

## МІЦНІСТЬ З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ГАРАНТОВАНИМ НАТЯГОМ, ВІДНОВЛЕНИХ ШАРОВИМИ ПОКРИТТЯМИ

У статті викладено результати експериментальних досліджень міцності з'єднання з гарантованим натягом деталей, відновлених електролітичними шаруватими покриттями програмним електролізом. Проведено порівняльний аналіз структури відновлювального шару та міцності нерухомого з'єднання, зразки яких були відновлені за розробленою технологією зі зразками, відновленими на постійному струмі, а також не відновленими взагалі.

В статье описаны результаты экспериментальных исследований прочности соединений с гарантированным натягом деталей, восстановленных электролитическими слоистыми покрытиями программным электролизом. Проведен сравнительный анализ структуры восстановленного слоя и прочности неподвижного соединения, образцы которых были восстановлены по разработанной технологии с образцами, восстановленными на постоянном токе, а также не восстановленных вообще.

The article deals with description of the results of experimental studies of strength of joints with guaranteed tightness for details restored with electrolytic layered coatings by means of programmed electrolysis. The comparative analysis of restored layer structure and strength of stationary joint, which samples were restored according to the technology developed, with the samples restored with direct current and the ones not restored at all is conducted.

Серед відомих з'єднань деталей широке застосування знайшло з'єднання з гарантованим натягом. Цей вид з'єднання займає достойне місце завдяки простоті конструкції та високій експлуатаційній надійності, що дозволяє вузлам працювати у важких динамічних умовах. На рухомому складі залізниць України такі з'єднання використовують у системі «шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника», а також посадки підшипників або зубчатої шестерні на вали електричних машин.

На міцність пресового з'єднання впливає багато чинників, серед яких: величина натягу, точність геометрії форм спряжених деталей, площа фактичного контакту, шорсткість спряжених поверхонь, матеріал деталей. Зрозуміло, що при відхиленнях від заданих форм міцність розгляданого з'єднання зменшується, при критичних динамічних навантаженнях може виникати «зрив» з початкового положення охоплюючої деталі, що, у свою чергу, може призвести до аварійних ситуацій. Правильність геометричних форм спряжених деталей залежить від різних експлуатаційних та технологічних факторів (величини та характеру навантаження вузла, точності та якості виготовлення нових деталей спряження, технологічних операцій ремонту вузла тощо). Розглянемо деякі з них. В процесі експлуатації буксовий вузол є одним з найбільш навантажених вузлів рухомого складу і сприймає різноманітні по напрямку і силі, у тому числі й ударні, навантаження.

Експлуатаційний знос має місце внаслідок того, що буксовий вузол під час руху електровоза практично постійно знаходиться в умовах вібраційно-коливальних переміщень. В дослідженнях [1] вивчено явища, що призводять до коливального переміщення кільця підшипника. Встановлено, що під впливом вертикально прикладених навантажень кільце пружно деформується, за рахунок чого в навантаженій зоні воно щільно прилягає до шийки осі, а в ненавантаженій – умовно набуває провису. Спочатку зміна геометрії, розмірів і мікрорельєфу виникає від розпаду надлишкової кількості аустеніту в загартованій підшипниковій сталі та зім'яття нерівностей поверхні осі. Далі вступає в дію корозія двох різновидів. Один з цих різновидів, що спостерігається на сполучених металевих поверхнях, характеризується збільшенням зносу третьої пари. Цей процес починається з ушкодження корозією поверхневого шару металу при роботі або, особливо, у період простою. Потім під впливом тертя продукти корозії, що утворилися, безупинно зчищуються з ушкоджених поверхонь. При цьому, якщо ці продукти мають абразивні властивості, то вони можуть зішліфувати і деякий шар металу, зрівнюючи таким чином невеликі корозійні поглиблення, що з'являються. Зношення деталей, що виникає за таких умов, називається корозійним або корозійно-абразивним.

