

Н.В. Тарельник¹, О.П. Гапонова²

¹Сумський національний аграрний університет

²Сумський державний університет

НОВИЙ СПОСІБ ЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОСУ І РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ

В результаті проведених досліджень розроблений новий спосіб захисту сталевих деталей ДО атомних електростанцій, на основі методу ЕІЛ. Він полягає в формуванні на їх робочих поверхнях композиційних покриттів, що отримані в послідовності: цементация ЕІЛ (ЦЕІЛ) → ЕІЛ Al → ЕІЛ (90% WC+10% ІМ) → МПМ, армований порошком карбиду вольфраму, або нітриду цирконію, або їх сумішшю. Експериментальними дослідженнями встановлено, що кращою стійкістю проти гідроабразивного зношування мають зразки з корозійностійкої нержавіючої сталі 12Х18Н10Т з покриттями, що отримані в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ (90% WC+10% ІМ) → МПМ (80% ZrN).

Ключові слова: електроіскрове легування, атомна електростанція, динамічне обладнання, гідроабразивний знос, деталь, цементация, алітування, покриття, металополімерний матеріал.

Tarelnyk N.V., Gaponova O.P.

NEW PROCESS FOR PROTECTING STEEL COMPONENT PARTS OPERATING ON CONDITIONS OF HYDROABRASIVE WEAR AND RADIATION EXPOSURE

Based on the ESA method, in the consequence of the research, a new process for protecting the DE steel parts for nuclear power plants has been developed. It consists in the formation of composite coatings on the above part working surfaces. The above composite coatings have been obtained in the sequence: ESA (CESA) carburizing → ESA Al → ESA (90% of WC+10% IM) [(90% of WC+10% IM)] → MPM reinforced with tungsten carbide powder or zirconium nitride, or their mixture. The experimental investigations have stated that the specimens made of corrosion-resistant stainless steel of 12X18H10T (12Kh18N10T) grade with coatings obtained in the sequence of CESA → ESA Al → ESA (90% of WC+10% IM) [(90% of WC+10% IM)] → MPM (80% of ZrN) were of the best resistance to hydro abrasive wear. The wear values, respectively, were by 96.7; 110.3, and 128% less than those of the specimens without coatings made of steel 45, steel 12X18H10T (12Kh18N10T), and steel 06X12H3ДЛ (06Kh12N3DL).

Key words: electrospark alloying, nuclear power plant, dynamic equipment, hydro abrasive wear, part, carburizing, aluminizing, coating, metal-polymer material.

Постановка проблеми.

Більшість деталей динамічного обладнання (ДО) атомних електростанцій (АЕС) (насосів, воздуходувок, центрифуг та ін.) працюють у важких умовах. Це високі режимні параметри (швидкості, тиски, перепади температури від підвищених до криогенних), радіаційне опромінювання тощо. Крім цього, вони піддаються абразивному, ерозійному, фреттінговому, водневому та іншим негативним впливам робочих середовищ. Враховуючи те, що вихід з ладу в міжремонтний період однієї з відповідальних деталей, потребує негайної (терміном декілька хвилин) її заміни, то основними вимогами до цих деталей є, перш за все, надійність. Роботи направлені на вдосконалення існуючих і розробці нових технологій підвищення надійності деталей обладнання АЕС і захисту їх від руйнування є актуальними, необхідними і потрібними уже сьогодні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зношування і руйнування відповідальних деталей в сполучених парах тертя призводить до втрати ряду необхідних характеристик машини, в наслідку чого знижується їх працездатність, зменшується продуктивність, що не дозволяє їм виконувати необхідні функціональні дії [1].

Такими деталями є опорні й упорні підшипники ковзання високошвидкісних турбомашин [2, 3], контактні та безконтактні торцеві ущільнення [4, 5], підп'ятники [6], шийки валів [7, 8] тощо. В [9] авторами визначений знос, який супроводжує роботу деталей вузлів тертя всіх машин.

