

КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КЕП ЗМІЦНЕНИХ ЧАСТИНКАМИ SiC В НЕЙТРАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

В даній роботі розглядається метод підвищення довговічності при корозійно-механічному зношуванні (КМЗ) сталей шляхом формування на їх поверхнях комплексних електролітичних покриттів (КЕП) на нікелевій основі, що містили наповнювач порошків SiC різних розмірів: від нано- до макрочастинок 50/40 мкм. Досліджено кінетику зміни потенціалу покриттів залежно від розмірів частинок наповнювача в нейтральних, лужних і кислих середовищах. Проведено також випробування на корозійно-механічну зносостійкість отриманих покриттів при їх мікроударному навантаженні в зазначених середовищах. Отримані результати пояснені з позицій фізико-хімічної механіки руйнування матеріалів.

Ключові слова: комплексні електролітичні покриття (КЕП), корозійно-механічне зношування (КМЗ), корозія, кавітація, електрохімія.

YU.M. BILYK, M.S. STECHISHIN, A.V. MARTYNYUK

Khmelnitskyi National University

THE CAVITATION-EROSIVE WEARPROOFNESS OF THE CEC STRENGTHENED BY SiC PARTICLES IN NEUTRAL ENVIRONMENTS

Abstract – In this work the method of increase of longevity is examined at KMW of steel details by forming on their surfaces of CEC on nickel basis, that contained stuff of powders SiC different sizes: from nano- to macroparts of 50/40 mkm. Investigational kinetics of change of potential of coverage depending on the sizes of particles of stuff in neutral, alkaline and sour environments. A test on corrosive-mechanical wearproofness of the got coverage is conducted also at their microstriking loading in the noted environments. The got results are explained from positions of physical and chemical mechanics of destruction of materials.

Keywords: complex electrodeposited coating (cec), corrosive-mechanical wear (KMW), corrosion, cavitation, electrochemistry.

Вступ

В літературі більшість робіт по КЕП стосуються підвищення зносостійкості металів та сплавів при терті або для підвищення їх корозійної стійкості, зносостійкості, міцності [1– 3], але дуже мало робіт, які стосуються досліджень кавітаційно-ерозійної зносостійкості КЕП на металах.

Для КЕП з нікелевою матрицею проведено багато досліджень для з'ясування їх властивостей залежно від природи наповнювача: мікротвердість, внутрішні напруження, зносостійкість, корозійна стійкість, жаростійкість і жароміцність, механічні характеристики.

Відмічено, що властивості КЕП можна змінювати в широких границях шляхом вибору виду наповнювача матриці і самої матриці, об'ємного і гранулометричного вмісту частинок наповнювача, його вмісту в матриці і в електроліті, форми частинок, режимів електролізу тощо. При цьому більшість параметрів процесу отримання КЕП порівняно легко контролюються і регулюються, що дає змогу створювати покриття з наперед заданими властивостями.

З аналізу робіт видно, що найбільшу зносостійкість мають КЕП з включенням карбідів титану, вольфраму, кремнію, а оксиди в меншій мірі забезпечують підвищення зносостійкості [4]. Так, в роботах [1, 5, 6] вказується на те що, введення в гальванічний нікель карбиду кремнію значно покращує властивості покриттів: мікротвердість збільшується на 1...1,25 ГПа, внутрішні напруження зменшуються в 3...8, зносостійкість підвищується в 4...5 разів. Покриття з SiC мають значно вищу міцність зчеплення з матеріалом основи (сталь 45) порівняно з використанням в якості наповнювача інших карбідів. Крім того, карбід кремнію має високі механічні характеристики, високий опір корозії та температуру плавлення (2150 °C).

Однак використання таких покриттів на практиці в значній мірі обмежується відсутністю чітких і однозначних технологічних режимів формування КЕП для забезпечення високої корозійно-механічної зносостійкості, зокрема при кавітації в корозійно-активних середовищах.

Методика проведення досліджень

В даній роботі досліджувалися КЕП на нікелевій основі з наповнювачем карбиду кремнію SiC у вигляді порошків різних розмірів: менше 50 нм – наночастинки; М5; 28/20; 50/40 мкм. Відповідно в роботі прийняті позначення: Ni-SiC_{нано} – нікелева основа з наповнювачем частинками SiC менше 50 нм; Ni-SiC₅₀ – нікелева основа і частинки карбиду кремнію розміром 50 мкм і т.д.

