

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗАХИСНИХ ВТУЛОК САЛЬНИКОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ МЕЛІОРАТИВНИХ НАСОСІВ

Артем Доценко

аспірант кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування

Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, Суми, Україна, 40000, a.dotsenko.olivija@gmail.com

ORCID: 0009-0000-7230-9435

Олександр Позовний

доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерної механіки імені Володимира

Марцинковського

Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, Суми, Україна, 40007,

o.pozovnyi@sm.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-6910-2369

Наталія Тарельник

доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування технічних систем

Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, Суми, Україна, 40000, natasha-tarelnik@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6304-6925

В'ячеслав Постолатій

аспірант кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування

Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, Суми, Україна, 40000, postolatiivv@gmail.com

ORCID: 0009-0008-6008-0168

Микита Кусков

доктор філософії, старший викладач кафедри надійності та міцності машин і споруд

ім. В. Я. Аніловича

Державний біотехнологічний університет, вул. Алчевських, 44, Харків, Україна, 61002,

nikikuskov@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7204-9872

Метою роботи було підвищення ефективності вузла сальникового ущільнення (СУ) відцентрового насоса, шляхом визначення впливу на втомлювальну міцність, комбінованого покриття (КП), нанесеного на поверхню його захисної втулки (ЗВ), яке складається з екологічно безпечних методів: цементації електроіскровим легуванням (ЦЕІЛ), нанесення металополімерних матеріалів (МПМ), армованих порошком нікелю і безабразивної фінішної обробки (БУФО).

На прикладі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T, розроблена методика, яка дозволяє визначати вплив покриттів, нанесених на поверхні плоских зразків металевих деталей, на їх втомну міцність. Для визначення втомної міцності плоских зразків металевих деталей, розроблений і запропонований для використання спеціальний стенд (патент UA 159319 U). Дослідження втомної міцності плоских сталевих зразків, яке відбувалось шляхом рахування числа циклів їх згинання до руйнування, показали, що втомна міцність зразків, виконаних зі сталі 12X18H10T, відповідно, на 32,0 і 20,7 % більше ніж у зразків, виготовлених зі сталей 40X і 30X13. ЦЕІЛ поверхонь плоских зразків, виготовлених зі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T, зменшує їх втомну міцність, відповідно на 13,6; 16,3 і 17,6 % в порівнянні зі зразками без покриття. Нанесення на цементовану методом ЕІЛ поверхню зразків, виготовлених зі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T, металопластичних матеріалів, армованих порошком нікелю відповідно, на 2,0; 3,4 і 5,3 % збільшує їх втомну міцність, а проведення наступної БУФО збільшує її показники, відповідно на 3,2; 6,9 і 7,0 % по відношенню до незміцнених зразків.

Ключові слова: втомна міцність, сальникове ущільнення, насос, металополімерні матеріали, комбіновані покриття, металорізальний інструмент, знос, шорсткість, екологічна безпека.

Постановка проблеми. Сальникові ущільнення (СУ) відцентрових насосів меліоративних систем є одним з відповідальних вузлів, які лімітують термін ефективної роботи гідравлічної машини. Згідно дослідженням, які були проведені асоціацією ущільнень в Західній Європі, майже в 85 % насосах використовуються СУ [1], що пояснюється дуже простою конструкцією та низькою вартістю.

У вузлі радіального сальникового ущільнення, представленого на рисунку 1 сальникова набивка, розташована в корпусі (1) [2]. Вона складається з розрізних кілець (2), які стискаються з захисною втулкою (ЗВ) 3. Завдяки стисканню в осьовому напрямку розрізних кілець вони, з одного боку притискаються до корпусу, а з іншого до втулки і таким чином забезпечують потрібну герметичність.

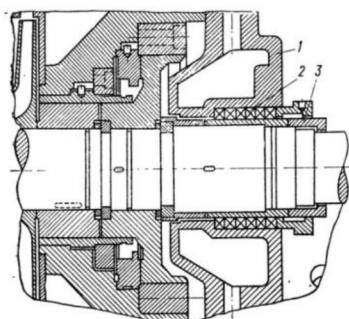


Рис. 1. Схема вузла сальникового ущільнення: 1 – корпус; 2 – кільця сальника; 3 – захисна втулка [2]

Під час роботи насосу поверхневі шари ЗВ підлягають різним руйнівним впливам. По-перше, це абразивне зношування і фреттинг-процес, а по друге – негативний вплив оточуючого середовища, так як в проточній частині крім гідроабразивного середовища часто присутнє коло, яке складається з рідких агрономічних препаратів, тощо.

