

НОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ І ПІДЙОМНИХ МАШИН ВІД ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

Тарельник В.Б., Думанчук М.Ю., Тарельник Н.В., Мікуліна М.О.
Сумський національний аграрний університет

Анотація. Розглянуто питання забезпечення надійності та довговічності підйомних, транспортних та дорожньо-будівельних машин шляхом підвищення фретингостійкості різних типів з'єднань деталей. Запропоновано низку конструктивних та технологічних методів для боротьби з фретинговим зношуванням. На базі проведених експериментальних досліджень надано рекомендації щодо технологій підвищення фретингостійкості з'єднань деталей.

Ключові слова: фретинг-корозія, зношування, електроіскрове легування, епіламування, металоплакування.

Вступ

У процесі роботи окремі поверхні деталей транспортних і підйомних машин (ТіПМ): автомобілів, конвеєрів, кранів, ліфтів, літаків і т.п. – піддаються фретинговому зношуванню – руйнуванню, що виявляється в сильно інтенсифікованому окисленні або схоплюванні. Фретингове зношування (ФЗ) виникає в різьбових, шпонкових і шпифтових з'єднаннях, посадках деталей з натягом та ін. [1].

Необхідні для протікання процесу ФЗ відносні мікросуви з'єднаних поверхонь, відбуваються внаслідок деформацій деталей в умовах навантаження і вібрацій, які супроводжують роботу ТіПМ. Інтенсивність зношування зростає під час роботи деталей в агресивних середовищах. У цьому випадку пошкодження з'єднаних поверхонь відбувається в умовах фретинг-корозії (Ф-К), що, як правило, протікає за умови їхніх незначних коливальних відносних переміщеннях [2].

Пошкодження поверхонь деталей ТіПМ від ФЗ супроводжується виникненням концентраторів напружень, зміною механічних властивостей елементів конструкції, зниженням межі витривалості, ослабленням посадок з натягом і зростанням вібрацій, що призводить як до поломки окремих елементів, так і до більш суттєвих руйнувань і може бути причиною серйозних аварій.

Отже, вивчення проблем ФЗ і дослідження причин його виникнення є актуальним завданням, що вимагає вчасного вирішення.

Аналіз публікацій

Згідно з [3] потенціал працездатності дорожньо-будівельних машин (ДБМ) значною мірою залежить від надійності та ефективності їхніх вузлів тертя. Ресурс роботи малору-

хомих вузлів і механізмів машин пов'язаний здебільшого з передчасним їхнім зношуванням у результаті розвитку Ф-К у зоні трибоконтакту. Зношування сполучених деталей в умовах Ф-К є поширеним видом зношування в конструкціях ДБМ і супроводжує роботу багатьох контактних з'єднань [4]. Найчастіше Ф-К розвивається за умови різних пресових посадок на обертових валах, у шпонкових, шпильових, болтових, гвинтових з'єднаннях; у підшипниках кочення, на контактних поверхнях ресор, у з'єднувальних муфтах, на поверхнях запобіжних клапанів і регуляторів, електричних контактів, кулачкових і шарнірних механізмах.

Відомо, що внаслідок розвитку процесу Ф-К істотно знижується якість поверхонь сполучених деталей [5, 6]. Погіршуються параметри шорсткості, утворюються каверни і поверхневі мікротріщини. Розвиток Ф-К у вузлах машин і механізмів може призвести до порушень у точності та міцності посадок, втрати плавності ходу, заклинювання або повної втрати рухливості контактуючих деталей, зниження втомної міцності деталей.

Згідно з [7] однією з основних причин виходу з ладу ресор автомобіля в процесі експлуатації є Ф-К, яка виникає на сполучених поверхнях деталей у процесі циклічного мікропрослизання та вібрації. Інтенсивність зношування в процесі Ф-К збільшується із зростанням навантаження, амплітуди і частоти коливань, зі зростанням відносного прослизання, зміною об'ємної температури. Застосування бітумного і силіконового герметиків дозволяє захистити метал від корозійного руйнування, що сприяє збереженню працездатності та довговічності ресор, знижує ризик виникнення раптової відмови і підвищує рівень надійності та безпеки авто-

мобіля в процесі експлуатації.

Фретинг-корозія нерідко є причиною виходу з ладу відповідальних вузлів двигунів внутрішнього згоряння, зокрема великовантажних кар'єрних автосамоскидів, бурової техніки, що працюють в умовах вібрацій і високих контактних навантажень.

У [8] встановлено, що у всіх досліджених щодо захисту високонавантажених сполучень деталей машин з використанням нанопокриттів на основі полімерної фторвуглецевої композиції і фрикційно-механічного латунювання має місце єдиний механізм підвищення зносостійкості в процесі фретингу в зоні контактного шару дрібнодисперсних частинок завдяки використанню тонкошарових покриттів. Їхня присутність може бути обумовленою або структурною самоорганізацією матеріалу покриття в процесі фрикційного латунювання або формуванням композиційної структури полімерного покриття з дрібними частинками зношування за умови використання полімерної композиції. До того ж розглянуті захисні нанопокриття виключають корозійний компонент механізму ФЗ.

У різних конструкціях ТіПМ використовуються з'єднувальні муфти валів, які повинні не тільки забезпечувати надійну передачу великих крутних моментів у разі високої частоти обертання, а й мати стабільно низький дисбаланс, демпфувати вібрації, які передаються по валопроводу від одних частин агрегату до інших, мати оптимальні пружно-масові характеристики. Працюючи в зоні великих навантажень, муфти повинні мати високий ступінь надійності та тривалий ресурс роботи.

Правильний вибір типу муфти покращує динамічні характеристики механізму. Перспективною конструкцією для використання в турбоагрегатах малої потужності [9] і механізмах пересування кранів [10] може бути пластинчата або пружна муфта (ПМ).

Усі перелічені вище вимоги найбільш повно задовольняють ПМ із пакетом металевих мембран. Основними перевагами ПМ порівняно з традиційними зубчастими або втулково-пальцевими муфтами є їхні компенсуючі можливості в плані радіальної неспіввідповідності та перекосів валів, а також м'який пуск, демпфування осьових і радіальних зусиль. Вони безшумні в роботі й не вимагають обслуговування в процесі експлуатації [11].

Пружна муфта може бути характерним прикладом різновидів причин виникнення

Ф-К. Практика показує, що в процесі роботи до дії Ф-К тією чи іншою мірою схильні багато деталей ПМ. Це поверхні півмуфт, болтів, шайб, втулок, пружних елементів та ін.

Під дією циклічних робочих навантажень у ПМ виникають періодичні зміщення контактуючих поверхонь деталей. Наявність контактної тиску між поверхнями, що сполучаються, й амплітуди їхнього відносного зсуву зумовлюють появу пошкоджень від Ф-К.

Слід зазначити, що серед усіх сполучень деталей ПМ особливу небезпеку становить поєднання «півмуфта – вал», у якому зовнішня циліндрична поверхня вала контактує з внутрішньою циліндричною поверхнею півмуфти, зокрема деталі утворюють з'єднання з натягом [12, 13].

У [14] стверджується, що для підвищення якості з'єднання деталей великогабаритних складених виробів (прокатних валків) доцільним є збільшення коефіцієнта тертя шляхом нанесення покриття.

Як правило, більшість відомих способів підвищення якості пресових з'єднань (збільшення несучої здатності, підвищення герметичності з'єднання і міцності валів, зниження Ф-К), полягають у введенні між сполученими поверхнями певних «прошарків», що мають у контактні властивості, які істотно відрізняються від початкових, тобто перенесення ковзання в проміжне середовище. Це може бути або покриття, нанесене на одну або обидві контактуючі поверхні [15], або зміцнений поверхневий шар [16] та ін. Особливість пресових з'єднань полягає в тому, що деталі цих з'єднань ще до прикладання робочих навантажень знаходяться в напруженому стані, який спричинений наявністю натягу на посадочних поверхнях. Поєднання робочих напружень і напружень від натягу може призвести до значної концентрації напружень в окремих місцях з'єднання. Зниження межі витривалості вала в підматочинній частині відбувається під торцями маточини внаслідок концентрації напружень і процесу фретинг-втоми. Зменшити вплив цих чинників можна шляхом зниження загальної жорсткості маточини, і особливо, у її торців, наприклад, шляхом запресовування по торцях маточини кілець з більш м'якого матеріалу у виконанні на посадковому діаметрі прямокутні канавки [17].