Особливе місце серед методів, що забезпечують потрібні функціональні властивості робочих поверхонь деталей, яких на сьогодні існує велика кількість, займають технології, що використовують концентровані потоки енергії (КПЕ). Це плазмова обробка [10, 11], лазерна обробка [12], електронно-променева [13] тощо та їх комбінації. Найбільш поширені процеси КПЕ зазвичай характеризуються високою вартістю обладнання та, іноді, тривалим часом осадження. Крім того, деякі з них не застосовуються для ремонту деталей, що обмежує галузі їх застосування.

На сьогодні набув розвитку новий екологічно чистий метод, здатний подолати обмеження, викладені вище, - електроіскрове легування (ЕІЛ). Завдяки своїй ефективності, простоті,

економічності та низькій витраті тепла ця технологія довела свою ефективність як для покращення властивостей поверхні, таких як жаро- та зносостійкість, підвищена твердість і стійкість до корозії, так і для ремонту виробів дорогого обладнання [14].

В [15] авторами розроблений новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу. Апробацію способу формування комбінованих електроерозійних покриттів виконували на зразках з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 та жароміцної, корозійностійкої конструкційної сталі 12X18H10T. Технологія використання нового способу полягала в наступному. Спочатку поверхні сталевих деталей шліфували до $Ra=0,5$ мкм, після чого на шліфованій поверхні формували електроіскрове покриття (ЕІП), здійснюючи цементацію шліфованої поверхні деталей методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ), після цього виконували алітування цементованого шару методом ЕІЛ алюмінієвим електродом-інструментом (ЕІ) з подальшим нанесенням на нього ЕІП електродом з композиційного зносостійкого матеріалу, отриманого за допомогою порошкової металургії (ПМ), складу 90% ВК6+10% 1М, де 1М – 70% Ni+20% Cr+5% В+5% Si. Далі поверхню сформованого КЕП піддавали полімеризації металополімерним матеріалом (МПМ), армованим при полімеризації порошком карбиду вольфраму WC і/або нітриду цирконію ZnN або їх сумішшю WC+ZnN. Потім частину поверхневого шару МПМ видаляли до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90% ВК6+10% 1М.

Слід відмітити, що наявність кобальту в покритті не дозволяє використовувати його в деталях, які піддаються радіаційному опроміненню [16, 17]. Тому, в подальших дослідженнях, після алітування, згідно патенту [18] замість композиційного зносостійкого матеріалу, отриманого за допомогою ПМ, складу 90% ВК6+10% 1М, на алітовану поверхню методом ЕІЛ наносили шар свинцю, після чого на вкрити свинцем поверхню методом ЕІЛ наносили зносостійкий композитний матеріал ЕІ, виготовлений методом ПМ з композитного матеріалу 90% WC+10% 1М. Після цього поверхню сформованого КЕП піддавали обробці МПМ, армованим порошком карбиду вольфраму WC і/або нітриду цирконію ZnN або їх сумішшю WC+ZnN. Потім частину поверхневого шару МПМ видаляли до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90% WC+10% 1М.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення довговічності сталевих деталей динамічного обладнання АЕС, шляхом розробки технології формування на їх поверхнях композиційних покриттів, синтезованих за допомогою екологічно безпечних технологій ЕІЛ з наступним нанесенням МПМ, для підвищення здатності чинити опір зношуванню, гарантування надійності та довговічності роботи деталей в агресивних середовищах.

Методика досліджень.

Випробовування способу формування композиційних покриттів (КП) виконували на зразках розміром 15x15x8 мм з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45, з якої виконуються деталі ДО АЕС (втулки, фланці, полумуфти тощо); жароміцної, аустенітної сталі 12X18H10T та сталі 06X12H3ДЛ мартенситно-аустенітного класу, з яких виготовляють деталі для головних циркуляційних насосів (ГЦН), відповідно, нижній підшипник ковзання, корпус ущільнення і равик.