Крім негативних процесів, що діють на поверхневий шар ЗВ, вона підлягає знакозмінним навантаженням, що виникають внаслідок постійної вібрації валу ротора під час роботи насосу. Тому дослідження направлені на підвищення зносостійкості поверхневого шару і втомлювальної міцності ЗВ актуальні.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Для захисту поверхневого шару деталей від руйнівних процесів існує низка зміцнюючих технологій, кожна з яких має як переваги, так і недоліки. В [3] автори пропонують замінити матеріал серійних втулок СУ насосів зі сталі 45 на сталь У8, поверхневий шар яких піддають електромеханічному зміцненню, в результаті дії якого зносостійкість підвищується у 6,1 рази.

В останні роки дуже популярними методами створення в поверхневих шарах деталей, як спеціальних міцних структур, так і нанесення на них захисних покриттів, набувають методи, що використовують концентровані потоки енергії (КПЕ) [4]. Це лазерна обробка, іонне азотування, конденсована іонна бомбардировка тощо. До КПЕ слід віднести і метод електроіскрового легування (ЕІЛ), який з кожним роком все більше використовується в зміцнюючих і ремонтних технологіях. Наряду з низькою переваг (екологічна безпека, можливість нанесення на поверхню деталі любых струмопровідних матеріалів, локальність проведення процесу, відсутність геометричних змін деталі тощо) метод має і недоліки, основними з яких є збільшення шорсткості поверхневих шарів і зниження втомленої міцності) [5].

Для усунення недоліків ЕІЛ використовують наступну обробку сформованого поверхневого шару методом поверхневої пластичної деформації: обкатуванням кулькою (ОК), алмазним вигладжуванням (АВ), а також методом БУФО (безабразивної ультразвукової фінішної обробки), яка з кожним роком стає більш популярною [6].

Традиційно в якості матеріалу ЗВ насосів використовують: сталь 20, сталь 45, сталь 40Х тощо. Для захисту втулок СУ від абразивного зношування і негативного впливу середовища, для їх виготовлення в якості матеріалів використовують нержавіючі сталі (30Х13, 12Х18Н10Т та інші), які забезпечують високу міцність, зносостійкість і корозійну стійкість [7].

Нами, для захисту сталевих втулок СУ насосів від зношування запропонований новий спосіб, який включає цементацію методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ) [8], обробку БУФО, нанесення на отриману поверхню металополімерного матеріалу (МПМ), армованого металевим порошком.

Слід відмітити, що спосіб ЦЕІЛ [8], полягає в електроіскровому легуванні поверхневого шару сталевих поверхонь деталей вуглецевим електродом. Під час ЕІЛ температура в локальному місці поверхні деталі досягає 10 000 °С, що стимулює насичування поверхневого шару вуглецем. При цьому температура решти ділянок деталі, при найвищих режимах обробки (енергії розряду), не перебільшує 100 °С. Таким чином, відбувається насичення поверхневого шару вуглецем, з одночасним нагріванням до високої температури і швидке охолодження за рахунок маси деталі. Це дає підстави для того, щоб цей процес вважати альтернативним методом цементації при хіміко-термічній обробці. Метод ЦЕІЛ має ряд переваг перед традиційним

методом цементації: процес ЦЕІЛ є екологічно безпечним, при ньому відсутні поводки і зміна геометричних параметрів деталі, його можна проводити в окремих (локальних) місцях не захищаючи інші ділянки від процесу обробки, на два порядки менший час обробки (продуктивність) тощо. Незважаючи на значні переваги, метод ЦЕІЛ має недоліки (збільшення шорсткості поверхні і зниження втомної міцності). Ці недоліки, як згадувалось вище, усуваються за рахунок, як нанесення МПМ, так і БУФО.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення ефективності вузла СУ відцентрового насосу, шляхом визначення впливу на втомну міцність, комбінованого покриття (КП), нанесеного на поверхню захисної втулки, яке складається з екологічно безпечних методів: ЦЕІЛ, нанесення МПМ і БУФО.

