збільшення на деяку величину.

Отримані результати викликали сумнів, оскільки при збільшенні розмірів блоків мозаїки зменшується мікротвердість і знос мав би зростати. Можливо даний факт можна пояснити тим, що вигідне, з точки зору зносу, зростання блоків мозаїки не виходить за критичне для даного матеріалу та навантаження. Дійсно, подальше укрупнення блоків мозаїки приводить до зростання, а потім і значного зростання зносу (рис. 4). Температура в зоні контакту не перевищувала критичну й не перевищувала 393 К. І головне, аналіз поверхні тертя показав зменшення розмірів блоків мозаїки в зоні контакту майже до 300...400 Å. Отже це означає, що при виконанні певних умов при терті відбувається зміцнення, а можливі й самоорганізація субструктури в певних межах.

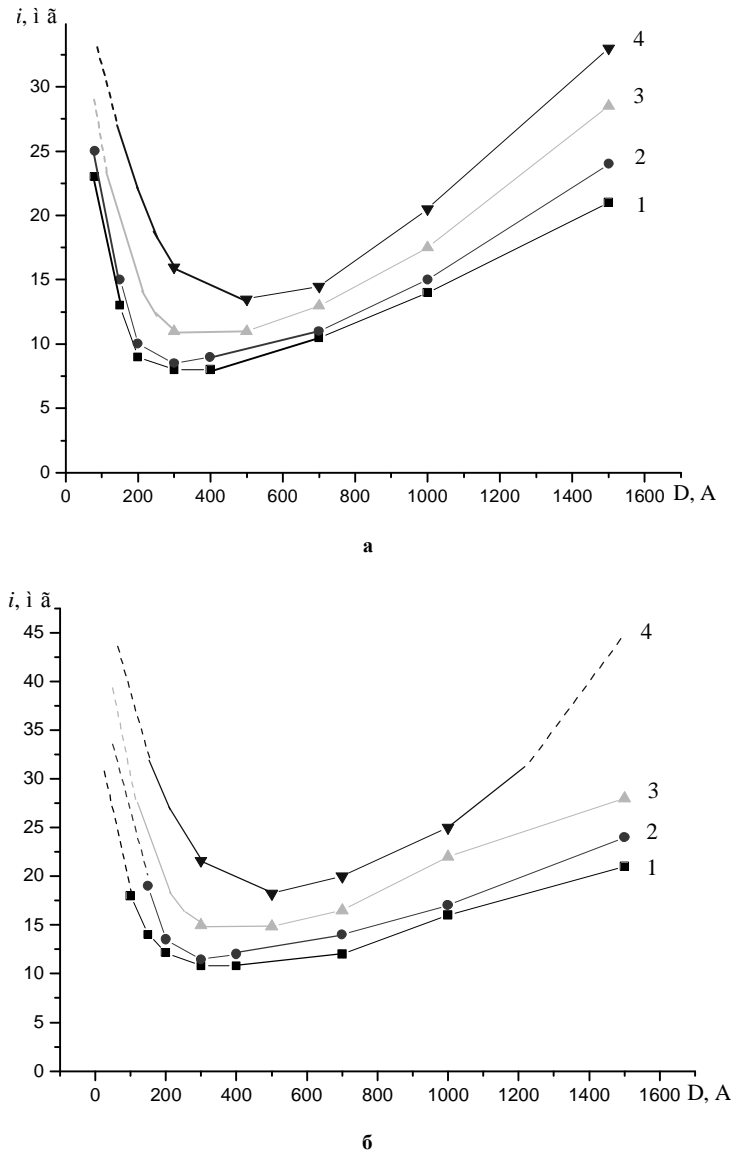
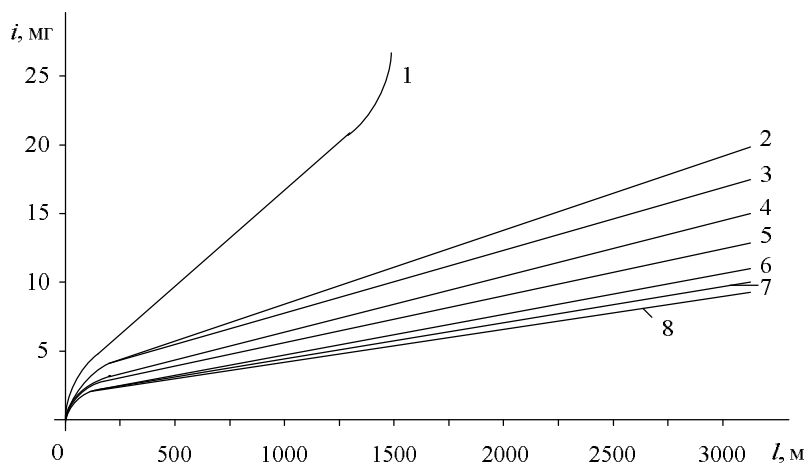