Зразки із сталі 45 з нанесеними покриттями використовували для проведення електрохімічних та кавітаційно-ерозійних досліджень [7].

Для нанесення покриттів використовували хлористі електроліти нікелювання: 300 г/л NiCl₂ · 6H₂O і 40 г/л H₃BO₃, які дозволяють підтримувати густину струму в межах 1...3 кА/м², при кислотності pH 3...4 і забезпечують швидкість осаджування до 90...100 мкм/год [7]. Окрім цього, даний електроліт допускає робочу температуру 60...70 °C і не змінює свій хімічний склад в процесі електролізу, що

дозволяє виключити вплив рН (кислотності) на вміст частинок наповнювача в КЕП. В електроліт додатково вводили поверхнево-активну речовину (ПАР) – лаурит сульфат натрію в кількості 0,01...0,02 г/л, який стабілізує хімічний склад електроліту, сприяє осаджуванню частинок карбиду кремнію на нікелеву матрицю і підвищує швидкість росту електролітичного осаду.

Електроосаджування КЕП з контролем вмісту включень наповнювача проводили на сконструйованій установці з імпульсним перемішуванням електроліту, описаною в роботі [8].

Зносостійкість при мікроударному навантаженні в корозійно-активних середовищах (КАС) визначали на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ). Дослідження проводили після 15 хв приробки (кавітації) в результаті якої верхній «бракований» шар покриття знімався.

Дослідження проводили в жорсткій воді ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,0343 г і CaCl_2 – 0,51 г/л дистилату) і в 3-відсотковому розчині хлориду натрію.

Результати дослідження і їх обговорення

Аналіз втрат маси зразків з нанесеними КЕП при проведенні кавітаційно-ерозійних випробувань вказує на те, що втрати маси залежать від складу покриття та виду середовища (рис. 1). Випробування в жорсткій воді показали що, покриття на основі нікелю та КЕП складу $\text{Ni-SiC}_{\text{нано}}$ і Ni-SiC_5 (криві 2, 3 і 4 на рис. 1,а) підвищують кавітаційно-ерозійну зносостійкість сталі 45 нормалізованої у жорсткій воді в середньому в 6 разів. Дещо меншу зносостійкість показали КЕП складу Ni-SiC_{28} і Ni-SiC_{50} (криві 5, 6 на рис. 1,а). Разом з тим, криві втрат маси зразків з КЕП мають затухаючий характер, а зношування сталі 45 інтенсифікується в процесі проведення випробування (крива 1 на рис. 1,а).

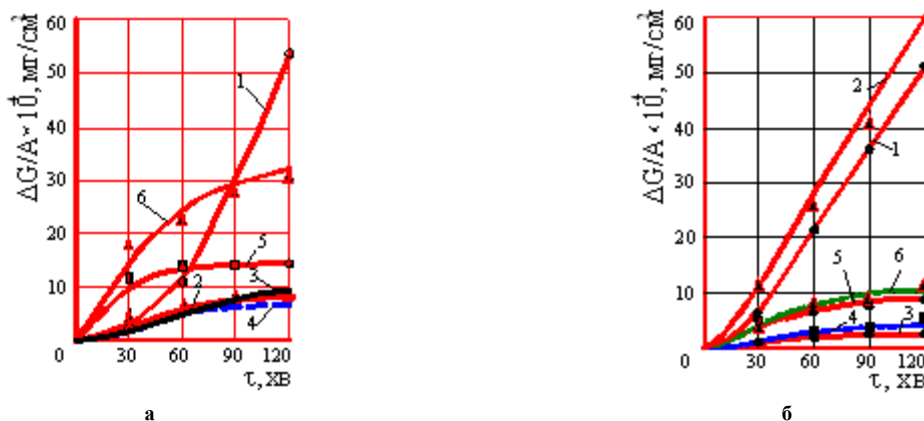


Рис. 1. Кінетика втрат маси зразків при кавітації:
1 – сталь нормалізована; 2 – Ni; 3 – $\text{Ni-SiC}_{\text{нано}}$; 4 – Ni-SiC_5 ; 5 – Ni-SiC_{28} ; 6 – Ni-SiC_{50}
А – жорстка вода; б – 3-відсотковий розчин NaCl

З метою дослідження впливу корозійного фактора руйнування на інтенсивність кавітаційного зношування КЕП випробування проводили також в 3-відсотковому розчині NaCl. Отримані результати (рис. 1,б) показують, що інтенсивність руйнування поверхонь зразків значно зростає. Так, втрати маси зразків з покриттям Ni зросли, порівняно із втратами маси в жорсткій воді з $8,7 \cdot 10^{-4} \text{ мг/см}^2$ до $64,1 \cdot 10^{-4} \text{ мг/см}^2$.