Задачі дослідження:

- оцінити вплив матеріалу деталі (захисної втулки) на втомну міцність;
- визначити вплив ЦЕІЛ на втомну міцність;
- визначити вплив МПМ, армованого порошком нікелю і нанесеного на поверхню деталі, після ЦЕІЛ, на втомну міцність;
- визначити вплив БУФО на втомну міцність зразків з комбінованим покриттям: ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком нікелю + фрезерування на глибину до вершин шорсткості.

Науковою новизною є те, що вперше визначений вплив втомної міцності деталі, після нанесення МПМ, армованого порошком нікелю, на цементовану методом ЕІЛ поверхню.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень використовували зразки, виготовлені зі сталей 40Х, 30Х13 і 12Х18Н10Т у вигляді пластин, розміром $82 \times 15 \times 2,7$ мм (рис. 2).

Для проведення досліджень плоских зразків на втомну міцність був розроблений і виготов-



Рис. 2. Сталеві зразки для проведення дослідів на втомлювальну міцність

лений стенд [9] (рис. 3), який включає: станину з підшипниковими опорами 3; лічильник циклів 1; електропривід 2, що приводить в дію ексцентриковий механізм 4, з'єднаний з вузлом механізму кріплення зразків, у якому, вузол механізму кріплення зразків включає першу, розрізну, поздовжню планку 5 внутрішня бічна поверхня верхньої частини якої прилягає до зверненої до неї зовнішньої бічної поверхні кінцевої ділянки кожного з досліджуваних зразків 6 і 7 і другу, поздовжню планку 8 з двома індивідуальними отворами для закріплення досліджуваних зразків 6 і 7, при цьому друга планка 8 підтримується від прогину опорою а перша, розрізна, планка 5 з'єднана з ексцентриковим механізмом 4 і за один оборот двигуна здійснює один цикл прогину зразків 6 і 7, що підлягають дослідженню, при цьому нижня частина першої, розрізної, планки 5 і друга планка 8 знаходяться в одній площині та на відстані довжини досліджуваних зразків одна від одної.

Амплітуда прогину зразків може змінюватись від 1,0 до 5,0 мм. При проведенні досліджень вона складала 1,0 мм.

Поверхні зразків шліфували до $Ra = 0,5$ мкм, а потім, в місцях кріплення, по краю поздовжньої планки 5 і 8, на відстані ~ 10 мм від ліній згину,

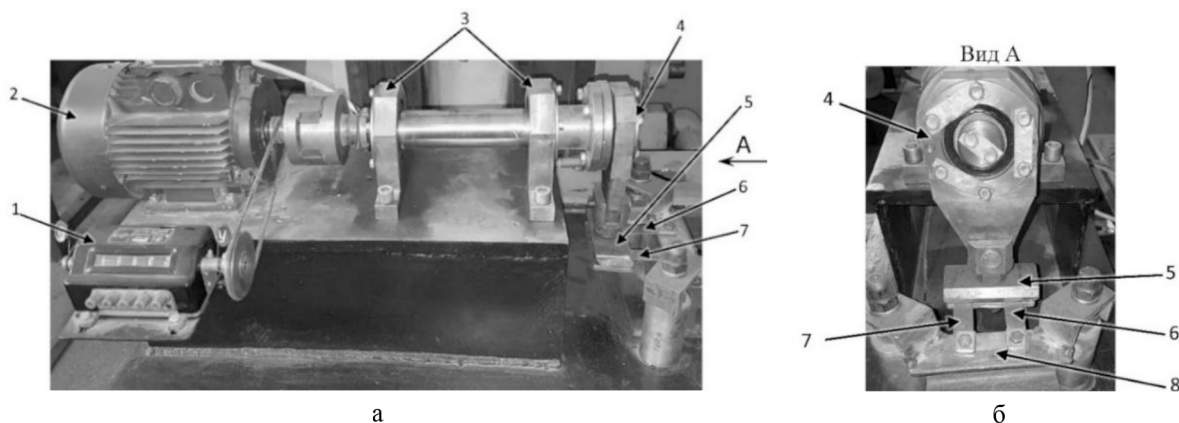


Рис. 3. Фотографічне зображення головного виду стенду для дослідження плоских зразків на втомлювальну міцність (а) і Вид А (б) [9]

поверхні зразків обробляли різними методами: ЦЕІЛ, ЦЕІЛ + МПМ, ЦЕІЛ + МПМ + фрезерування + БУФО (рис. 4).