З метою оцінки гідроабразивної зносостійкості покриттів, синтезованих за різною технологією, проводилися випробування на зношування. Інтегральний ваговий знос визначався за втратою маси зразка протягом 24 годин. Зразки зважували на аналітичних вагах через кожні 8 годин. В таблиці 1 представлені серії зразків з покриттями для випробувань.

Табл. 1

Зразки зі сталей 45, 12X18H10T і 06X12H3ДЛ для порівняльних випробувань проти гідроабразивного зношування

№ зразка	Вид зміцнення
1	Без зміцнення
2	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ 1М
3	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М)
4	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 80% WC
5	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN
6	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 80% ZrN

Слід відмітити, що покриття зразка №3 однакове з зразком №2, тільки в останньому шарі, замість матеріалу 1М, наносять при $W_p = 0,27-0,39$ Дж зносостійкий матеріал, ЕІ, виготовлений методом ПМ з композитного матеріалу 90% WC+10% 1М. Покриття зразка №4 відрізняється від зразка №3, тим, що на нього, ретельно втираючи, наносять МПМ, попередньо армований порошком у вигляді WC, доданому в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену ферросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини $\sim 80\%$. Після полімеризації шар МПМ проточували до виступів шорсткості покриття з композитного матеріалу 90% WC+10% 1М. Покриття зразка №5 відрізняється від зразка №4 тим, що МПМ армований порошком 40% WC+ 40% ZrN, а покриття зразка №6 від зразка №5, тим, що МПМ армований порошком 80% ZrN.

Для проведення ЦЕІЛ, алітування і нанесення композиційних зносостійких матеріалів: 1М і 90% WC+10% 1М використовували установку ЕІЛ моделі "Елітрон-52А", що забезпечує енергію розряду W_p в діапазоні 0,05-6,80 Дж. Алюміній наносили ЕІ, з алюмінієвого дроту діаметром 3,0 мм марки АТ при $W_p=3,4$ Дж, а ЦЕІЛ виконували графітовим ЕІ при $W_p=3,4$ Дж.

Слід відмітити, що композиційні зносостійкі матеріали: 1М і 90% WC+10% 1М можна наносити при енергії розряду $W_p = 0,13-3,4$ Дж. Зменшення енергій розряду нижче $W_p=0,13$ Дж недоцільно в зв'язку з низькою продуктивністю. Збільшення енергій розряду вище ніж $W_p=3,4$ Дж призводить до різкого зниження суцільності покриття.

Величина продуктивності обробки (Q), тобто кількість 100 % обробленої площини в одиницю часу ($\text{см}^2/\text{хв}$) приймалась згідно рекомендацій підприємств, що виготовляють устаткування для ЕІЛ (табл. 2).

Табл. 2

Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду

Енергія розряду (W_p), Дж	0,13	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність(Q), $\text{см}^2/\text{хв}$	0,4-0,6	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

Для проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношування розроблено конструкцію та виготовлено дослідну установку, яка розташовується і закріплюється на столі свердлильного верстата (рис. 1, а). Установка складається з бака (рис. 1, б), в який заливається водна суміш піску з розміром частинок 0,15–0,55 мм і концентрацією 50 г/л (рис. 1, е). В бак опускали ротор, який верхнім кінцем, закріплюється в патроні верстата і обертається разом з його шпинделем. Нижня частина ротора виконана у вигляді крюка (рис. 1, г), який при обертанні збаламує водну суміш, абразивні частки якої контактують з поверхнею досліджуваних зразків, закріплених окремо в шести тримачах, розташованих на рівній відстані між собою на диску, закріпленому на роторі. Зверху на бак надівали кришку (рис. 1, в) у вигляді крильчатки, лопаті якої розташовані під кутом, що не дає водній суміші розбризкуватись.