Проте, на нашу думку, у парі «колісна вісь – внутрішнє кільце підшипника» у більшому

ступені діє другий різновид корозії, названий фретинг-корозією, сліди якої чітко були помітні при огляді.

Цей вид корозії характеризується значною швидкістю поширення і наростаючою інтенсивністю, а також утворенням продуктів корозії, відмінних за складом і твердістю від продуктів інших видів корозії (наприклад, електрохімічної). Тому фретинг-корозія супроводжується появою на поверхнях, що контактують, темно-бурих або червоних окислів заліза. Аналіз слідів фретинг-корозії внутрішніх кілець підшипників і осей колісних пар показує, що ці сліди мають різноманітну форму і розміри і пов'язані, мабуть, із відхиленнями від правильної геометричної форми контактних поверхонь, тобто обумовлені конусністю і овальністю.

Контактні поверхні металів під впливом високих навантажень і переміщень (на малу величину або коливальних переміщень) зазнають великих пластичних деформацій і внаслідок чого активуються, що сприяє їх покриттю оксидними плівками різноманітної товщини. Ці плівки є більш крихкі, ніж основний метал і при наступних деформаціях руйнуються і відшаровуються. По суті вони є абразивом і тому, знаходячись у зоні тертя, сильно сприяють руйнації поверхні металів пари тертя. Крім того, виявлені нітриди металів також роблять суттєвий вплив при високих навантаженнях на спряжені поверхні, що вібрують, якими є елементи букси. Ушкодження фретинг-корозією призводять до зміни геометричних розмірів, порушенню точності спряження поверхонь, а також до зниження міцності натягу деталей.

В буксах із роликівими підшипниками ушкодження фретинг-корозією спостерігаються на поверхні контакту шийок осей із внутрішніми кільцями підшипників (при гарячій посадці) або з чопами (при втулковій посадці) і на поверхні контакту корпусів букс із зовнішніми кільцями підшипників.

Як показали наші дослідження, інтенсивність ушкодження фретинг-корозією шийок осей та внутрішніх кілець підшипників на ділянках розташування переднього і заднього підшипників неоднакова: ділянка осі біля заднього підшипника пошкоджується інтенсивніше, ніж під переднім. Можливо це пов'язано з тим, що деформації вигину в зоні розташування заднього підшипника є більшими, ніж у переднього. Також помічено, що в буксах, обладнаних сферичними підшипниками, такі ушкодження більш інтенсивні, ніж в буксах із циліндричними підшипниками. Це можна пояснити тим, що

перші мають більшу свободу для переміщення, чим інші, і здатні викликати більше коливальне переміщення в зонах посадкових поверхонь.

Границі коливальних переміщень, здатних викликати фретинг-корозію, лежать від долей мікрона до 1 мм. При цьому, чим більше амплітуда таких переміщень, тим інтенсивніше фретинг-корозія.

Вплив навантаження як фізико-механічного фактора має величезне значення і тісно пов'язане з амплітудою коливань. В міру підвищення навантажень, що сприяють збільшенню амплітуди переміщень сполучених поверхонь, інтенсивність ушкоджень фретинг-корозією зростає [1].

Технологічний знос виникає за рахунок операцій, пов'язаних з ремонтом відповідних вузлів при розпресуванні та запресуванні охоплюючої деталі, а також при усуненні шліфуванням овальності, конусності, короблення, а також слідів фретинг-корозії, ризок і т. ін.

Таким чином, наведені вище фактори приводять до зменшення міцності пресового з'єднання, що значною мірою може впливати на надійність експлуатації вузлів та безпеку руху рухомого складу. Для запобігання виникнення вказаних негативних чинників необхідно вживати попередніх заходів.

Оскільки підбір підшипника до осі колісної пари за розміром може бути довгим і трудомістким, а заміна вала в електричній машині – також трудомісткий та економічно дорогий процес, тому виникає необхідність відновлення натягу нерухомого з'єднання іншими шляхами.