Для проведення порівняльних іспитів зі сталей (40Х, 30Х13 і 12Х18Н10Т), виготовляли по 4 серії зразків:

- в 1-й серії зразки не обробляли (рис. 2);
- в 2-й серії (рис. 4, а) зразки обробляли методом ЕІЛ на установці моделі «Елітрон-52А» з використанням електроду інструменту (ЕІ) з графіту, тобто піддавали ЦЕІЛ з енергією розряду $W_p = 6,8$ Дж і продуктивністю $Q = 0,2$ см²/хв.
- в 3-й серії (рис. 4, б) зразки спочатку обробляли як в другій серії, потім наносили МПМ, який складався з двокомпонентної епоксидної системи, наповненої ферросиліконом марки Loctite 3478, армованої порошком нікелю марки ПНЕ (ГОСТ 972297) з концентрацією в полімерному матеріалі ~ 60 %;

– в 4-й серії (рис. 4, в) зразки обробляли як і в третій серії, потім проводили часткове видавлення (фрезеруванням), сформованого поверхневого шару і на базі фрезерного верстата проводили БУФО із застосуванням магнітострикційного перетворювача ПМС-39 та ультразвукового генератора УЗУ-030.

Результати досліджень. При роботі стенду, зразки згинаються, а потім руйнуються (рис. 5) в місцях кріплення, по краю поздовжньої планки 8.

В таблиці 1 приведені зведені дані результатів дослідження зразків сталей 40Х, 30Х13 і 12Х18Н10Т на втомлювальну міцність.

Аналіз таблиці 1 показує, що найбільшу кількість циклів до руйнування (65441 цикл), серед зразків без покриття, мають зразки виконані зі сталі 12Х18Н10Т, що, відповідно, на 32,0 і 20,7 % більше ніж у сталі 40Х і 30Х13.

В результаті проведення наступної цементації методом ЕІЛ кількість циклів до руйнування зраз-

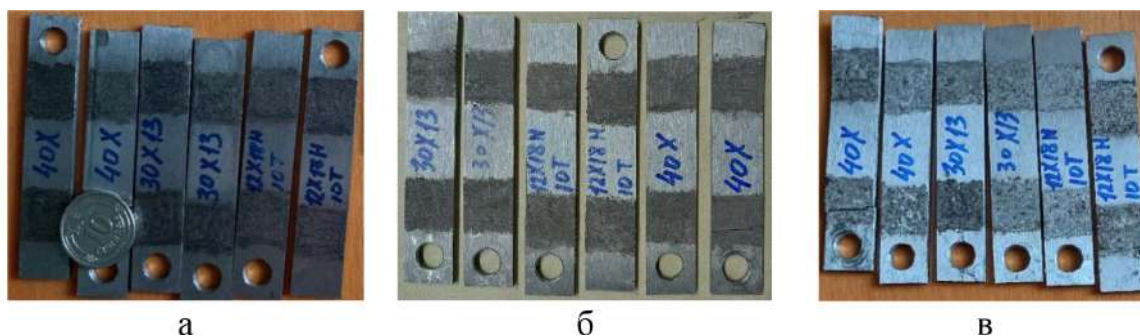


Рис. 4. Сталеві зразки для проведення дослідів на втомну міцність:

а – після ЦЕІЛ, б – після ЦЕІЛ + МПМ, в – ЦЕІЛ + МПМ + фрезерування + БУФО

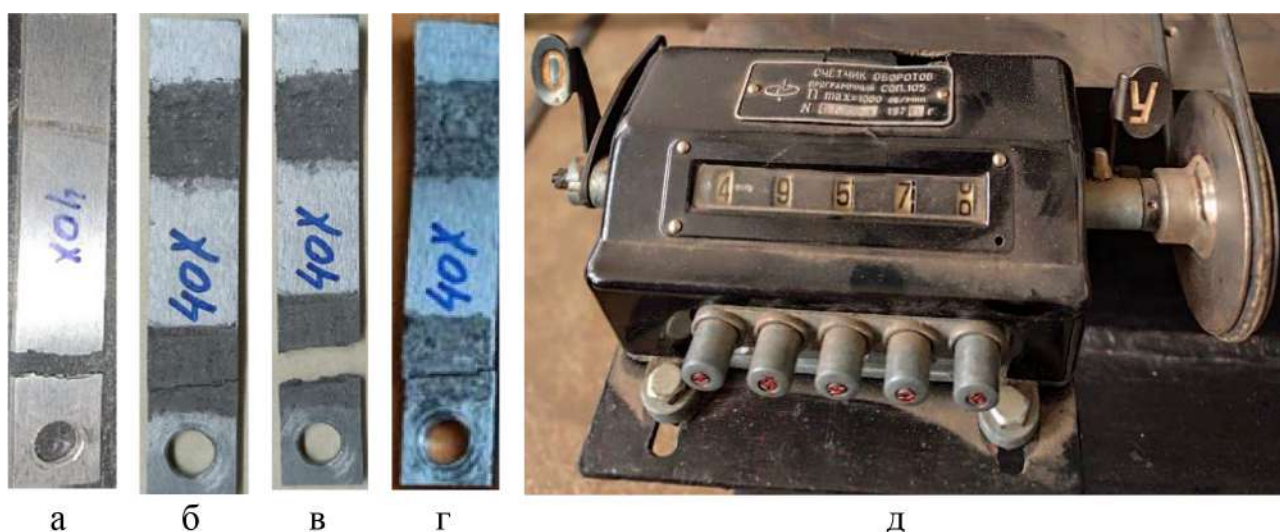


Рис. 5. Руйнування зразків:

а – без обробки; б і в – після нанесення МПМ; г – після БУФО; д – кількість циклів згинання після руйнування зразка сталі 40Х без обробки 49 579 циклів

ків зі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T зменшується, відповідно до 43 630; 46 643 і 55 624 циклів, що, відповідно, на 13,6; 16,3 і 17,6 % менше ніж у зразків без покриття.

Наступна обробка сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T металополімерними матеріалами, армованими порошком нікелю, відповідно, на 2,0; 3,4 і 5,3 % збільшує число циклів до руйнування чим після ЦЕЛ.

Після наступної БУФО сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T, кількість циклів до руйнування по відношенню до незміцнених зразків збільшується, відповідно на 3,2; 6,9 і 7,0 %.

Висновки:

1. Результати проведених досліджень мають практичне значення, вони можуть бути корисними для спеціалістів підприємств, які займаються зміцненням поверхневих шарів деталей при їх виготовленні і відновленні.

2. Для визначення втомленої міцності плоских зразків металевих деталей розроблений і запропонований для використання спеціальний стенд (патент UA 159319 U).

3. Дослідження втомної міцності плоских сталевих зразків, шляхом рахування числа циклів їх згинання до руйнування, показали, що втомна

міцність зразків, виконаних зі сталі 12X18H10T, відповідно, на 32,0 і 20,7 % більше ніж у зразків, виготовлених зі сталей 40X і 30X13.

4. ЕІЛ поверхонь плоских зразків, виготовлених зі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T, графітовим електродом-інструментом, зменшує їх втомну міцність, відповідно на 13,6; 16,3 і 17,6 % в порівнянні зі зразками без покриття.

5. Нанесення на цементовану методом ЕІЛ поверхню зразків, виготовлених зі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T, металопластичних матеріалів, армованих порошком нікелю відповідно, на 2,0; 3,4 і 5,3 % збільшує їх втомну міцність, а проведення наступної БУФО збільшує її показники, відповідно на 3,2; 6,9 і 7,0 % по відношенню до незміцнених зразків.

6. В подальших дослідженнях планується провести дослідження, спрямовані на підвищення зносостійкості сталевих поверхонь захисних втулок сальникових ущільнень відцентрових насосів, працюючих в умовах підвищеної корозійної і абразивної активності меліоративних систем, шляхом нанесення на їх поверхню зносостійких композиційних покриттів, сформованих комбінованими екологічно безпечними методами.