Отже, за втратами маси в жорсткій воді сформовані КЕП можна розташувати в наступній послідовності (за зростанням втрат маси): Ni-SiC_5 ; Ni; $\text{Ni-SiC}_{\text{нано}}$; Ni-SiC_{28} ; Ni-SiC_{50} , а аналогічний ряд в 3-відсотковому розчині NaCl має вид: $\text{Ni-SiC}_{\text{нано}}$; Ni-SiC_5 ; Ni-SiC_{28} ; Ni-SiC_{50} ; сталь 45 нормалізована; Ni.

Дослідження проведені в роботі [9] показали, що розчини NaCl значно полегшують вихід дислокацій на поверхню. Крім того, в розчинах NaCl інтенсифікація корозійних процесів і утворення язв, каверн, мікротріщин, що є стоками дислокацій, полегшує вихід дислокацій на поверхню. Крім того, кавітація в розчинах NaCl сприяє протіканню процесів корозії під напруженням. В результаті цього розвиток тріщин проходить в напрямку найбільшої густини дислокацій. В нікеля, з відносно невисокою енергією дефектів упаковки, поряд з підвищенням густини дислокацій по границям зерен, утворюється комірчаста структура з підвищеною густиною дислокацій на границях комірок. Тому руйнування нікеля при кавітації може проходити як міжкристалітно, так і внутрішньокристалітно [10]. В роботах [9] отримані залежності інтенсивності втрат маси від ширини ліній ФМР, тобто від енергоємності поверхневих шарів нікеля, що визначається енергією дислокацій, які беруть участь в процесах деформування і руйнування. Отримані залежності підтверджено експериментально. Таким чином встановлено, що розчини NaCl, сприяють виходу дислокацій на поверхню і зменшують енергоємність поверхневих шарів нікелю та їх зносостійкість при кавітації. Модифікація нікеля частинками SiC зміцнює нікелеву матрицю і особливо границі кристалів, зменшує їх деформацію та утворення комірчастості, блокує рух дислокацій і вихід їх на поверхню.

На (рис. 2, а, б) показана швидкість зношування при кавітації зразків з КЕП в жорсткій воді і 3-відсотковому розчині хлориду натрію.

Швидкість зношування КЕП $U_{\text{зн}}$ знаходили за формулою:

$$u_{\text{зн}i} = \Delta G_i / A \cdot t_i \quad (1)$$

де ΔG_i – втрати маси за час проведення випробувань t_i ;
 A – площа поверхні покриття.

Для випробувань вибрані КЕП, що показали кращі результати при електрохімічних вимірюваннях і випробуваннях на кавітаційну зносостійкість: Ni-SiC_{нано} і Ni-SiC₅ [7]. Для отримання даних для порівняння досліджували також покриття лише з Ni, а також КЕП складу: Ni-SiC₂₈ і Ni-SiC₅₀.