На рис. 1, а показано пресове з'єднання «маточина 1 – вал 3» зі вставними кільця-

ми 2. Висота кільця (t) повинна підбиратися з урахуванням натягу в з'єднанні та навантаження, що передається з'єднанням, від чого залежить амплітуда відносного просковзування маточини 1 і вала 3. Наявність кільця 2 з більш піддатливих матеріалів у зонах максимальних контактних тисків згладжує пік напружень і зменшує ступінь пошкодження в процесі Ф-К.

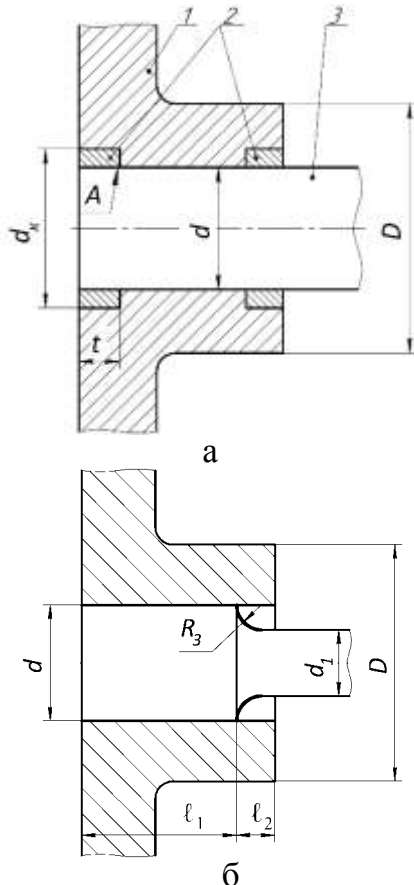


Рис. 1. Схематичне зображення пресового з'єднання зі вставними кільцями: 1 – маточина; 2 – вставне кільце; 3 – вал (а) і пресового з'єднання зі збільшеним діаметром підматочинної частини (б)

У разі значних навантажень пресового з'єднання та недостатньої ширини кільця, унаслідок обминання контактної поверхні кільця торець маточини може зміститися в точку А (рис. 1, а) і межа витривалості такого з'єднання може знизитися, порівняно зі сполученням без кільця, оскільки жорсткість маточини в торців збільшиться.

Для підматочинної частини вала порівняно з маточиною є менше можливостей варіювання конструкції. Одним з найбільш поширених способів збільшення опору втомі є збільшення діаметра підматочинної частини

з плавним переходом до потовщення від основного діаметра. Тут можуть мати місце три випадки: торець маточини нависає над галтеллю (рис. 1, б), торець маточини на одному рівні з кінцем підматочинної частини ($l_2=0$) і торець маточини не доходить до кінця підматочинної частини (l_2 має негативну величину).

У [17] автор наводить результати робіт А. Тума і Ф. Вундерліха, у яких спостерігається значний ефект підвищення межі витривалості валів з напрусованими деталями в процесі використання цементації.

Одним з найбільш перспективних способів формування поверхневих шарів деталей з необхідними властивостями є метод електроіскрового легування (ЕІЛ). Метод має низку специфічних особливостей, однією з яких є те, що процес легування може відбуватися без перенесення матеріалу анода на поверхню катода, наприклад, під час ЕІЛ графітовим електродом [18].

Метод ЕІЛ графітовим електродом оснований на процесі дифузії (насиченні поверхневого шару деталі вуглецем) і має певну схожість із різновидом хіміко-термічної обробки (ХТО) – цементацією. Спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням (ЦЕІЛ) має низку переваг, основними з яких є: досягнення 100 % суцільності зміцнення поверхневого шару; підвищення його твердості за рахунок дифузійно-гартувальних процесів; легування можна здійснювати в чітко зазначених місцях; відсутність поводок і викривлення [19].

З метою зниження шорсткості поверхні після ЦЕІЛ застосовують, як правило, методи поверхнево-пластичного деформування (ППД), серед яких на особливу увагу заслуговує метод безабразивної ультразвукової фінішної обробки (БУФО) [20].

Резервом підвищення якості поверхневого шару після ЦЕІЛ може бути нанесення на нього м'яких антифрикційних металів, наприклад, міді, срібла тощо з наступною БУФО. Наявність м'якого шару між контактуючими поверхнями сприяє зниженню опору деформації в процесі запресовування, збільшення площі контактуючих поверхонь і таким чином підвищення герметичності та міцності сполучення.

Мета і постановка завдання

Отже, метою роботи є підвищення надійності й довговічності деталей транспортних і підйомних машин шляхом збільшення фре-

тингостійкості сполучень: «вал – маточина», «гнучкий елемент – гнучкий елемент», «поверхні металовиробів («різь болта – різь гайки», «гайка – шайба», «шийка болта – шайба» та ін.), «вал – шпонка – півмуфта» за рахунок формування на контактуючих поверхнях деталей сполучення спеціальних покриттів.

Методи підвищення надійності та довговічності деталей транспортних і підйомних машин

Спосіб виготовлення нерухомого з'єднання типу вал – маточина сталевих деталей (Патенти на винахід UA № 103098, RU 2 501 986)

З метою підвищення втомної міцності валів пресових з'єднань запропоновано новий спосіб [21] виготовлення нерухомого з'єднання типу вал – маточина сталевих деталей, який містить формування покриття методом ЕЛД, принаймні, на одній із поверхонь деталей, що сполучаються, з наступним їхнім складанням.

На внутрішній поверхні маточини в зонах, прилеглих до її торців, методом ЕЛД формують кільцеподібний дифузійний шар або і підматочинну поверхню вала піддають ЦЕЛД, після чого на цементовий шар методом ЕЛД наносять шар м'якого антифрикційного матеріалу, а потім обробляють його методом ППД, у цьому випадку товщину нанесеного шару з м'якого матеріалу та шорсткість поверхонь, що сполучаються, забезпечують за рахунок вибору режимів ЕЛД, матеріалу електрода і способу нанесення шару м'якого матеріалу.

Відповідно до запропонованого способу обробляють внутрішню поверхню маточини, що примикає до заокруглених внутрішніх торців. У цьому разі на поверхні маточини зі сталі 20 формували міцний дифузійний шар з міді або олов'яної бронзи (рис. 2, а).

Кільцеподібний дифузійний шар шириною 5–10 мм формують електроодом-інструментом з міді або олов'яної бронзи за умови енергії розряду 0,01–3,4 Дж на поверхнях канавок, виконаних на посадочному діаметрі маточини. У запропонованому варіанті існує можливість використання і такої конструктивної ознаки, як закруглення внутрішніх торців маточини, який забезпечує додатковий позитивний ефект – зниження її жорсткості (рис. 2, б).

Підматочинну поверхню вала піддають ЦЕЛД, а потім ЕЛД сріблом або міддю. Цементовану підматочинну поверхню вала можуть

піддавати ЕЛД електроодом з олов'яної бронзи, формуючи в цьому разі м'який антифрикційний шар завтовшки до 2,5 мм і збільшуючи діаметр підматочинної частини вала на 5,00 мм.