Зразки фіксували на диску за допомогою тримачів (рис. 1, д). Кріплення тримача до диска дозволяє змінювати кут контакту зразка з абразивом. В процесі випробувань зразки, закріплені під кутом 45° , обертались зі швидкістю 120 об / хв.

Результати досліджень.

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 45

В результаті проведених досліджень встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 2, табл. 3).

Зразки №6 з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛ Al \rightarrow ЕІЛ Pb \rightarrow ЕІЛ (90% WC+10% 1М) \rightarrow МПМ, армований порошком 80%ZrN, знос яких на 92,3% менше зразків без покриття, на 56,4% менше в порівнянні з покриттям №2 - ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛ Al \rightarrow ЕІЛ Pb \rightarrow ЕІЛ 1М, на 35,9 % менше в порівнянні з покриттям №3 - ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛ Al \rightarrow ЕІЛ Pb \rightarrow ЕІЛ (90% WC+10% 1М); і, відповідно, на 10,3 (№5) і на 15,4 (№4) %, менше сформованих в послідовності ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛ Al \rightarrow ЕІЛ Pb \rightarrow ЕІЛ (90% WC+10% 1М) \rightarrow МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN і ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛ Al \rightarrow ЕІЛ Pb \rightarrow ЕІЛ (90% WC+10% 1М) \rightarrow МПМ, армований порошком 80% WC.

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 12X18H10T

При проведенні порівняльних досліджень зразків із сталі 12X18H10T встановлено, що їх знос менший ніж зразків зі сталі 45, але характер розподілу, згідно зі стійкістю проти гідроабразивного зносу, співпадає. Тут також найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 3, табл. 4).

В результаті проведених досліджень встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 3, табл. 4).



а



б



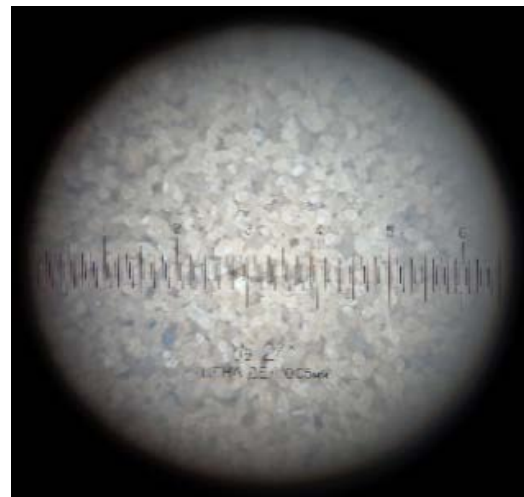
в



г



д



е

Рис. 1. Конструкція дослідної установки проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношування: а – фото загального вигляду установки, б – бак з кришкою, яка не дозволяє розплюскуватись рідині при випробуваннях, в – кришка, г – розміщення тримачів зразків на диску з приєднаним в нижній частині крюком для перемішування піску з водою, д – фіксація зразків на диску, е – розмір часток піску.

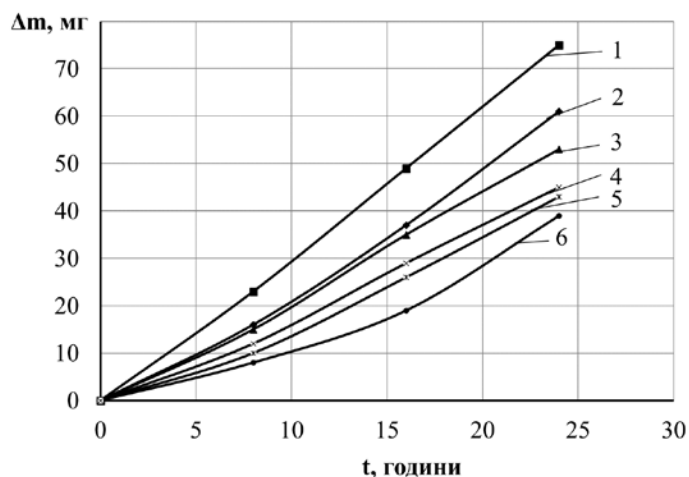


Рис. 2. Результати гідроабразивного зношування зразків зі сталі 45 з покриттями, згідно табл. 3.