Таблиця 1

Результати досліджень сталевих зразків на втомну міцність

Обробка поверхні зразка	Глибина зміцненого шару, $h_{\text{ш}}$, мкм	Шорсткість, R_z , мкм	Твердість, HV	Число циклів, N
Сталь 40X				
Без покриття	—	2,5	460	49 579
ЦЕЛ	910	63,2	1050	43 630
ЦЕЛ + МПМ, армований 60 % порошком нікелю	901	2,7	1020	44 502
ЦЕЛ + МПМ, армований 60 % порошком нікелю + фрезерування + БУФО	930	1,4	1060	51 177
Сталь 30X13				
Без покриття	—	2,6	380	54 236
ЦЕЛ	860	65,4	1100	46 643
ЦЕЛ + МПМ, армований 60 % порошком нікелю	850	3,0	1090	48 270
ЦЕЛ + МПМ, армований 60 % порошком нікелю + фрезерування + БУФО	875	1,5	1150	58 032
Сталь 12X18H10T				
Без покриття	—	2,5	185	65 441
ЦЕЛ	250	68,8	1101	55 624
ЦЕЛ + МПМ, армований 60 % порошком нікелю	260	3,2		58 570
ЦЕЛ + МПМ, армований 60 % порошком нікелю + фрезерування + БУФО	245	1,5	1120	70 022

ЛІТЕРАТУРА

1. Gaft J., Marcinkowski M. A choice of the seal for the shaft of the pump. *Proceeding of the Pump Users International Forum*, 29–30 sept. 2004, Karlsruhe, 2004. P. 37–44.
2. Панченко В. О., Герман В. Ф., Івченко О. В., Євтухов А. В., Жигилій Д. О. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій: навч. посіб. Суми : Сумський державний університет. 2020. 270 с.
3. Куликівський В. Л., Орел В. О. Механічні властивості поверхневого шару захисних втулок після електромеханічного поверхневого загартовування. *Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2024 року)*. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2024. С. 312–315.
4. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V. Electric-Spark Alloying of Metal Surfaces with Graphite. *Progress in Physics of Metals*. 2022. Vol. 23, No. 1. P. 27–58.
5. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Loboda V. B., Konoplyanchenko, E. V., Martsynkovskiy V. S., Semirnenko Yu. I., Tarelnyk N. V., Mikulina M. A., Sarzhanov B. A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 2021. Vol. 57. P. 173–184. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
6. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Martsynkovskiy V. S., Tarelnyk N. V., Vasylenko O. O. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.02.0173>
7. Sapozhnykov Y., Zahorulko A. Computational studies of stuffing box packing seal wear mechanism using the Archard model. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29, No. (2/112). P. 6–15. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-112-2-6-15>
8. Спосіб цементції сталевих деталей електроерозійним легуванням: пат. 82948 Україна. № а200609804; заявл. 13.09.2006; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10.
9. Стенд для трибологічного дослідження плоских зразків металевих деталей для визначення їх втомної міцності: пат. 159319 Україна. № u202402056; заявл. 18.04.2024; опубл. 14.05.2025, Бюл. № 20/2025.

INVESTIGATION OF THE FATIGUE STRENGTH OF PROTECTIVE SLEEVES IN GLAND SEALS OF IRRIGATION PUMPS

Artem Dotsenko

Postgraduate Student at the Department of Technical Service
Sumy National Agrarian University, 160 Herasyma Kondratieva str., Sumy, Ukraine, 40000,
a.dotsenko.olivija@gmail.com
ORCID: 0009-0000-7230-9435

Oleksandr Pozovnyi

Doctor of Philosophy, Senior Lecturer at the Department of Computer Mechanics named after Volodymyr Martsynkovskyy
Sumy State University, 116 Kharkivska str., Sumy, Ukraine, 40007, o.pozovnyi@cm.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6910-2369

Nataliia Tarelnyk

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Technical System Designs
Sumy National Agrarian University, 160 Herasyma Kondratieva str., Sumy, Ukraine, 40000,
natasha-tarelnik@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6304-6925

Viacheslav Postolatii

Postgraduate Student at the Department of Technical Service
Sumy National Agrarian University, 160 Herasyma Kondratieva str., Sumy, Ukraine, 40000,
postolatiiv@gmail.com
ORCID 0009-0008-6008-0168