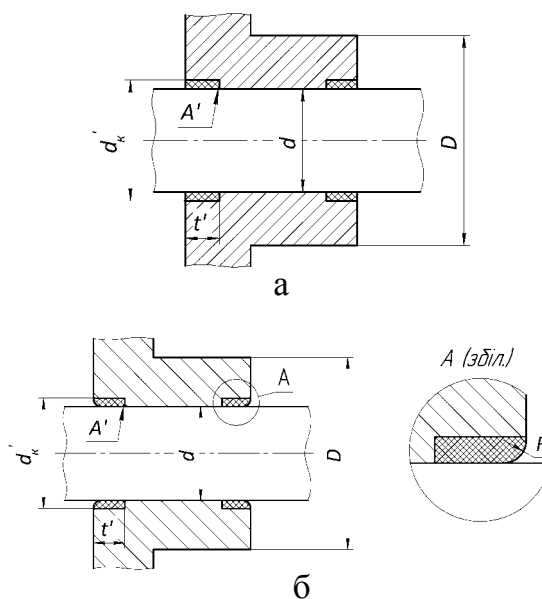


Рис. 2. Схематичне зображення маточини з дифузійним шаром міді (а) і маточини із закругленими торцями (б)

Радіус переходу (галтелі) від ділянки вала більшого діаметра до ділянки вала меншого діаметра формують шляхом зниження енергії розряду і/або підвищенням зусилля ППД.

Підвищити якість сформованих шарів у використанні великих енергій розряду можна шляхом застосування захисного середовища аргону. Діорометричний аналіз показує, що в процесі легування сталі 20 міддю й олов'яною бронзою, як на повітрі, так і в середовищі аргону, мікротвердість на поверхні шару становить, відповідно, 850–900 МПа і 1050–1150 МПа. Мірою заглиблення, вона плавно збільшується до мікротвердості зони термічного впливу (2500–3000 МПа), а потім переходить в мікротвердість основного металу 1750–1800 МПа. Товщина зони термічного впливу залежить від режиму легування й становить, наприклад, для енергії розряду (W_p) 0,56 Дж на повітрі 50 мкм, а в середовищі аргону 40 мкм.

Отже, на підставі проведених досліджень можна рекомендувати застосування як легуючих електродів міді й олов'яної бронзи, що дозволяє формувати на поверхні сталі 20 покриття із суцільністю до 100%. Водночас краща якість покриття (суцільність, шорсткість, рівномірність та ін.) досягається у викорис-

танні захисного середовища – аргону. Крім того, перевагами пропонованого способу є економія кольорових металів, а також спрощення технології виготовлення маточини.

Підматочинну поверхню вала із сталі 40X піддавали ЦЕЛ, ЕЛ міддю або сріблом та обробці БУФО.

Нижче приведена методика й результати проведених досліджень.

ЦЕЛ виконували на переносній установці ЕЛ з ручним вібратором «Елітрон-22А», що забезпечує енергію розряду в діапазоні 0,1...0,53 Дж, і установці «Елітрон-52А» з W_p до 6,8 Дж.

Для досліджень використовували спеціальні зразки, виготовлені зі сталі 40X, у вигляді котушки, що складається з двох дисків діаметром 50 мм і шириною 10 мм, з'єднаних між собою проставкою діаметром 15 мм, що має дві технологічні ділянки такого ж діаметра (рис. 3, а, б). Поверхні дисків перед ЦЕЛ шліфувалися до $R_a=0,5$ мкм. Зразки закріплю-

вали в патроні токарного верстата, після чого робили ЦЕЛ (рис. 3, а), ЕЛ сріблом і міддю (відповідно рис. 3, б і в) і обробку БУФО. На всіх етапах обробки на приладі профілографі-профілометри мод. 201 заводу «Калібр» вимірювали шорсткість поверхні. З дисків, у свою чергу, вирізали окремі сегменти, з яких виготовляли шліфи для металографічних і дюрOMETричних досліджень.

Після виготовлення шліфи досліджували на оптичному мікроскопі «Неофот-2», де виконувалася оцінка якості шару, його суцільності, товщини й будови зон підшару – дифузійної зони і зони термічного впливу. Одночасно проводили дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі й по глибині шліфа від поверхні. Вимірювання мікротвердості виконували на мікротвердомірі ПМГ-3 вдавлюванням алмазної піраміди.

Результати вимірювання шорсткості поверхні зразків сталі 40X після ЦЕЛ, ЕЛ сріблом і міддю та БУФО представлені в табл. 1.



Рис. 3. Зразки зі сталі 40X після ЦЕЛ (а) і ЕЛ сріблом (б) і міддю (в)

Таблиця 1 – Шорсткість поверхні зразків сталі 40X після ЦЕЛ, ЕЛ сріблом і міддю та БУФО

ЦЕЛ + Ag							
Значення шорсткості поверхні в окремих точках, мкм						Середнє значення параметра шорсткості, мкм	
R_a						R_a	R_z
1,92	3,3	1,55	2,57	2,15	2,04		
R_z						2,26	6,40
5,43	2,26	6,40	7,26	6,17	5,76		
ЦЕЛ + Ag + БУФО							
Значення шорсткості поверхні в окремих точках, мкм							
R_a							
0,59	0,86	1,27	0,47	1,33	0,76		
R_z						1,68	0,88
1,68	2,44	3,59	1,33	3,76	2,14		
ЦЕЛ + Cu							
Значення шорсткості поверхні в окремих точках, мкм							
R_a							
3,02	4,46	2,5	3,38	2,14	3,41		
R_z						8,54	12,63
8,54	12,63	7,07	8,54	12,63	7,07		
ЦЕЛ + Cu + БУФО							
Значення шорсткості поверхні в окремих точках, мкм							
R_a							
0,55	0,65	0,91	0,62	0,87	0,71		
R_z						3,25	0,80
3,05	2,40	2,35	2,64	2,48	3,01		

Унаслідок металографічних і дорометричних досліджень встановлено, що після ЦЕЛ, ЕЛ сріблом і БУФО на поверхні зразка сталі 40Х розташовується шар із твердістю близько 80–90 HV, який нижчий за мікротвердість основи (220 HV) і глибиною до 35 мкм. Далі, мірою заглиблення мікротвердість підвищується і на глибині ~60 мкм досягає максимального значення 470 HV, після чого знову плавно знижується до глибини 100 мкм, де відповідає мікротвердості основи.

Після ЦЕЛ, ЕЛ міддю і БУФО на поверхні зразка розташовується шар із твердістю близько 140–170 HV, який нижчий за мікротвердість основи (220 HV) і глибиною до 40 мкм. Далі, мірою заглиблення мікротвердість плавно підвищується й на глибині ~75 мкм досягає максимального значення 510 HV, після чого знову плавно знижується до глибини 120 мкм, де відповідає мікротвердості основи.

Отже, варто зазначити, що за умови нанесення м'яких металів, наприклад міді або срібла після ЦЕЛ, поверхня деталі формується з двох шарів: з м'якого зовнішнього та твердого зносостійкого, що знаходиться нижче під першим. Нанесення м'якого антифрикційного металу дозволяє в процесі подальшої обробки БУФО отримати якісний зносостійкий шар з необхідною шорсткістю.

Товщину шару з м'якого антифрикційного матеріалу можна регулювати за рахунок режиму ЕЛ, способу нанесення й матеріалу електроду. Так на механізованій установці, моделі «ЕЛ-9», використовуючи електроди з олов'яної бронзи, можна формувати шари до 2,5 мм, збільшуючи діаметр підматочинної частини вала на 5,0 мм.

Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фретинг-корозії (патент на корисну модель UA № 142811)

У процесі роботи пружних муфт на контактуючих поверхнях деталей, що утворюють різні пари тертя, такі як 1 – «головка болта – втулка», 2 – «шийка болта – втулка», 3 – «шийка болта – шайба», 4 – «різь болта – різь гайки», 5 – «гайка – шайба», 6 – «п'ята – півмуфта», 7 – «шайба – півмуфта», 8 – «шайба мала – головка втулки», 9 – «шайба мала – шийка втулки», 11 – «гнучкий елемент – шайба мала», 12 – «гнучкий елемент – гнучкий елемент», 13 – «гнучкий елемент – п'ята», 14 – «п'ята – півмуфта», 15 – «п'ята – втулка», (рис. 4), одночасно виникає і Ф-К

У процесі Ф-К відбувається поступове руйнування контактуючих поверхонь

з'єднаних деталей. Ураження Ф-К несе велику небезпеку, оскільки може бути джерелом втомного руйнування деталей і зрештою виходу пружної муфти з ладу.