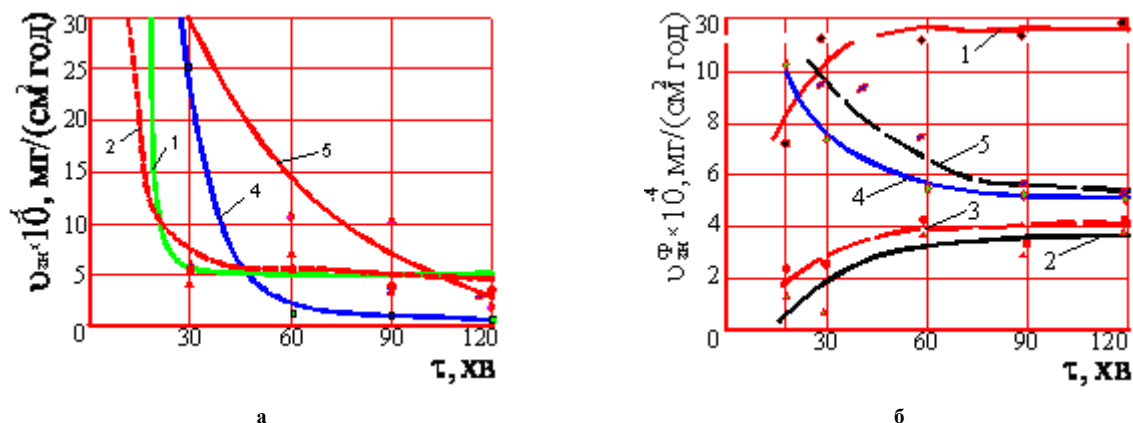


Рис. 2. Швидкість зношування КЕП (а – жорстка вода, б – 3-відсотковий розчин NaCl) складу: 1 – Ni; 2 – Ni-SiC_{нано}; 3 – Ni-SiC₅; 4 – Ni-SiC₂₈; 5 – Ni-SiC₅₀

Проведені дослідження показали, що на початку випробувань швидкість зношування покриття різко зростає, що є результатом випадання верхніх, слабо закріплених нікелем, частинок. Інтенсивність зношування зростає по мірі збільшення геометричних розмірів частинок наповнювача матриці (криві 3, 4 на рис. 2, а). Після 15 хв кавітації швидкість руйнування покриттів різко зменшується і протягом певного часу стабілізується. Саме ця постійна середня швидкість зношування і вибрана в якості критерію зносостійкості покриття. Іншим критерієм може бути час встановлення постійної середньої швидкості зношування покриття $t_{\text{вст}}$. Встановлені значення швидкості зношування $u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$ та час настання встановленої швидкості зношування $t_{\text{вст}}$ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Встановлені значення середньої швидкості зношування КЕП $u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$ і час її встановлення $t_{\text{вст}}$ в нейтральних середовищах ($u_{\text{зн}}^{\text{cp}} \cdot 10^{-4}$ мг / (см² · год); $t_{\text{вст}}$, хв)

Середовище	Ni		Ni+SiC _{нано}		Ni+SiC ₅		Ni+SiC ₂₈		Ni+SiC ₅₀	
	$u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$	$t_{\text{вст}}$	$u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$	$t_{\text{вст}}$	$u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$	$t_{\text{вст}}$	$u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$	$t_{\text{вст}}$	$u_{\text{зн}}^{\text{cp}}$	$t_{\text{вст}}$
Жорстка вода	4,5	30	4,6	40	4,4	45	1,7	60	-	-
3 % розчин NaCl	27,8	60	3,2	40	3,9	40	5,1	80	5,9	80

Аналіз даних табл. 1 показує, що в жорсткій воді найменшу швидкість зношування має КЕП складу Ni-SiC₂₈ $u_{\text{зн}}^{\text{cp}} = 1,7 \cdot 10^{-4}$ мг / (см² · год), а композиції: Ni; Ni-SiC_{нано}; Ni-SiC₅ показали практично однакову зносостійкість- $u_{\text{зн}}^{\text{cp}} \approx 4,4 \cdot 10^{-4}$ мг / (см² · год). Для покриття Ni-SiC₅₀ швидкість зношування зменшується з часом проведення випробувань, але не стабілізується в часі.

За часом стабілізації швидкості зношування $t_{\text{вст}}$ найкращі показники мають покриття на основі нікелю ($t_{\text{вст}} \approx 30$ хв) і з ростом діаметра частинок наповнювача $t_{\text{вст}}$ також зростає: від 40 хв для Ni-SiC_{нано} до 60 хв для Ni-SiC₂₈.

Таким чином за величиною встановленої середньої швидкості зношування КЕП лише на основі Ni і КЕП з наповнювачами SiC_{нано} і SiC₅ показали практично однакові середні швидкості зношування $u_{\text{зн}}^{\text{cp}} = (4,4 - 4,6) \cdot 10^{-4}$ мг / (см² · год), а для КЕП складу Ni-SiC₂₈ $u_{\text{зн}}^{\text{cp}} = 1,7 \cdot 10^{-4}$ мг / (см² · год), що в 2,6 разів менше.