Рис. 4 – Залежність зносу електроосадженого заліза від розміру блоків мозаїки при питомому тиску:  
 1 – 1 МПа; 2 – 2 МПа;  
 3 – 3 МПа; 4 – 5 МПа;  
 а – контроль – сірий чавун;  
 б – контроль – сталь 45 загартована с.в.ч.  
 Пробіг ролика склав 3140 м

Можливо тому при збільшених блоках мозаїки поверхні (до тертя), певному навантаженні та умовах тертя відбувається поступове зменшення субзерен, яке супроводжується подрібненням мікроструктури та зміцненням контактної поверхні, що в підсумку приводить до зменшення зносу покриття. Одночасно, підвищення температури зразків приводило до зворотних результатів, що може свідчити на ефект знеміцнення покриття та його прискорене руйнування. У той же час, проведені нами експерименти при навантаженнях більших 5 МПа при сухому терті, показали, що використання покриттів з субзернами в поверхневому шарі більших за 700 ... 800 Å недоцільне, оскільки їх подальше зростання приводить до підвищення зносу. Також звертає на себе увагу асиметричність залежностей зносу від блоків мозаїки, яку можна пояснити різким окрихтуванням покриття при зменшенні розмірів блоків мозаїки, що супроводжується значним зростанням зносу. При збільшенні розмірів блоків мозаїки вище раціональної, покриття стає більш пластичним, зносостійкість зменшується, але швидкість збільшення зносу при цьому менша, ніж при їх зменшенні.

Застосування шаруватої будови покриття при певних геометричних співвідношеннях самих шарів та їх мікроструктур (перемежовування крупнокристалічних з мілкокристалічними) дозволяє підвищити зносостійкість всього покриття в цілому (рис. 5).



**Рис. 5 – Залежність зносу електроосадженого заліза при сухому терті від пробігу при питомому тиску 2 МПа. Контртіло – сталь 45 загартована с.в.ч.: 1 – Сталь 45 загартована с.в.ч.; 2 - 8 – шарувате покриття**

Зробимо пояснення стосовно рис. 5. Шаруваті покриття отримані при режимах (табл. 1) та співвідношеннях товщин шарів 1 та 2 –  $h_1/h_2$ : 2 – режим 3,  $h_1/h_2 = 3/1$ ; 3 – режим 3,  $h_1/h_2 = 2/1$ ; 4 – режим 2,  $h_1/h_2 = 3/1$  та режим 1 з  $h_1/h_2 = 1/1$ ; 5 – режим 2,  $h_1/h_2 = 1/1$ ; 6 – режим 1,  $h_1/h_2 = 2/1$ ; 7 – режим 1,  $h_1/h_2 = 3/1$  та режим 3 з  $h_1/h_2 = 1/1$ ; 8 – режим 2,  $h_1/h_2 = 2/1$ . Інші співвідношення товщин та режимів на рис. 5 не наведені, оскільки мають гірші результати й інтересу не представляють.