Відомі способи захисту деталей від Ф-К, що полягають у нанесенні на контактуючі ділянки деталей захисних покриттів. Наприклад, спосіб нанесення високотемпературного фретинг-стійкого захисного покриття на лопатку газотурбінного двигуна методом повітряно-плазмового напилення [патент US 2008066288, опубл. 20.03.2008].

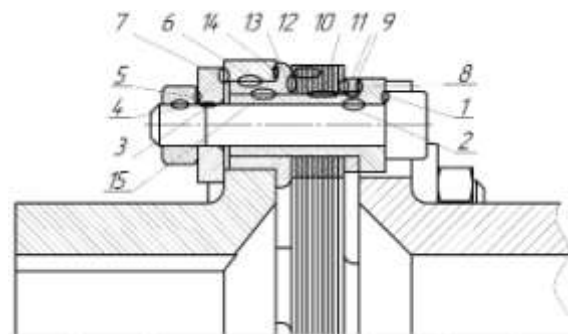


Рис. 4. Контактуючі поверхні ПМ, що піддаються Ф-К

Відомий спосіб нанесення на поверхню деталей, що працюють в умовах тертя та Ф-К, захисного покриття, що є градієнтною твердістю корозійностійкою композицією [патент RU 2268323, опубл. 20.01.2006]. Він містить обробку пучками заряджених часток і подальше окисидування або пасивацію деталей.

Згідно з [22] у вузлах тертя авіаційно-космічної техніки широке застосування знайшли тверді мастильні покриття (ТМП), що отримуються різними методами: напірванням (шаржуванням), дифузійним насиченням, гальванічним і хімічним осадженням, електрофорезом, фізичними методами осадження у вакуумі, осадженням із використанням органічних в'язких. Для використання у високонавантажених вузлах тертя з підвищеним ресурсом у процесі ФЗ найбільш перспективними є відносно товсті (до 200...300 мкм) ТМП, основу яких становлять зносостійкі матриці з неорганічних матеріалів.

Загальними недоліками описаних вище способів є висока трудомісткість і собівартість нанесення покриття, необхідність використання складного й дорогого устаткування, у цьому разі товщина покриття перевищує допустимий проміжок.

Поставлене завдання вирішується створенням нового способу [23] захисту деталей пари тертя пружної муфти від Ф-К, що містить

хіміко-фізичну дію на поверхневий шар деталей у парі тертя, яке виконують методом епіламування (ЕП).

Епіламування – це процес нанесення поверхнево-активної речовини (ПАР) із вмістом фтору на поверхню твердого тіла, унаслідок чого на обробленій поверхні утворюється спеціальне захисне покриття у вигляді мономолекулярної плівки.

На оброблюваній поверхні в процесі ЕП формується шар орієнтованих молекул, які перешкоджають розтіканню мастила із зони тертя. Плівка має надзвичайно низьку поверхневу енергію, що призводить до істотного зниження коефіцієнта тертя і, як наслідок, до підвищення зносостійкості пар тертя деталей машин. Молекули епіламу закріплюються на поверхні твердого тіла за рахунок сил хемосорбції. Завдяки тому, що зв'язок епіламу з поверхнею хімічний, а не фізичний, адгезія захисної мономолекулярної плівки дуже висока.

Одна з важливих переваг ЕП полягає в тому, що воно не змінює структуру оброблюваної поверхні, а лише модифікує її, надаючи поверхні антифрикційні, антиадгезійні, гідрофобні, захисні та інші корисні властивості. Практично незмінними залишаються і геометричні розміри оброблюваних деталей, оскільки товщина захисного покриття ~4–8 мкм.

У проведенні ЕП молекули епіламувальної речовини в процесі контакту з твердим тілом проникають у його приграничний шар і утворюють на поверхні мономолекулярну плівку, яка дозволяє понизити коефіцієнт тертя удвічі-утричі, а поверхневу енергію зменшити в ~1000 разів. Це забезпечує поверхням тертя наявність антифрикційних і антиадгезійних властивостей. Утворена бар'єрна плівка, витримує температуру до 400 °С, не руйнується в разі ударних навантажень до 300 кг/мм².

Молекули епіламу заповнюють мікронерівності та мікротріщини, знижуючи поверхневу крихкість. Найактивніше вони взаємодіють з молекулярною структурою основи саме в місцях порушення кристалічної ґратки, створюючи свого роду латки та зміцнюючи взаємодіючі поверхні. Отже, сама плівка запобігає зношуванню взаємодіючих поверхонь, а її структура у вигляді ворсу утримує мастильні матеріали в зоні контакту, виключаючи сухе тертя.

Розглянемо застосування пропонованого способу на прикладі однієї з найбільш відповідальних ділянок, що обмежує працездатність ПМ. Таким вузлом є набір кріпильних деталей, що з'єднують між собою півмуфту, пакет гнучких елементів і проставку. У табл. 2 представлені конструктивні вимоги до контактуючих поверхонь цих кріпильних деталей.

Таблиця 2 – Конструктивні вимоги до контактуючих поверхонь кріпильних деталей

Контактуюча поверхня деталі	Матеріал	Шорсткість Ra, мкм	Твердість	Границя міцності σ_B , МПа
Шийка болта	40ХН2МА	0,8	28-32 HRC	835
Головка болта	40ХН2МА	1,6	28-32 HRC	835
Шийка втулки	30Х13	0,8	28-32 HRC	860
Головка втулки	30Х13	0,8	28-32 HRC	860
Гайка	30ХГСА	1,6	33-34 HRC	1080
Шайба	30Х13	0,8	197-248 МПа	860

Нижче наведено методику епіламування й результати дослідження способу захисту кріпильних деталей пружної муфти від Ф-К.

Випробування проводили на базі 10^7 циклів на спеціально виготовленому стенді (рис. 5). У цьому випадку набирали пакет із гнучких елементів муфти МСК-470, розрізаних навпіл, установлювали на стенд і скріплювали деталями, відповідно до табл. 2. Випробування на стенді проводили двома серіями:

- у першій серії всі деталі досліджували без додаткової обробки;
- для другої серії деталі ретельномили, знежирували шляхом обробки бензином Б70 «Калоша», ацетоном або бензиновоспиритовою сумішшю, поміщали в металеві



Рис. 5. Стенд для дослідження фретингостійкості: 1 – лічильник циклів; 2 – станина з підшипниковими опорами; 3 – електропривод; 4 – ексцентриковий механізм; 5 – пакет із гнучких елементів; 6 – механізм кріплення гнучких елементів

кошки, занурювали в металеву ємність з епіламуєчим розчином «Полизам» і кип'ятили за температури 47–50 °С упродовж 45 хв, оскільки температура епіламуєчих розчинів становить приблизно 50 °С, а час обробки – 30–60 хв.

Після цього виймали й сушили в сушильній шафі за температури 110–120 °С упродовж 30 хв.

Результати випробувань зведені до табл. 3 і представлені на рис. 6.