Табл. 3

Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 45 з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm, мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	23	49	75
2	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ 1М	16	37	61
3	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М)	15	35	53
4	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 80% WC	12	29	45
5	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN	10	26	43
6	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 80% ZrN	8	19	39

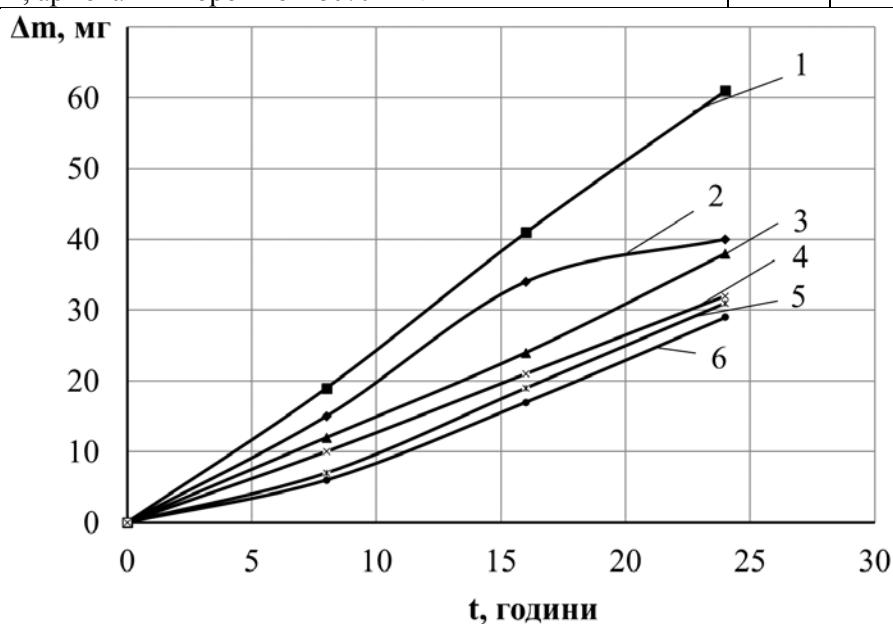


Рис. 3. Результати гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12X18H10T з покриттями з покриттями, згідно табл. 4.

Зразки №6 з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М) → МПМ, армований порошком 80% ZrN, знос яких на 110,3% менше зразків без покриття, на 37,9% менше порівняно з покриттям №2 – ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ 1М, на 31,0% менше в порівнянні з покриттям №3 – ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1М);

і, відповідно, на 6,9 (№5) і на 10,3 (№4) %, менше сформованих в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN і ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% WC.

Табл. 4

Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12X18H10T з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm, мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	19	41	61
2	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ 1M	15	34	40
3	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M)	12	24	38
4	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% WC	10	21	32
5	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN	7	19	31
6	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% ZrN	6	17	29

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 06X12H3ДІ

При проведенні порівняльних досліджень зразків із сталі 6X12H3ДІ встановлено, що тут також характер розподілу співпадає з зразками сталі 45 і сталі 12X18H10T, але знос найменший серед усіх випробовуваних матеріалів.