Очевидно, що пояснення отриманих результатів слід шукати насамперед у фізико-механічних характеристиках КЕП з різним діаметром частинок $d_{\text{ч}}$ наповнювача. Це пов'язано з тим, що основним фактором руйнування покриття при кавітаційно-ерозійному зношуванні в жорсткій воді є механічний фактор руйнування. Із збільшенням діаметра частинок наповнювача збільшується ступінь зміцнення

нікелевої матриці, але одночасно зростають і внутрішні напруження [2] і при $d_v \geq 50$ мкм ці напруження приводять до ослаблення кріплення частинок в нікелевій матриці, що веде до їх інтенсивного «вимивання» при дії відбивних і ударних кавітаційних хвиль. Крім того, об'єм шару нікелю, що оточує частинку очевидно недостатній для його пластичного деформування при дії ударних хвиль протягом тривалого часу і він починає руйнуватися шляхом тріщиноутворення, що веде до «вимивання» відбивними хвилями частинок SiC або їх конгломератів. Таким чином, руйнування КЕП з частинками $d_v \geq 50$ мкм при кавітації в жорсткій воді проходить внаслідок втрати нікелем пластичних властивостей з наступним його крихким руйнуванням в результаті критичного росту густини дислокацій, які перевищують стартові напруження початку утворення мікротріщин.

КЕП складу Ni-SiC₂₈ показали найвищу зносостійкість при кавітації (по швидкості зношування) в жорсткій воді $u_{zn}^{cp} = 1,7$ мг / (см² · год), що пояснюється оптимальним зміцнення нікелевої матриці, рівномірністю напружено-деформованого стану покриття. Останнє підтверджується електрохімічними дослідженнями. Для цієї композиції маємо найменшу від'ємну величину встановленого потенціалу, не враховуючи КЕП складу Ni-SiC_{нано}. Аналогічні результати по зносостійкості КЕП при сухому терті отримані в роботах [2, 10], де КЕП складу Ni-SiC₂₈ характеризуються найвищою зносостійкістю.

При кавітації в 3-відсотковому розчині хлориду натрію найвищу швидкість зношування (крива 1 на рис. 2, б). показали покриття з нікелевою матрицею $u_{zn}^{cp} = 27,8$ мг / (см² · год), що пояснюється корозійною активністю Cl⁻ іонів та їх впливом на зменшення енергоємності поверхневих шарів нікелю при кавітації.

Частинки наповнювача SiC значно підвищують фізико-механічні характеристики нікелевої матриці і КЕП з частинками наповнювача мають значно менші значення швидкості зношування (рис. 2, б).

Практично усі КЕП мають майже однакову зносостійкість по швидкості u_{zn}^{cp} , а тому їх легше поділити по часу встановлення швидкості зношування $t_{вст}$. Сумісний аналіз значень критеріїв u_{zn}^{cp} і $t_{вст}$ дозволяє розмістити досліджені КЕП по кавітаційній зносостійкості в 3-відсотковому розчині хлориду натрію в ряд (в порядку зменшення зносостійкості): 1. Ni-SiC₅ і Ni-SiC_{нано}; 2. Ni-SiC₂₈ і Ni-SiC₅₀. Незважаючи на те, що КЕП складу Ni+SiC₅₀ за значенням швидкості зношування u_{zn}^{cp} знаходиться на другому місці після КЕП складу Ni-SiC₅ (табл. 1), але за часом встановлення постійної швидкості зношування $t_{вст} = 80$ хв вони займають останнє місце, що і пояснює їх вищі, порівняно з іншими покриттями, втрати маси (рис. 1, крива 6).

Електрохімічні дослідження показали, що із збільшенням діаметра частинок SiC збільшується значення від'ємного потенціалу $j_{вст}$ наближаючись до величини $j_{вст}$ сталі 45 без покриття. При цьому для композицій Ni-SiC₂₈, Ni-SiC₅ маємо однакові значення $j_{вст}$; -193 мВ в 3-відсотковому розчині NaCl, що є свідченням рівномірного розподілу внутрішніх напружень у верхніх шарах покриття, але не їх величини. Так, КЕП складу Ni-SiC₂₈ мають в 2,6 разів меншу швидкість зношування порівняно з швидкістю зношування композиції Ni-SiC₅ при випробуваннях в жорсткій воді і в 3,2 разів більшу швидкість при випробуваннях в 3-відсотковому розчині NaCl. Таким чином, при випробуваннях в жорсткій воді більший вплив має механічний фактор руйнування, а зміцнення нікелевої матриці частинками SiC₂₈ більш ефективне ніж частинками SiC₅ і в результаті маємо меншу швидкість зношування КЕП Ni-SiC₂₈ у жорсткій воді. При випробуваннях у 3-відсотковому розчині NaCl, навпаки, корозійний фактор руйнування поверхні має більш суттєвий вплив ніж механічний і вже отримуємо меншу швидкість зношування композиції з частинками SiC₅.