Таблиця 3 – Конструктивні вимоги до контактуючих поверхонь кріпильних деталей

Контактуюча поверхня деталі		Шорсткість поверхні, мкм						Коефіцієнт збільшення стійкості		
		до випробувань			після випробувань					
		Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
Шийка болта	Без покриття	0,79	1,97	5,98	1,55	3,58	10,89	1,60	1,52	1,49
	З епіламуванням				0,97	2,35	7,31			
Шийка втулки	Без покриття	0,78	1,12	5,84	1,60	3,03	9,10	1,50	1,76	1,28
	З епіламуванням				1,07	1,72	7,18			
Гайка	Без покриття	1,44	2,87	8,10	2,55	4,14	11,56	1,52	1,29	1,37
	З епіламуванням				1,67	3,20	8,42			
Шайба	Без покриття	0,80	1,81	5,05	1,45	4,91	9,56	1,56	1,70	1,31
	З епіламуванням				0,93	2,88	7,31			

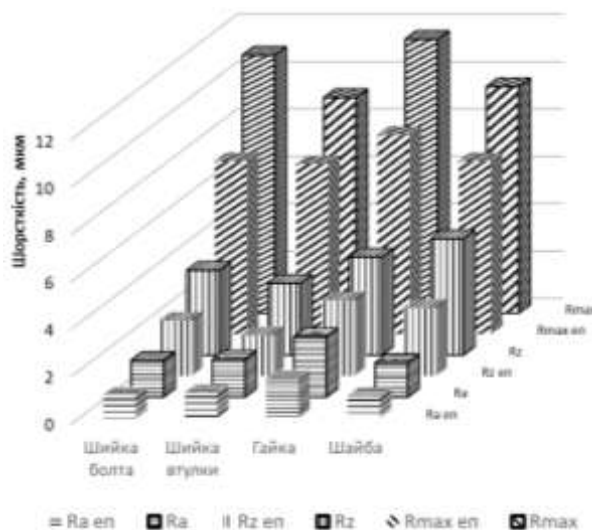


Рис. 6. Результати вимірювання шорсткості поверхні шийки болта, шийки втулки, гайки і шайби: 1, 3 і 5-й ряди, відповідно Ra, Rz, Rmax – після епіламування; 2, 4 і 6-й ряди, відповідно Ra, Rz, Rmax – без епіламування

В аналізі даних табл. 3 встановлено, що параметри шорсткості кріпильних деталей (Ra, Rz і Rmax), оброблених методом епіламування, порівняно з необробленими деталями, знизилися відповідно в 1,55; 1,53 і 1,39 разів.

Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт (патент на корисну модель UA №137273)

Винахід належить до способів захисту гнучких елементів пружних муфт від Ф-К

Відомий спосіб формування пакету гнуч-

ких елементів пружних муфт, що містить виготовлення гнучких елементів, подальше їхнє складання в пакет з механічним закріпленням, коли перед складанням на поверхні гнучких елементів, що сполучаються, наносять металоплакуючий мастильний матеріал (МММ), принаймні, у місцях їхнього механічного кріплення в процесі формування пакету, а після складання пакет здавлюють, видаляючи надлишок МММ [24].

Нанесення МММ, що складається з парафіну з додаванням порошку з міді або її сплавів, забезпечує майже повну відсутність зношування поверхонь гнучких елементів, завдяки зашпаклюванню мікронерівностей поверхонь гнучких елементів і збільшенню площі їхнього фактичного контакту, а також зменшення коефіцієнта тертя, що, зрештою, значно знижує силу тертя, тобто вірогідність руйнування і зношування контактуючих поверхонь. Найбільш раціональним відсотковим вмістом металоплакуючої присадки, як для міді, так і для бронзи БНК є 5–25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення відсоткового вмісту присадки не впливає на якість змащування.

Варто зазначити, що випробування, відповідно до вищеприведеного винаходу, проводилися на стенді (рис. 5), за умови амплітуди 2 мм і кількості циклів 10^7 . Проте подальшими дослідженнями було встановлено, що в разі збільшення амплітуди до 5 мм і кількості циклів до 2×10^7 зношування поверхонь гнучких елементів значно зростає, зокрема більшою мірою не в зоні кріплення, а на віддалених відстанях від неї, де контактуючі поверхні

в процесі переміщення проходять великі відстані одна щодо одної. Під час розбирання після випробувань пакету з гнучкими елементами на поверхнях останніх відзначалася поява слідів зношування в результаті Ф-К (рис. 7).

Відома позитивна роль дисульфиду молибдену (MoS_2), що застосовується як тверде мастило в загальній проблемі підвищення надійності та довговічності машин і механізмів.

Так у [25] відзначається, що за класифікацією, запропонованою Кемпбелом, дисульфід молибдену, як і графіт, слоода, тальк, нітрид бору, стеарат цинку, належить до групи твердих мастил, кристалічна ґратка яких має шарувату структуру.

Атоми кожного шару пов'язані між собою міцними хімічними зв'язками, окремі шари пов'язані між собою слабкими молекулярними силами, що забезпечує легкість ковзання по площині спайності. Товщина одного елементарного шару MoS_2 дорівнює $6,25 \text{ \AA}$. Плівка дисульфиду молибдену завтовшки $0,025 \text{ мкм}$ складається з 40 шарів з 39 площинами ковзання між ними. Висока адгезія дисульфиду молибдену до металів обумовлена міцними молекулярними зв'язками, що утворюються атомами сірки з металом; будова кристалічної ґратки забезпечує наявність важливих для мастильних матеріалів високих адгезійних властивостей.

Пропонований новий спосіб [26] формування пакетів гнучких елементів ПМ, що передбачає захист поверхонь елементів, які сполучаються, МММ, характеризується низькою енергоємністю, екологічною безпекою, простотою, можливістю механізації процесу і, передусім, дозволяє підвищити довговічність вузлів тертя. Для визначення впливу покриттів із дисульфиду молибдену на Ф-К гнучких елементів ПМ проводилися додаткові дослідження. Унаслідок було встановлено, що додавання в мастильний матеріал, що складається з парафіну й порошку з міді в кількості від

5 до 25 вагових відсотків, порошку дисульфиду молибдену в кількості від 5 до 25 вагових відсотків, значно знижує зношування поверхонь гнучких елементів.

Приготування мастильного матеріалу здійснювалося таким чином. У розплавленій парафін за умови інтенсивного перемішування вводили порошок з міді й дисульфиду молибдену. Оприманий матеріал наносили на заготовки гнучких елементів муфти. У цьому випадку використали такі серії покриттів, виконаних у співвідношеннях: 1-й пакет – без покриття; 2-й пакет – 100% парафін; 3-й пакет – 95% парафін + 5% мідь; 4-й пакет – 75% парафін + 25% мідь; 5-й пакет – 5% мідь + 5% MoS_2 + 90% парафін; 6-й пакет – 5% мідь + 25% MoS_2 + 70% парафін; 7-й пакет – 5% мідь + 50% MoS_2 + 45% парафін; 8-й пакет – 5% мідь + 75% MoS_2 + 20% парафін; 9-й пакет – 25% мідь + 5% MoS_2 + 70% парафін; 10-й пакет – 25% мідь + 25% MoS_2 + 50% парафін; 11-й пакет – 25% мідь + 50% MoS_2 + 20% парафін; 9-й пакет – 25% мідь + 75% MoS_2 . Потім заготовки збирали в пакет. Надлишок покриття видаляли шляхом здавлювання заготовок за умови температури плавлення парафіну.

Величину зношування вимірювали профілографами-профілометрами: моделі 252 і DIAVITE DH-5 за трьома параметрами (R_a , R_z і R_{max}). Вимірювання проводилися упоперек напрямку прокату. База вимірювання становила 4 мм .

Початкова шорсткість гнучких елементів муфт зі сталі 12X18H9 (ГОСТ 4986-79) становила: $R_a=0,16 \text{ мкм}$; $R_z=1,4 \text{ мкм}$ і $R_{\text{max}}=1,7 \text{ мкм}$.

Для випробувань набирали пакет із гнучких елементів муфти МСК-470, розрізаних навпіл. Як матеріал покриття використали парафін, як у чистому вигляді, так і з добавками з міді та дисульфиду молибдену.

Результати досліджень зведені до табл. 4 та представлені на рис. 8.