Mykyta Kuskov

Doctor of Philosophy, Senior Lecturer Department of Reliability and Strength of Machines in Structures named after V. Ya. Anilovich

State Biotechnological University, 44 Alchevskikh str., Kharkiv, Ukraine, 61002, nikikuskov@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7204-9872

The aim of this study was to improve the performance of the gland seal (GS) assembly of a centrifugal pump by determining the effect of a combined coating (CC) applied to the surface of its protective sleeve (PS) on fatigue strength. The coating system incorporates environmentally benign surface-engineering methods, including cementation by electrospark alloying (ESA), application of metal-polymer materials (MPM) reinforced with nickel powder, and non-abrasive finishing treatment (NAFT).

Using steels 40X, 30X13, and 12X18H10T as case-study materials, a methodology was developed to assess the influence of coatings applied to flat specimens of metallic components on their fatigue strength. A dedicated test rig (Ukrainian Patent UA 159319 U) was designed and proposed for evaluating the fatigue performance of flat metallic specimens. Fatigue tests, conducted by counting the number of bending cycles to failure, demonstrated that specimens fabricated from steel 12X18H10T exhibit fatigue strength values 32.0 % and 20.7 % higher than those of specimens made from steels 40X and 30X13, respectively. Electrospark alloyed surfaces of flat specimens made of steels 40X, 30X13, and 12X18H10T showed reductions in fatigue strength of 13.6 %, 16.3 %, and 17.6 %, respectively, compared with uncoated specimens. Subsequent deposition of metal-polymer materials reinforced with nickel powder on ESA-treated surfaces increased fatigue strength by 2.0 %, 3.4 %, and 5.3 % for steels 40X, 30X13, and 12X18H10T, respectively. Final NAFT processing further improved fatigue performance by an additional 3.2 %, 6.9 %, and 7.0 % relative to unstrengthened specimens.

Key words: fatigue strength, gland seal, pump, metal-polymer materials, combined coatings, cutting tools, wear, surface roughness, environmental safety.

REFERENCES

1. Gaft, J., Marcinkowski, M. (2004). A choice of the seal for the shaft of the pump. Proceeding of the Pump Users International Forum, 29–30 sept. 2004, Karlsruhe, 2004. P. 37–44.
2. Panchenko, V. O., Herman, V. F., Ivchenko, O. V., Yevtukhov, A. V., Zhyhylyi D. O. (2020). [Controlled operation of pumping station equipment]: navch. posib. Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet. 2020. 270 s.
3. Kulykivskiy, V. L., Orel, V. O. (2024). [Mechanical properties of the surface layer of protective sleeves after electromechanical surface hardening]. Zbirnyk tez dopovidei XKhV Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii “Suchasni problemy zemlerobskoi mekhaniky” (17–19 zhovtnia 2024 roku). MON Ukrainy, Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Kyiv, 2024. S. 312–315.
4. Tarelnyk, V. B., Gaponova, O. P., Konoplianchenko, Ye. V. (2022) Electric-Spark Alloying of Metal Surfaces with Graphite. *Progress in Physics of Metals*. 2022. Vol. 23, No. 1. P. 27–58.
5. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Loboda V. B., Konoplyanchenko, E. V., Martsinkovskii V. S., Semirnenko Yu. I., Tarelnyk N. V., Mikulina M. A., Sarzhanov B. A. (2021) Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2021. Vol. 57. P.173–184. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
6. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Martsynkovskyy V. S., Tarelnyk N. V., Vasylenko O. O. (2019) Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings. *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192. DOI: 10.15407/mfint.41.02.0173
7. Sapozhnykov Y., Zahorulko A. (2024) Computational studies of stuffing box packing seal wear mechanism using the Archard model. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29, No. (2/112). P. 6–15. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-112-2-6-15>
8. Method of carburizing steel parts by electroerosion alloying: pat. 82948 Ukraina. № a200609804; zaiavl. 13.09.2006; opubl. 26.05.2008, Biul. № 10.
9. Stand for tribological research of flat samples of metal parts to determine their fatigue strength: pat. 159319 Ukraina. № u202402056; zaiavl. 18.04.2024; opubl. 14.05.2025, Biul. № 20/2025.



Стаття надійшла 15.11.2025

Стаття прийнята 05.12.2025

Опубліковано 30.12.2025