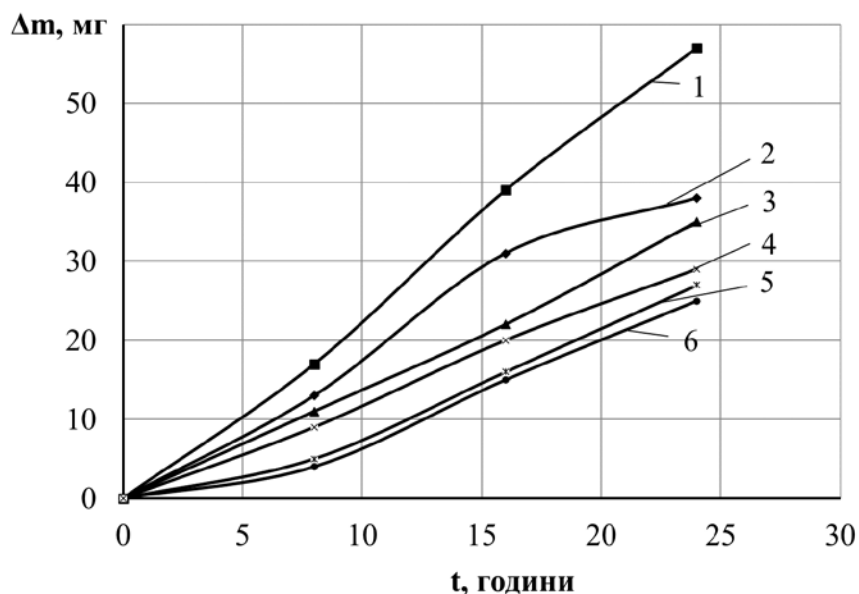


Рис. 4. Результати гідроабразивного зношування зразків зі сталі 06X12H3ДІ з покриттями, згідно табл. 5.

Табл. 5

Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12X18H10T з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm, мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	17	39	57
2	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ 1M	13	31	38
3	ЦЕІЛ → ЕІЛ АІ → ЕІЛ Рb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M)	11	22	35

4	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% WC	9	20	29
5	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN	5	16	27
6	ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% ZrN	4	15	25

Зразки №6 з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% ZrN, знос яких на 128,0% менше зразків без покриття, на 52,0% менше в порівнянні з покриттям №2 – ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ 1M, на 40,0% менше в порівнянні з покриттям №3 – ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M); і, відповідно, на 8,0 (№5) і на 16,0 (№4) %, менше сформованих в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 40% WC+ 40% ZrN і ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Pb → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком 80% WC.

Висновки:

1. В результаті проведених досліджень розроблений новий спосіб захисту сталених деталей динамічного обладнання АЕС, який підвищує здатність чинити опір зношуванню, гарантує надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах. Він полягає в формуванні на їх робочих поверхнях композиційних покриттів, синтезованих за допомогою екологічно безпечних технологій ЕІЛ з наступним нанесенням МПМ в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ (90% WC+10% 1M) → МПМ, армований порошком карбиду вольфраму, або нітриду цирконію, або їх сумішшю.

2. Експериментальними дослідженнями встановлено, що кращою стійкістю проти гідроабразивного зношування мають зразки зі сталі аустенітного класу 12X18H10T з покриттями отриманими в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ (90% WC + 10% 1M) → МПМ (80% ZrN), знос яких, відповідно, на 96,7; 110,3 і на 128% менше зразків без покриття, для сталі 45; сталі 12X18H10T і сталі 06X12H3ДЛ.

3. Серед сталей 45, 12X18H10T та 06X12H3ДЛ кращою стійкістю проти гідроабразивного зношування володіє сталь 06X12H3ДЛ, яка після 24 годин випробувань втратила порівняно зі сталлю 12X18H10T і сталлю 45, відповідно 25; 29 і 39 мг ваги, що, відповідно, на 16 і 56 % менше.

Подяка

Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проекту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0124U000539, Сумський державний університет).