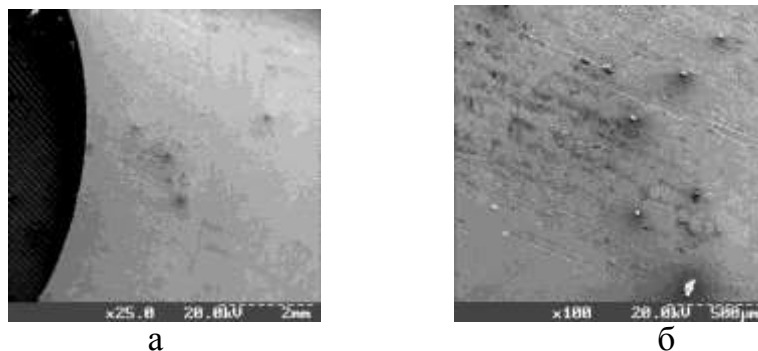


Рис. 7. Сліди Ф-К поверхонь гнучких елементів ПМ у разі різних збільшень: а – $\times 25$ і б – $\times 100$ після випробувань на стенді

Таблиця 4 – Результати вимірювання шорсткості поверхонь гнучких елементів пружних муфт, пошкоджених Ф-К

№	Матеріал поверхонь контакту	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм
1	сталь 12X18H9	1,63	6,25	7,19
2	100% парафін	0,71	3,81	5,16
3	5% мідь + 95% парафін	0,35	2,74	3,55
4	25% мідь + 75% парафін	0,33	2,41	3,47
5	5% мідь + 5% MoS ₂ + 90% парафін	0,29	2,54	3,18
6	5% мідь + 25% MoS ₂ + 70% парафін	0,28	2,49	3,12
7	5% мідь + 50% MoS ₂ + 45% парафін	0,28	2,47	3,11
8	5% мідь + 75% MoS ₂ + 20% парафін	0,27	2,47	3,12
9	25% мідь + 5% MoS ₂ + 70% парафін	0,27	2,15	2,95
10	25% мідь + 25% MoS ₂ + 50% парафін	0,26	2,13	2,93
11	25% мідь + 50% MoS ₂ + 25% парафін	0,26	2,14	2,89
12	25% мідь + 75% MoS ₂	0,25	2,13	2,90

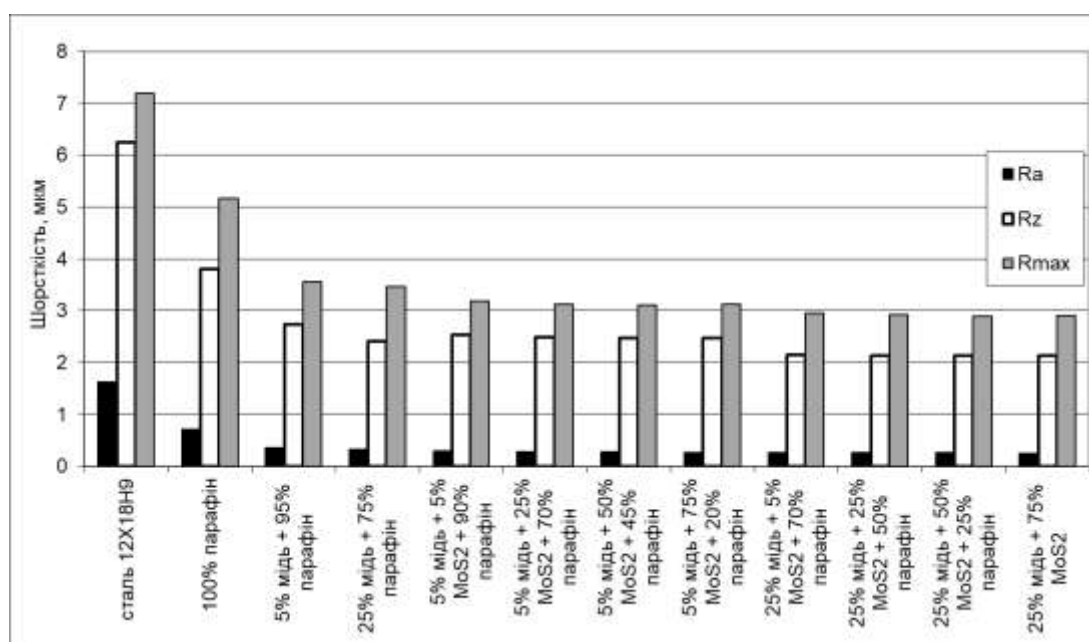


Рис. 8. Діаграма шорсткості поверхонь випробовуваних зразків

Аналіз результатів дослідження показав, що найбільш раціональним відсотковим вмістом металоплакуючої присадки як для міді, так і для дисульфиду молібдену є 5–25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення відсоткового вмісту присадки не впливає на якість змащування.

Висновки

1. Ресурс роботи малорухомих вузлів і механізмів дорожньо-будівельних машин пов'язаний з передчасним їхнім зношуванням унаслідок розвитку Ф-К у зоні трибоконтакту, яке найчастіше розвивається за умови різних пресових посадок на валах, що обертаються, у болтових з'єднаннях і гнучких елементах пружних муфт.

2. З метою підвищення втомної міцності валів нерухомих з'єднань запропоновано новий спосіб виготовлення нерухомого

з'єднання типу «вал – маточина» сталевих деталей, який відрізняється тим, що на внутрішній поверхні маточини в зонах, які примикають до її торців, методом ЕІЛ формують кільцеподібний дифузійний шар, а підматочинну поверхню валу піддають ЦЕЛІ, після чого на цементований шар методом ЕІЛ наносять шар м'якого антифрикційного матеріалу, а потім обробляють його методом ППД, водночас товщину нанесеного шару з м'якого антифрикційного матеріалу і шорсткість поверхонь, що сполучаються, забезпечується за рахунок вибору режиму ЕІЛ, матеріалу електрода і способу нанесення шару м'якого антифрикційного матеріалу.

3. На підставі проведених досліджень для формування покриттів з м'яких антифрикційних матеріалів як матеріал електрода можна рекомендувати мідь і олов'яну бронзу, що дозволяє створювати на внутрішній поверхні

маточини зі сталі 20 покриття із суцільністю до 100 %. У цьому випадку краща якість покриття (суцільність, шорсткість, рівномірність та ін.) досягається в разі використання захисного середовища – аргону. Крім того, до переваг запропонованого способу належить економія кольорових металів, а також спрощення технології виготовлення маточини.

4. Запропоновано новий спосіб захисту деталей пружної муфти від Ф-К, за якого виконують хіміко-фізичний вплив на поверхневий шар деталей, які контактують у парах тертя. Вказана обробка здійснюється методом епіламування, у цьому випадку деталі миють, знежирюють, укладають в металеві кошики, занурюють у металеву ємність з епіламуючим розчином, кип'ятять, після чого виймають і сушать. Установлено, що параметри шорсткості кріпильних деталей (R_a , R_z і R_{max}), оброблених методом епіламування, порівняно з необробленими деталями, знизилися в 1,55; 1,53 і 1,39 разів відповідно.

5. Запропоновано новий спосіб, що забезпечує надійний захист гнучких елементів пружних муфт від Ф-К і підвищення їхньої довговічності в більш важких умовах роботи, за рахунок зміни якісних параметрів їхніх поверхневих шарів шляхом нанесення корозійностійких мастильних матеріалів, що містять у своєму складі парафін із домішками з міді та дисульфиду молібдену.

Література

1. Зенкин А. С., Арпентьев Б. М. Технологическое обеспечение точности сборки соединений с натягом осуществляемых с термовоздействием. *Вестник Машиностроения*. 1988. №4.
2. Зенкин А. С., Зубрецькая Н. А. Оценка и прогнозирование напряженно-деформированного состояния соединений с натягом при термических методах сборки. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2003. №6. С. 9–12.
3. Мухаметшина Р. М. Изнашивание деталей дорожно-строительных машин при фреттинг-коррозии. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т.19, №1(2). 2017. С. 261–264.
4. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. Москва: Высшая школа, 1991. 321 с.
5. Густов Ю. И. Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники. *Известия КГАСУ*. 2014. №4 (30). С. 470–475.
6. Мухаметшина Р. М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии. *Известия КГАСУ*. 2013. №4 (26). С. 403–408.
7. Зорин В. А., Каргашова В. В. Влияние фреттинг-коррозии на долговечность рессор автомоби-

лей. *Грузовик*. №2, 2017. С.32–34.