На даний час існує багато різноманітних ресурсозберігаючих технологій відновлення поверхонь спряження. Однією з розповсюджених є гальванічне осадження металів на поверхні деталей спряження. Але ця технологія розвинута для осадження покриттів з моношару. Значно розширюють можливості технології відновлення деталей використання багат шарових покриттів з наперед заданими властивостями. Таке стосується й інших поширених методів відновлення деталей, а саме наплавлення та газотермічного напилення. З точки зору економіки та порівнюючи переваги та недоліки вказаних технологій, на нашу думку, для відновлення натягу деталей вибір доцільно зробити на користь гальванічних методів.

Міцність пресових з'єднань залежить від сполучення матеріалів деталей, а також від їх механічних характеристик, величини натягу та режимів технологічної обробки. Експеримента-

льні дані дозволяють вибрати матеріал, підібрати режими роботи відновлювальної установки.

Відновлювальний матеріал повинен відповідати деяким вимогам, а саме: міцність нерухомого з'єднання відповідати нормативній документації; можливість осаджувати покриття за загальною товщиною до 200 мкм; протистояти задирам і іншим можливим механічним пошкодженням при технологічних операціях (розпресуванні), зносу та корозії [2].

З молекулярно-механічної теорії тертя відомо, що умовами відсутності глибинного виривання є збільшення міцності в глибину тіла від поверхні дотикання, повинна зберігатися задана величина входження одного металу в інший, яка не створює умови для інтенсивного руйнування в результаті деформацій від втоми. Необхідно, щоб при осьовому чи круговому зсувах однієї деталі відносно іншої створювався високий коефіцієнт тертя зчеплення, а пари тертя слід підбирати за величиною сил тертя.

Забезпечення міцності пресових з'єднань можливе, якщо сумарна сила тертя контактуючих спряжених поверхонь буде більше осьової сили, що діє на пресове з'єднання:  $P < F$ .

Силу тертя визначимо за формулою

$$F = pfS_{\text{фк}},$$

де  $p$  – питомий тиск;

$f$  – коефіцієнт тертя;

$S_{\text{фк}}$  – фактична площа контакту.

У момент зриву (зсуву) величина осьового навантаження більше або дорівнює загальній силі тертя:  $P_3 \geq F$ .

Із наведених виразів видно, що сила тертя залежить від питомого тиску  $p$ , коефіцієнту тертя  $f$  та площі контакту спряження  $S_{\text{фк}}$ . Питомий тиск залежить  $p$  від величини натягу, від статичних і динамічних навантажень, а також від контактної площі. Величина натягу визначається нормативною документацією, тобто впливати на силу тертя через питомий тиск не є можливим. На коефіцієнт тертя  $f$  можна впливати головним чином за рахунок контактуючого матеріалу, чистоти обробки спряжених поверхонь та наявності проміжних відновлюючих шарів. Контактна площа залежить від геометричних розмірів спряжених деталей, питомого тиску, шорсткості та матеріалів, що контактують. Фактична площа складає певну частину геометричної площі контактного тиску  $S_{\text{гк}} = 2\pi rl$ .

Аналізуючи вищевказане, можна зробити висновок, що найбільш ефективними факторами впливу на силу тертя при заданій величині натягу є контактний матеріал та чистота обробки спряжених поверхонь. Ці фактори впливають і на контактну площу (фактичну), і на коефіцієнт тертя, що у свою чергу, дає можливість збільшити несучу здатність пресового з'єднання.

В роботі [3] були порівняні різні матеріали: нікель, хром, мідь, цинк та олово. Але нанесення покриття відбувалось моношаром, що в деякій мірі обмежує можливості, особливо при нанесенні відносно товстого відновлювального шару. Нами було досліджено відновлення натягу за допомогою вказаних матеріалів, а також електролітичного заліза при стаціонарних режимах та програмному електролізу.