Список використаних джерел:

1. Roik T.A., Gavrysh O.A., Vitsiuk Iu Iu. and Kholiavko V.V. Wear-Resistant Composites Produced from Tool Steel Waste for Contact Joints of High-Speed Printing Machines. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2023, 62, (3-4), pp. 215 – 224. DOI:10.1007/s11106-023-00385-2
2. Martsinkovsky V., Yurko V., Tarelnik V. and Filonenko Y. Designing radial sliding bearing equipped with hydrostatically suspended pads. Procedia Engineering, 2012, 39, pp. 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.020>
3. Martsinkovsky V., Yurko V., Tarelnik V. and Filonenko Y. Designing thrust sliding bearings of high bearing capacity. Procedia Engineering, 2012, 39, pp. 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>
4. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Martsynkovskyy V., Zhukov A. and Kurp P. Comparative tribological tests for face impulse seals sliding surfaces formed by various methods. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 382-391. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_40
5. Tarelnik V.B., Martsinkovskii V.S. and Zhukov A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 2*. Chemical and Petroleum Engineering, 2017, 53 (3-4), pp. 266-272. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0333-7>

6. Martsinkovsky V., Yurko V., Tarelnik V. and Filonenko Y. Designing thrust sliding bearings of high bearing capacity. *Procedia Engineering*, 2012, 39, pp. 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>
7. Tarelnik V.B., Konoplyanchenko E.V., Kosenko P.V. and Martsinkovskii V.S. Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, 53 (7-8), pp. 540-546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
8. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V. and Dziuba A. New method of friction assemblies reliability and endurance improvement. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 630, pp. 388-396. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388>
9. Halchuk T.N., Povstyanoy O.Yu., Bembenek M., Redko R.G., Chetverzhuk T.I. and Polinkevych R.M. Impact of technological system's characteristics on the machining accuracy of bearing rings. *Journal of Engineering Sciences*, 2023, 10(1), pp. A22-A30, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a4. DOI: [10.21272/jes.2023.10\(1\).a4](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a4).
10. Storozhenko M.S., Umanskii A.P., Terentiev A.E. and Zakiev I.M., *Powder metallurgy and Metal Ceramics*, 2017, 56, №1-2: 60-69. DOI: [10.1007/s11106-017-9847-y](https://doi.org/10.1007/s11106-017-9847-y)
11. Umanskyi O., Storozhenko M., Baglyuk G., Melnyk O., Brazhevsky V., Chernyshov O., Terentiev O., Gubin Yu., Kostenko O. and Martsenyuk I. Structure and Wear Resistance of Plasma-Sprayed NiCrBSiC-TiCrC Composite Powder Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2020, 59, №7-8, pp. 434-444. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00177-y>
12. Antoszewski B., Tofil S., Scendo M. and Tarelnik W. Utilization of the UV laser with picosecond pulses for the formation of surface microstructures on elastomeric plastics, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 233 (1), art. no. 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012036>.
13. Bryukhovetsky V.V., Klepikov V.F., Lytvynenko V.V., Myla D.E., Poyda V.P., Poyda A.V., Uvarov V.T., Lonin Yu.F. and Ponomarev A.G. The features of the structural state and phase composition of the surface layer of aluminum alloy Al-Mg-Cu-Zn-Zr irradiated by the high current electron beam. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*, 2021, 499, pp. 25-31. DOI: [10.1016/j.nimb.2021.02.011](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.02.011)
14. Barile C., Casavola C., Pappalettera G. and Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 2022, 12, 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
15. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 2023, 4, С.167-172.
16. Тарельник В.Б., Гапонова О.П., Власовець В.М., Тарельник Н.В., Зубко В.М., Шуляк М.Л., Кирик Г.В. Новий спосіб підвищення якості поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень, які підлягають радіаційному опромінюванню. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 2022, 3 (49), С. 82-89. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.12>
17. Тарельник Н.В. Новий спосіб відновлення зношених поверхонь сталевих деталей насосного обладнання атомних електростанцій. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2021, 2(51), С.32-39.
18. Патент України на корисну модель 152967 «Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей обладнання, яке працює в умовах радіаційного випромінювання», МПК (2023.01), В23Н 1/06. /Гапонова О.П., Тарельник Н.В., Тарельник В.Б., Жиленко Т.І., Мисливченко О.М., Дудченко В.В., Голуб Н.Р. –и 202203922; опубл. 03.05.2023, Бюл. № 18.