Механізм зношування та підвищення зносостійкості шаруватого покриття, на нашу думку, можна пояснити таким чином. Шари з мілкокристалічною структурою найбільш напружені, мають високу мікротвердість, міцність, опір зсуву. При цьому вони мають низьку пластичність та схильні до окрихтування. Шари з крупнокристалічною структурою мають протилежні властивості: меншу мікротвердість, міцність, але при цьому вони більш пластичні, з меншими внутрішніми напруженнями. Особливістю комбінації шарів з різною мікроструктурою є здатність часткової релаксації внутрішніх напружень за рахунок їх перерозподілу між більш пружними та більш пластичними шарами. Спосіб отримання електролітичного залізнення обумовлює його максимальну наклепаність, а дефекти структури знаходяться у пасивному стані, що у значній мірі зменшує його пластичність. У той же час вказана особливість електролітичного заліза приводить до максимального зміцнення та зносостійкості [3]. Не піддаючи сумніву означені основні положення, зупинимось на деяких суперечностях. Подрібнення мікроструктури, наприклад створенням жорстких умов електролізу, приводить до підвищення міцності. Як відомо, про збільшення міцності свідчить зростання мікротвердості [10]. Таким чином, якщо прагнути до максимально можливого зміцнення покриття, то і мікротвердість при цьому має бути максимально можливою, але це суперечить доведеному дослідниками факту існування оптимальної мікротвердості, яка є менша за максимально можливу [3, 5, 6]. Крім того, не викликає сумніву, що зносостійкий електролітичний матеріал повинен поєднувати в собі і високу міцність і достатню пластичність. Для досягнення цього існують різні методи, наприклад, створення дисперсійно зміцненого матеріалу, де в пластичній матриці знаходяться високоміцні включення. Іншим по своїй будові і складу є по чергове нанесення умовно міцних і пластичних шарів. В більш міцних шарах створені в процесі кристалізації дислокації мають малу рухливість, однак під час тертя в поверхневих шарах починається перерозподіл та перебудова дефектів, що особливо активується при збільшенні температури в зоні контакту. При шаруватій будові структури покриття, утворені границі розділу забезпечують додатковий опір руху дислокацій, що є важливим для підвищення зносостійкості. Крім того, на нашу думку, помилково вважати, що на знос впливає лише поверхневий шар. Аналіз взаємодії третьових поверхонь показує, що із зростанням жорсткості умов тертя (підвищення питомого тиску, збільшення швидкості відносного руху, погіршення умов змащування та інш.) збільшується глибина розповсюдження пружних деформацій на підповерхневі шари. У свою чергу, напружено-деформований стан разом із тонкою структурою впливають на зносостійкість та інші механічні властивості всього покриття. Тертя супроводжується підвищенням густини дислокацій в зоні контакту поверхонь. В той же час, як відомо, зношування поверхневих шарів при терті залежить від співвідношення нормальної та тангенціальної складових навантажень. Також відомо, що швидкість руху дислокацій є функцією напруження зсуву, значить у приповерхневих шарах поверхні швидкість руху дислокацій може