8. Красный В. А., Максаров В. В., Вьюшин Р. В. Влияние тонкослойных нанопокрывий на фреттинг-коррозию высоконагруженных сопряжений крупногабаритных деталей машин. *Металлообработка*, 2013. №5–6. С. 63–67.
9. Ильичев В. Ю., Насонов Д. А. Экспериментально-аналитическое исследование и коррекция статических и динамических характеристик резинопальцевых муфт. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып. 3. 2011. С. 46–52.
10. Абрамов Б. Н. Влияние конструкции муфт механизма передвижения мостовых кранов на динамику их нагружения. *Подъемно-транспортное дело*. №5–6. 2015. С. 13–16.
11. Путро Е. В., Юрко В. И. Муфты упругие с пакетами кольцевых металлических мембран типа МСК. *Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования: монография*. Сумы: Тритория, 2017. С. 139–144.
12. Петухов А. Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость малоподвижных соединений ГТД и энергетических машин. *Авиационно-космическая техника и технология*. №7 (15). 2004. С. 128–134.
13. Малицкий И. Ф., Чернятин Е. В. Влияние шероховатости и способов обработки на прочность сопряжения с натягом. *Машиностроение*. 2014. №13. С. 149–153.
14. Лебедь В. Т., Кулаченко А. А. Оптимизация технологии нанесения покрытий в соединениях крупногабаритных составных валков для повышения несущей способности. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць*. 2008. Вип. №23. С. 240–247.
15. Кущенко А. В., Башкарев А. Я. Управление фрикционными свойствами полиимидных покрытий в соединениях с натягом. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. №1 (238). 2016. С. 155–162.
16. Селиванов К. С., Галиакбаров Р. Ф. Повышение фреттинг-стойкости деталей машин комплексной вакуумной плазменной обработкой. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. №7 (84). С. 29–32.
17. Балацкий Л. Т. Прочность прессовых соединений. Київ: Техніка. 1982. 152 с.
18. Патент України на винахід № 101715, 23Н 9/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням. Опубл. 25.01.2013, бюл. №8.
19. Ершов В. М. Цементация стальной поверхности при электроискровой обработке графитом. *Сб. науч. тр. сотрудников ДонГТУ*. 2011. Вып. 31. С. 219–225.
20. Нежибецкий Г. Н., Шкурко А. И. Втулки концевых уплотнений ротора. *Современные энергоэффективные технологии реализации инже-*

- нерных задач динамического оборудования: монография. 2017. С. 191–193.
21. Патент України на винахід № 103098, В23Н 9/00 В23Н 5/00 F16В 4/00 F16В 17/00 С23С 10/00. Спосіб виготовлення нерухомого з'єднання типу валь-маточина сталевих деталей. Опубл. 10.09.2013, бюл. № 17.
 22. Лесневский Л. Н. Фреттинг-коррозия покрытий типа «твердая смазка» в экстремальных условиях эксплуатации. *Вестник научно-технического развития. Национальная Технологическая Группа.* №2 (18). 2009. С. 31–35.
 23. Патент України на корисну модель № 142811, С23F 15/00 F01D 5/28. Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фреттинг-корозії. Опубл. 25.06.2020, бюл. № 12.
 24. Патент України на винахід № 92832, F16D 3/50, С10М 103/00. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт. Опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
 25. Иванов В. В., Марченко Ю. В. Перспективы применения дисульфида молибдена для формирования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий. *Вестник ДГТУ.* 2010. Т.10. №3(46). С. 381–385.
 26. Патент України на корисну модель № 137273, F16D 3/70, С10М 103/00. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт. Опубл. 10.10.2019, бюл. № 19.

References

1. Zenkin A.S., Arpent'ev B.M. (1988) Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti sborki soedineniy s natyagom osushchestvlyayemykh s termovozdeystviem [Technological support for the accuracy of the assembly of tight joints carried out with thermal action] *Vestnik Mashinostroyeniya*, 4 [in Russian].
2. Zenkin A.S., Zubretskaya N.A. (2003) Otsenka i prognozirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya soedineniy s natyagom pri termicheskikh metodakh sborki [Assessment and Prediction of the Stress-Strain State of Tightened Joints with Thermal Assembly Methods] *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 6, 9-12 [in Russian].
3. Mukhametshina R.M. (2017) Iznashivaniye detaley dorozhno-stroitel'nykh mashin pri fretting-korrozii [Wear of parts of road-building machines during fretting corrosion] *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 19, 1(2), 261-264 [in Russian].
4. Kogaev V.P., Drozdov Yu.N. (1991) Prochnost' i iznosostoykost' detaley mashin [Strength and durability of machine parts] *Vysshaya shkola, Moscow*, 321 p [in Russian].
5. Gustov Yu.I. (2014) Issledovaniye konstruktsionno-tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh pokazateley stroitel'noy tekhniki [Research of structural, technological and operational indicators of construction equipment] *Izvestiya KGASU*, 4 (30), 470-475 [in Russian].
6. Mukhametshina R.M. (2013) Otkazy dorozhno-stroitel'nykh mashin po parametram korrozii [Wear of road building machines details by fretting corrosion] *Izvestiya KGASU*, 4 (26), 403-408 [in Russian].
7. Zorin V.A., Kartashova V.V. (2017) Vliyaniye fretting-korrozii na dolgovечnost' ressor avtomobiley [Influence of fretting corrosion on the durability of vehicle springs] *Gruzovik*, 2, 32-34 [in Russian].
8. Krasnyy V.A., Maksarov V.V., V'yushin R.V. (2013) Vliyaniye tonkosloynnykh nanopokrytiy na fretting-korroziyu vy-sokonagruzhennykh sopryazheniy krupnoga-baritnykh detaley mashin [Influence of Thin-Layer Nanocoatings on Fretting Corrosion of Highly Loaded Mates of Large-Size Machine Parts] *Metallrobootka*, 5-6, 63-67 [in Russian].
9. Il'ichev V.Yu., Nasonov D.A. (2011) Eksperimental'no-analiticheskoye issledovaniye i korrektsiya staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik rezinopal'tsevykh muft [Experimental and analytical research and correction of static and dynamic characteristics of rubber-finger couplings] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, Tula*, 3, 46-52 [in Russian].
10. Abramov B.N. (2015) Vliyaniye konstruksii muft mekhanizma peredvizheniya mostovykh kranov na dinamiku ikh nagruzheniya [The influence of the design of the couplings of the movement mechanism of overhead cranes on the dynamics of their loading]. *Pod'umno-transportnoye delo*, 5-6, 13-16 [in Russian].
11. Putro E.V., Yurko V.I. (2017) Mufty uprugie s paketami kol'tsevykh metallicheskikh membran tip MSK [Elastic couplings with packages of ring metal membranes, type MSK] *Sovremennyye energoeffektivnyye tekhnologii realizatsii inzhenernykh zadach dinamicheskogo oborudovaniya: monografiya*, Sumy, 139-144 [in Russian].
12. Petukhov A.N. (2004) Fretting-korroziya i fretting-ustalost' malopodvizhnykh soedineniy GITD i energeticheskikh mashin. [Fretting corrosion and fretting fatigue of low-mobility GTE joints and power machines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, Khar'kov. 7 (15). 128-134 [in Russian].
13. Malitskiy I. F., Chernyatina E. V. (2014) Vliyaniye sherokhovatosti i sposobov obrabotki na prochnost' sopryazheniya s natyagom [Influence of roughness and processing methods on the strength of interference fit]. *Mashinobudovaniya*. 13. 149-153.
14. Lebed' V.T., Kulachenko A.A. (2008) Optimizatsiya tekhnologii naneseniya pokrytiy v soedineniyakh krupnogabaritnykh sostavnykh valkov dlya povysheniya nesushchey sposobnosti. [Optimization of coating technology in the joints of large-size composite rolls to increase the bearing capacity]. *Nadijnist' instrumentu ta optymizatsiya*