Отже, за кавітаційно-ерозійною зносостійкістю в жорсткій воді за критеріями величини швидкості зношування u_{zn}^{cp} , втрат маси $\Delta G / A$, часу встановлення постійної швидкості зношування $t_{вст}$ сформовані КЕП можна розділити на 2 групи: група I – КЕП складу Ni-SiC_{нано} і Ni-SiC₅ і група II – КЕП складу Ni-SiC₂₈. Такий поділ обумовлений близькими значеннями вибраних критеріїв зносостійкості КЕП.

Для підвищення кавітаційно-ерозійної зносостійкості деталей обладнання, які контактують з жорсткою (водопровідною) водою і до яких немає вимог до точності виготовлення їх розмірів (крильчатки, кришки, корпуси насосів) найбільш технологічно та економічно вигідно використовувати КЕП складу Ni+SiC₂₈, які порівняно легко отримувати як на вертикальному, так і горизонтальному катодах з можливістю широкого регулювання швидкості осаджування частинок і їх зарощування нікелем, вмісту частинок в матриці і підтримання стабільності формування покриттів по їх однорідності і якості.

В 3-відсотковому розчині NaCl досліджені покриття за прийнятими критеріями також поділяються на 2 групи: група I – Ni-SiC_{нано} і Ni-SiC₅ та група II – Ni-SiC₂₈ і Ni-SiC₅₀. Швидкості зношування для КЕП в кожній групі практично однакові (криві 2 і 3 та криві 4 і 5 на рис. 2, б), але час встановлення стабільної швидкості для кожної з груп різний: для I групи покриттів – 40 хв, а для II групи – 80 хв. Групи I і II також різняться за втратами маси (рис. 1, б). Таким чином, для підвищення кавітаційно-ерозійної зносостійкості деталей, які експлуатуються в розчинах хлориду натрію і, зокрема в морській воді (3-відсотковий розчин NaCl), найбільш ефективними є КЕП складу Ni-SiC_{нано} і Ni-SiC₅ (I група).

Висновки

1. Досліджено кавітаційно-ерозійну зносостійкість сформованих КЕП з частинками SiC різних

геометричних розмірів в нейтральних середовищах. Показано, що КЕП з частинками $\text{SiC}_{\text{нано}}$ і SiC_5 в середньому в 6 разів підвищують зносостійкість сталі 45 нормалізованої в жорсткій воді, в 11 разів в 3-відсотковому розчині NaCl . Дослідження також показали, що зі зростанням корозійної активності середовища ефективність дії КЕП зростає, а збільшення розмірів частинок SiC зменшує кавітаційно-ерозійну зносостійкість покриття.

2. Найкращі показники зносостійкості за величиною швидкості зношування $u_{\text{зн}}^{\text{сп}}$ і часом стабілізації швидкості $t_{\text{вст}}$ в жорсткій воді, а також за втратами маси $\Delta G/A$ показали КЕП складу Ni-SiC_{28} , а в 3-відсотковому розчині NaCl КЕП складу $\text{Ni-SiC}_{\text{нано}}$ і Ni-SiC_5 .