суттєво перевищувати швидкість їх руху в об'ємі матеріалу. При контактній взаємодії саме наявність, рух, швидкість руху та взаємне розташування дислокацій у кристалічній решітці визначає механізм пластичної деформації шарів і призводить до певних особливостей механізму тертя та зносу електролітичних покриттів. Це пов'язано з тим, що пластична деформація має дислокаційну природу і є наслідком контактної взаємодії поверхонь. Ступінь пластичної деформації залежить від руху дислокацій в певних кристалографічних площинах і напрямках; причому, напрямок руху дислокацій змінюється на протилежний при зміні знаку навантажень, тобто виникає ефект зворотності, пов'язаний з ефектом Баушенгера, величина якого залежить від амплітуди деформації [11]. Зміна напрямків руху дислокацій (особливо багатократна) приводить до зародження точкових дефектів типу вакансій, які створюючи мікропорожнини, сприяють появі і розвитку мікротріщин. Окрім умов тертя та термічної обробки деталей, на швидкість руху дислокацій і пов'язаного з ним розвитку мікропошкоджень впливає структура матеріалу [11, 13, 14]. Таким чином, необхідно створити умови, за яких при високій щільності дислокацій їх рух буде обмежений. Досягти даної мети можна декількома способами. Одним із факторів, що перешкоджають вільному виходу дислокацій на поверхню, можуть бути різні тверді поверхневі шари кристалу: окисні чи гідроокисні або металеві плівки, тощо. Одряду зауважимо, що необхідно запобігати створенню окисних та гідроокисних прошарків в електролітичному залізному покритті, оскільки це може значно погіршити адгезійні зв'язки між основою та покриттям та між шарами. Також помітно посилити опір виходу дислокацій може відмінність параметрів ґратки та підложки, різний характер кристалічної структури шарів, причому важливим є той факт, що із збільшенням модуля пружності плівок зростає опір виходу дислокацій [12 - 14]. Із наведеного вище витікає, що регулювання структури шарів дозволяє створювати потенціальні бар'єри на шляху руху дислокацій, збільшувати напруження тертя дислокацій, що приводить до гальмування їх руху.

На основі аналізу зміни дислокаційної структури при зовнішньому терті можна припустити, що сила тертя пов'язана зі змінами дислокаційної структури, які виникають на поверхнях тертя. При цьому зовнішня робота при терті відповідає внутрішній роботі по зміні дислокаційної структури. Таким чином, роботу тертя деталей можна частково перевести в роботу взаємодії шарів. У той же час зауважимо, що однозначних оцінок і залежностей тертя від дислокаційної структури на даний час немає, що пояснюється неможливістю точного експериментального визначення істинної густини дислокацій в момент контактної взаємодії [12]. Однозначно можна лише зазначити, що при терті затрати енергії визначаються не тільки дислокаційними процесами в поверхневих шарах, а зона пластичної деформації не обмежується поверхневими нерівностями та поширюється вглиб покриття [12, 14].

Також покращення механічних властивостей, у тому числі, зносостійкості багатошарової структури застосуванням пластичних, в'язких шарів можна пояснити так: в процесі тертя з часом зароджуються тріщини на рівні субструктури, збільшуються до рівня зерна, після чого продовжують зростати. Збільшення та розповсюдження мережі тріщин приводить до викривлення спочатку окремих ділянок поверхні, а потім і значного зростання величини зносу всієї поверхні. З деякою певністю можна припустити, що «м'які» пластичні шари в деякій мірі гальмують розвиток мікротріщин у в'язкому середовищі пластичного шару.

Враховуючи наведене вище, необхідно зазначити наступне. Шарувата структура, при певних параметричних співвідношеннях шарів, дозволяє підвищити зносостійкість у порівнянні з моношарами. Однак отримання переваг від використання шаруватої будови покриття можливе лише при раціональному співвідношенні товщини та властивостей окремих шарів. Так, можна зазначити наступне: товщина шарів має прагнути до нуля (теоретично), а фактично має бути можливо мінімальною. Не дивлячись на деякі технологічні труднощі отримання необхідної товщини шарів та дисперсності осадів на експериментальній стадії осадження електролітичних залізних шарів, було виявлено, що осадити на поверхні підложки суцільний шар товщиною на рівні блоків фактично не представляється можливим, але вже при товщині 0,7...0,9 мкм на поверхні утворюється суцільна мікроплівка шару заліза за виключенням пор, що утворюються при осадженні металу. Зрозуміло, що отримати чітко задані структурні та геометричні параметри шарів вдавалось з певним розкидом (до 20 %), що можна пояснити нестационарністю процесу електролізу, але в цілому, після відпрацювання режимів, шари покриття отримували з очікуваними параметрами та властивостями. На підставі експериментів (рис. 5) можна зробити висновок, що співвідношення товщин шарів залежить від співвідношення розмірів блоків мозаїки. Так, для збільшення зносостійкості всього покриття при нанесенні осаду за режимом 1 (табл. 1) товщина шару 1 повинна бути приблизно в три рази більша товщини шару 2; при режимі 2 співвідношення їх товщин повинно складати 2/1; при виконанні режиму 3 товщини шарів 1 та 2 повинні бути приблизно однаковими. Крім того, нами було помічено, що зменшення блоків мозаїки навіть до 150 ... 200 Å у окремих шарах при шаруватій будові покриття, особливо, якщо їх оточують шари з блоками мозаїки 1500 ... 1800 Å, не приводить до катастрофічної руйнації осаду, а загальна зносостійкість всього покриття зростає. Також цікавим є те, що при проведенні експериментів спочатку для спрощення осаджували шари з різними розмірами блоків мозаїки, але майже з однаковими товщинами шарів і при цьому отримували зносостійкість вище, ніж моношарів з тими ж блоками мозаїки. Однак зауважимо, що при цьому товщини шарів були мінімально