Гальванічні покриття осаджували на зразки у формі валиків діаметром 30 мм довжиною поверхонь спряження 50 мм з натягом пресового з'єднання 35 мкм. Для визначення міцності з'єднання виконували розпресовку зразків та порівнювали їх зусилля. Для цього було виготовлено 10 комплектів зразків вищезазначених розмірів, які підлягали покриттю різними металами (товщиною 35...40 мкм), а також зразки без покриття. Метою експериментальних досліджень було проведення порівняльного аналізу комбінації нанесених матеріалів покриттів та режимів за декількома показниками. При плануванні експериментів враховувались результати попередніх досліджень науковців [4, 5]. В роботі [4] наведені середні значення коефіцієнтів тертя покриттів при розпресуванні: хромування 0,82; нікелювання 0,73; міднення 0,48; кадмування 0,43; цинкування 0,53; без покриття 0,18. Заслужує уваги високий коефіцієнт тертя хромування та нікелювання.

При нанесенні покриттів режими підбирали таким чином, щоб ці покриття мали шарувату структуру, причому шари мали різну мікротвердість. Це здійснювалось за допомогою електричних режимів, змінюючи діючі значення та тривалість прямого і зворотного імпульсів. За даними експериментальних досліджень було отримано залежності зусилля розпресовки від натягу пресового з'єднання (рис. 1). Середнє значення сили розпресовки при значенні натягу  $\delta = 35$  мкм для кожного виду зразків наведено у табл. 1.

Як видно із графіків та табл. 1, найбільше значення сили розпресування з'єднань належить покриттю із шаруватого хрому. Можливо,

таке можна пояснити високим коефіцієнтом тертя даного матеріалу.

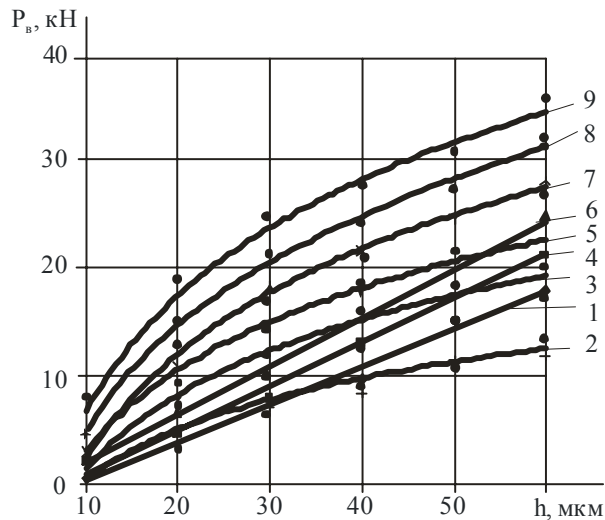


Рис.1. Розпресовочні характеристики пресових з'єднань без покриття – 1 та з електролітичними покриттями: оловом – 2, шаруватим залізом – 3, міддю – 4, цинком, осадженим постійним струмом – 5, нікелем – 6, шаруватим цинком з підшарком заліза – 7, шаруватим цинком, осадженим програмно – 8, шаруватим хромом – 9

Однак дослідження показали, що при розпресуванні зразків, на контактуючих поверхнях з покриттями міді, нікелю й особливо хромом мали місце задири, вириви металу, тобто ті пошкодження, які призводять до підвищеного технологічного зношення. Крім того, треба враховувати, що хромування, нікелювання та міднення – це катодні покриття, які створюють на поверхні металу розтягуючі залишкові напруження, а це, у свою чергу, знижує міцність втоми охоплених деталей. Тому, на наш погляд, серед вказаних покриттів є доцільним використання хромових покриттів за умови, якщо спряжені деталі не будуть розпресовуватись. Якщо деталі в подальшому будуть розпресовуватись, то має сенс використовувати програмний електроліз з нанесенням шаруватого цинку або комбінації: залізнення – цинкування. Такий підхід підтверджується результатами досліджень – після розпресування охоплені деталі не мали пошкоджень, що є дуже важливим з точки зору технології ремонту. При посадці валика з м'яким гальванічним покриттям (міддю, цинком, оловом) в охоплюючу деталь, за рахунок пластичної деформації металу, в зоні контакту виникають міцні металічні зв'язки та збільшується площа фактичного контакту. Застосування таких матеріалів у пресових з'єднаннях не знижує міцності від втоми основної деталі за рахунок низької межі плинності м'якого мета-