- tehnologichnyh system: zb. nauk. prac'. 23. 240-247 [in Russian].*
15. Kushchenko A.V., Bashkarev A.Ya. (2016) Upravlenie friktsionnymi svoystvami polimidnykh pokrytiy v soedineniyakh s natyagom [Control of the frictional properties of polyimide coatings in tight joints]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 1 (238). 155-162 [in Russian].
 16. Selivanov K.S., Galiakbarov R.F. (2011) Povyshenie fretting-stoykosti detaley mashin kompleksnoy vakuumnoy plazmennoy obrabotkoy [Повышение фреттинг-стойкости деталей машин комплексной вакуумной плазменной обработкой] *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 7 (84). 29-32 [in Russian].
 17. Balatskiy L.T. (1982) Prochnost' pressovykh soedineniy [Strength of press connections]. Kyiv: Tekhnika, 1982. 152 p. [in Russian].
 18. Patent Ukrainy №101715, 23N 9/00. Sposib cementacii' stalevykh detalej elektroerozijnym leguvannjam [Method of cementing steel parts by electro-erosion alloying]. Opubl. 25.01.2013 [in Ukrainian].
 19. Ershov V.M. (2011) Tsementatsiya stal'noy poverkhnosti pri elektroiskrovoy obrabotke grafitom [Cementation of a steel surface during electrospark processing with graphite]. *Sb. nauch. tr. sotrudnikov DonGTU*. 31. 219-225 [in Russian].
 20. Nezhibetskiy G.N., Shkurko A.I. (2017) Vtulki kontsevykh uplotneniy rotora [Rotor end seal sleeves]. *Sovremennye energoefektivnye tekhnologii realizatsii inzhenernykh zadach dinamicheskogo oborudovaniya: monografiya*. 191-193.
 21. Patent Ukrainy №103098, B23H 9/00 B23H 5/00 F16B 4/00 F16B 17/00 C23C 10/00. Sposib vygotovlennja neruhomogo z'jednannja typu valmatochyna stalevykh detalej [A method of manufacturing a fixed shaft-hub connection of steel parts] Opubl. 10.09.2013 [in Ukrainian].
 22. Lesnevskiy L.N. (2009) Fretting-korroziya pokrytiy tipa «tverdaya smazka» v ekstremal'nykh usloviyakh ekspluatatsii [Fretting corrosion of "solid lubricant" coatings under extreme operating conditions]. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. Natsional'naya Tekhnologicheskaya Gruppy*. 2 (18). 2009. 31-35 [in Russian].
 23. Patent Ukrainy na korysnu model' №142811, C23F 15/00 F01D 5/28. Sposib zahystu detalej pary tertja pruzhnoi' mufty vid fretting-korozii' [Method of protecting friction pair parts of elastic coupling from fretting corrosion]. Opubl. 25.06.2020 [in Ukrainian].
 24. Patent Ukrainy №92832, F16D 3/50, S10M 103/00. Sposib formuvannja paketiv gnuchkykh elementiv pruzhnykh muft [Method of forming packages of flexible elements of elastic couplings]. Opubl. 10.12.2010 [in Ukrainian].
 25. Ivanov V.V., Marchenko Yu.V. (2010) Perspektivy primeneniya disulfida molibdena dlya formirovaniya vibratsionnykh mekhanokhimi-cheskikh tverdostmazochnykh pokrytiy. [Prospects for the use of molybdenum disulfide for the formation of vibrating mechanochemical solid lubricants]. *Vestnik DGTU*, v.10. № 3(46). 381-385 [in Russian].
 26. Patent Ukrainy na korysnu model' №137273, F16D 3/70, C10M 103/00. Sposib formuvannja paketiv gnuchkykh elementiv pruzhnykh muft [The method of forming packages of flexible elastic elements]. Opubl. 10.10.2019, bjul. №19 [in Ukrainian].
- Тарельник В'ячеслав Борисович**, д.т.н., проф., зав. каф. технічного сервісу, тел. +38 050-307-25-72, tarelник@i.ua.
Думанчук Михайло Юрійович, ст. викладач каф. технічного сервісу, тел. +38 050-302-62-93, m_duman@i.ua.
Тарельник Наталя В'ячеславівна, к.е.н., доц. каф. проектування технічних систем, тел. +38 066-734-18-06, natasha-tarelник@ukr.net,
Мікуліна Марина Олександрівна, к.е.н., ст. викладач каф. експлуатації техніки, тел. +38 095-612-26-06, marinamikulina1@ukr.net.
 Сумський національний аграрний університет, вул. Г. Контрацьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна.
- Новые технологические методы защиты поверхностей деталей транспортных и подъемных машин от фреттинг-коррозии**
Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения надежности и долговечности подъемных, транспортных и дорожно-строительных машин путем повышения фреттингостойкости различных типов соединений деталей. Предложен ряд конструктивных и технологических методов для борьбы с фреттинговым износом. На базе проведенных экспериментальных исследований даны рекомендации по технологии повышения фреттингостойкости соединений деталей.
Ключевые слова: фреттинг-коррозия, износ, электроискровое легирование, эламирование, металлолакирование.
- Тарельник Вячеслав Борисович**, д.т.н., проф., зав. каф. технического сервиса, tarelник@i.ua, тел. +38 050-307-25-72,
Думанчук Михаил Юрьевич, ст. преподаватель каф. технического сервиса, m_duman@i.ua, тел. +38 050-302-62-93,
Тарельник Наталия Вячеславовна, к.э.н., доц. каф. проектирования технических систем, natasha-tarelник@ukr.net, тел. +38 066-734-18-06,
Микулина Марина Александровна, к.э.н., ст. преподаватель каф. эксплуатации техники, marinamikulina1@ukr.net, тел. +38 095-612-26-06,
 Сумский национальный аграрный университет, ул. Г. Контрацьєва, 160, г. Сумы, 40021, Украина.

New technological methods of protecting the surfaces of the parts of transport and lifting machines against fretting corrosion

Abstract Problem. Damage to the surfaces of parts of transport and lifting machines from fretting wear is accompanied by the emergence of stress concentrators, changes in the mechanical properties of structural elements, weakening of tension and other phenomena, which leads to the destruction of individual structural elements and can cause serious accidents. Thus, the study of the problems of fretting wear, the study of the causes of its occurrence and the development of methods to increase fretting resistance is an urgent task that requires timely solution. **Goal.** The purpose of the work is to increase the reliability and durability of parts of transport and lifting machines by increasing the fretting resistance of joints by forming special coatings on the contact surfaces of the connecting parts. **Methodology.** Both analytical methods of research and experimental check of efficiency of the offered methods of increasing resistance against fretting wear of parts' surfaces were used. **Results.** A study of the influence of various factors on the intensity and features of fretting processes on the contact surfaces of various parts of transport and lifting machines, substantiated the use of methods of electric spark alloying, epilation, metal plating of surfaces subjected to fretting wear. **Originality.** A new method of manufacturing a fixed joint type "Shaft - hub" of steel parts is offered, which provides the increased fatigue strength of the shafts in fixed joints and recommendations are developed

for the materials used and processing modes. A new method of protecting the parts of the elastic coupling from fretting corrosion is proposed, in which a chemical and physical effect is performed on the surface layer of the parts in contact with friction pairs. A new method is offered for protecting flexible elements of elastic couplings from fretting corrosion and increasing their durability in more severe operating conditions, by changing the quality parameters of their surface layers by applying corrosion-resistant lubricants. **Practical value.** The use of the proposed technological methods provides a significant increase in resistance to fretting wear of the parts' surfaces, which is confirmed by the results of the bench tests.

Key words: fretting corrosion, wear, electric spark alloying, epilation, metal plating.

Tarelnyk Viacheslav, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head kaf. technical service, tarelnik@i.ua, tel. +38 050-307-25-72,

Dumanchuk Mykhailo, senior lecturer of the department technical service, tel. +38 050-302-62-93, m_duman@i.ua,

Tarelnyk Natalia, Candidate of Economic Sciences, Assoc. kaf. design of technical systems, tel. +38 066-734-18-06, natasha-tarelnik@ukr.net,

Mikulina Maryna, Candidate of Economic Sciences, Art. teacher of kaf. operation of equipment, tel. +38 095-612-26-06, marinamikulina1@ukr.net, Sумы National Agrarian University, street G. Konratieva, 160, Sумы, 40021, Ukraine.