можливими, а результати випробувань на зносостійкість були гірші, ніж ті, що отримані при вказаних вище співвідношеннях шарів з урахуванням параметрів їх тонкої структури. Збільшення співвідношень товщин шарів більш вказаних вище приводило до погіршення зносостійкості, що фактично нівелювало переваги шаруватої структури покриття.

### Висновки

Встановлено, що мінімальному зносу електролітичного заліза відповідає певний розмір блоків мозаїки, який не є єдиним, а залежить від навантаження і коливається в межах від 250 до 700 Å. Також встановлені раціональні співвідношення товщин шарів покриття в залежності від їх тонкої структури, при цьому покриття будується з мікрошарів. Зроблено припущення, що шаруваті електролітичні покриття дозволяють стримувати зростання, вільне переміщення та об'єднання дефектів і таким чином значно зменшити зношення деталей. Показано, що шарувата структура електролітичного залізного покриття дозволяє підвищити зносостійкість до 1,16 разів у порівнянні з моношарами. Таким чином, розроблена технологія нанесення «програмного» покриття дає можливість покращити механічні властивості відновлених деталей, підвищити їх зносостійкість та ресурс.

### Література

1. Гологан В.Ф. Повышение долговечности деталей машин износостойкими покрытиями / Гологан В.Ф., Аждер В.В., Жавгурияну В.Н. – Кишинев: Штиинца, 1979. – 117 с.
2. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 237 с.
3. Петров Ю.Н. Электролитическое осаждение железа. / Ю.Н. Петров, Г.В. Гурьянов, Ж.И. Бобанова, С.П. Сидельникова, Л.Н. Андреева. – Кишинев: Штиинца, 1990. – 195 с.
4. Закиров Ш.З. Упрочнение деталей электроосаждением железа. – Душанбе: Изд-во «Ирфон», 1978. – 208 с.
5. Шадричев В.А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями. – М.-Л.: Машгиз, 1962. – 296 с.
6. Швецов А.Н. Основы восстановления деталей осталиванием / Западносибирское книжное издательство, Омское отделение. – 1973. – 143 с.
7. Мелков М.П. Электролитическое наращивание деталей машин твердым железом / Приволжское книжное издательство, Саратов. – 1964. – 204 с.
8. Артемчук В.В., Костін М.О. Електролітичне залізнення – ефективна ресурсозберігаюча технологія відновлення зношених деталей рухомого складу // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2004. – Випуск 8 (78). – С. 11-16.
9. Артемчук В.В. Розробка технології відновлення зношених деталей рухомого складу шаруватими покриттями // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Випуск 11. – С. 92-94.
10. Методы испытания на микротвердость. Приборы. М.: Наука, 1966. – 263 с.
11. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.
12. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
13. Котрелл А. Теория дислокаций. – М.: Мир, 1969. – 99 с.
14. Фридель М. Дислокации. – М.: Мир, 1967. – 626 с.

Надійшла 04.01.2012