лу. Цинк відноситься до групи анодних покриттів, які створюють на поверхні металу стискуючі залишкові напруження, що позитивно впливає на основний метал деталі, тобто міцність втоми практично не зменшується.

Таблиця 1

**Значення сили розпресовки пресових з'єднань з різними покриттями**

Вид покриття	Сила розпресовки $P_v$ , кН	Порівняльна міцність з'єднань, в. о.
Без покриття	9,4	1
Олово	8,7	0,93
Шарувате залізо	11,2	1,19
Мідь	13	1,38
Цинк на постійному струмі	14,1	1,5
Нікель	16,7	1,78
Шаруватий цинк з підшарком заліза	20,1	2,1
Шаруватий цинк програмний	23	2,44
Шаруватий хром	26,2	2,79

Для деталей з твердим гальванічним покриттям (нікелем та хромом) та без нього характерним є пружно-пластичні деформації зі слабовираженою пластичністю (спостерігається пропорційна залежність зростання міцності пресового з'єднання від натягу). Розпресовочні характеристики зразків з мідним покриттям відображають характерні пружно-пластичні деформації, а пресові з'єднання з покриттям цинку та олова – пластичні. Дослідження зони контакту з'єднання з м'яким гальванічним покриттям на металографічному мікроскопі дозволили встановити, що пластичні деформації відбуваються у самому покритті.

Підвищення міцності пресових з'єднань з програмним шаруватим цинковим гальванічним покриттям у порівнянні з цинком, осадженим на постійному струмі можна пояснити більш дрібнозернистою структурою окремих шарів (розміри зерен цинку складають 0,7...0,8 мкм проти 15...16 мкм на постійному струмі), більшою щільністю (розміри блоків мозаїки дорівнюють 40...50 нм проти 500 нм на постійному струмі). Результатом цього є збіль-

шення мікротвердості осаджених шарів до  $H_{\mu} = 1550 \dots 1600$  МПа (на постійному струмі  $H_{\mu} = 700 \dots 750$  МПа). Чередування м'яких та більш твердих шарів дозволяють розподіляти внутрішні напруження, що виникають у покритті між шарами, отримувати високу міцність зчеплення, більший коефіцієнт тертя, у 2...2,5 рази підвищити силу розпресовки, а також значно покращити корозійну стійкість спряжених деталей пресових з'єднань.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Геніч, Б. А. Предотвращение фреттинг-корозии в буксах с роликовыми подшипниками [Текст] / Б. А. Геніч, В. Г. Кузнецов, Б. З. Акбашев // Тр. ВНИИЖТа. – 1959. – Вып. 171. – С. 67-74.

2. Инструкция по содержанию и ремонту узлов с подшипниками качения локомотивов и моторвагонного подвижного состава [Текст]. – М.: Транспорт, 1980. – 129 с.
3. Михаліченко, П. Є. Відновлення натягу пресового з'єднання буксових вузлів рухомого складу залізниць [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Залізн. трансп. України, 2004. – № 5. – С. 47-49.
4. Лукашевич, Г. И. Прочность прессовых соединений с гальваническими покрытиями [Текст] / Г. И. Лукашевич. – К.: Гостехиздат УССР, 1961. – 59 с.
5. Ильин, В. А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание [Текст] / В. А. Ильин. – Л.: Машиностроение, 1983. – 86 с.

Надійшла до редколегії 23.06.2008.