Література

1. Сайфуллин Р.С. Композиционные покрытия и материалы / Р.С. Сайфуллин. – М. : Химия, 1977. – 272 с.
2. Корнієнко А.О. Формування триботехнічних властивостей композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю створенням градієнтних структур : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец 05.02.04 «Тертя та зношування» / А.О. Корнієнко. – К., 2007. – 21 с.
3. Булатов А.С. Зависимость ширины линий ФМР от плотности дислокаций в никеле / А.С. Булатов, В.Г. Пинчук, М.Б. Лазарева // Физ. – хим. механика материалов. – 2002. – Т. 34. – № 5. – С. 1066–1069.
4. Wagner E. An electrochemical investigation of corrosive wear of as-plated and heat-treated and Ni-SiC coatings / E. Wagner, E. Broszeit // Wear. – 1979. – Vol. 55. – № 2. – P. 235–244.
5. Износостойкие диффузионно легированные композиционные покрытия / [М.В. Лучка, М.В. Киндрачук, П.И. Мельник и др.]. – К. : Техніка, 1993. – 143 с.
6. Яворський В.Т. Електрохімічне нанесення металевих, конверсійних та композиційних покриттів / В.Т. Яворський, О.І. Кунтій, М.С. Хома. – Львів : «Львівська політехніка», 2000. – 216 с.
7. Стечишин М.С. Електрохімічні дослідження композиційних електролітичних покриттів триботехнічного призначення / М.С. Стечишин, Ю.М. Білик // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ. – Вип. 49. – Т. 2. – С. 123–130.
8. Стечишин М.С. Установка для нанесения композиционных электролитических покрытий / М.С. Стечишин, Ю.М. Білик, А.В. Мартинюк // Вісник ХНУ. Технічні науки. – Хмельницький. – 2008. – № 2. – С. 196–199.
9. Некоз А.И. Разработка методов оценки и повышения долговечности деталей оборудования пищевой промышленности, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец 05.02.04 «Тертя та зношування» / Некоз А.И. – К., 1985. – 43 с.
10. Булатов А.С. Зависимость ширины линий ФМР от плотности дислокаций в никеле / А.С. Булатов, В.Г. Пинчук, М.Б. Лазарева // Физ. – хим. механика материалов. – 2002. – Т. 34. – № 5. – С. 1066–1069.

References

1. Saifullin R.S. Compozicionnye pokrytiya i materialy / R.S. Saifullin. – M.: Himia, 1977. – 272 s.
2. Kornienko A.O. Formuvannya trybotekhnichnykh vlastyvostey kompozycijnykh elektrolitychnykh pokryttiv na osnovi nikelyu stvorenniam gradiyentnykh struktur: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenya kand. texn. nauk: спец 05.02.04–tertya ta znoshuvannya / A.O. Kornienko. – K, 2007. – 21 s.
3. Bulatov A.S. Zavysymost shyryny lynyj FMR ot plotnosti dyslokacyj v nykele / A.S. Bulatov, V.G. Pynchuk, M.B. Lazareva // Fyz. – xym. mexanyka materialov. – 2002. – T.34. – 5. – S. 1066–1069.
4. Wagner E. An electrochemical investigation of corrosive wear of as-plated and heat-treated and Ni-SiC coatings / E. Wagner, E. Broszeit // Wear. – 1979. – Vol.55. – № 2. – p. 235-244.
5. Luchka M.V. Yznosostojkye dyffuzyionno legyrovannyye kompozycyonnyye pokrytyya / M.V. Luchka, M.V. Kyndrachuk, P.Y. Melnyk y dr. – K.: Texnika. – 1993. – 143 s.
6. Yavorskyj V.T. Elektrochimichne nanesennya metalovykh, konversijnykh ta kompozycijnykh pokryttiv / V.T. Yavorskyj, O.I. Kuntij, M.S. Xoma. – Lviv: «Lvivska politexnika», 2000. – 216 s.
7. Stechyshyn M.S. Elektrochimichni doslidzhennya kompozycijnykh elektrolitychnykh pokryttiv trybotekhnichnogo pryznachennya / Stechyshyn M.S., Bilyk Yu.M // Problemy tertya ta znoshuvannya. – K.: NAU, Vyp.49. – T.2. – S.123-130.
8. Stechyshyn M.S. Ustanovka dlya nanesennya kompozycijnykh elektrolitychnykh pokryttiv / Stechyshyn M.S., Bilyk Yu.M., Martynuk A.V // Visnyk XNU. Texnichni nauky. – Xmelnyckyj. – 2008. – 2. – S. 196–199.
9. Nekoz A.Y. Razrabotka metodov ocenky povshenyya dolgovechnosti detalей oborudovanyya pyshhevoj promyshlennosti, podverzhennik kavitatsionno-erozyionnomu yznashyvanyu: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenya doktora texn. nauk: спец 05.02.04-tertya ta znoshuvannya / Nekoz A.Y. – K., 1985. – 43 s.
10. Bulatov A.S. Zavysymost shyryny lynyj FMR ot plotnosti dyslokacyj v nykele / A.S. Bulatov, V.G. Pynchuk, M.B. Lazareva // Fyz. – xym. mexanyka materialov. – 2002. – T.34. – 5. – S. 1066-1069.

Рецензія/Peer review : 3.3.2013 р. Надрукована/Printed : 19.4.2013 р.