

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

Міжнародний науково-технічний журнал
Заснований у січні 1965 року
Виходить 6 разів у рік
том 59, № 1, 2023
січень – лютий
ЛЬВІВ

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

З. Т. НАЗАРЧУК (головний редактор), Г. М. НИКИФОРЧИН (заст. головного редактора), Р. Р. КОКОТ (відповідальний секретар), О. Є. АНДРЕЙКІВ, Р. Є. ГЛАДИШЕВСЬКИЙ, І. М. ДМИТРАХ, З. А. ДУРЯГІНА, І. Ю. ЗАВАЛІЙ, О. І. ЗВІРКО, І. М. ЗІНЬ, Р. М. КУШНІР, Д. Б. КУРИЛЯК, Л. М. ЛОБАНОВ, П. О. МАРУЩАК, О. П. ОСТАШ, В. В. ПАНАСЮК, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТРЕНКО, В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. З. СТУДЕНТ, М. С. ХОМА, О. Е. ЧИГИРИНЕЦЬ, В. М. ФЕДІРКО, С. О. ФІРСТОВ, О. Т. ЦИРУЛЬНИК

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), Г. БОЛЗОН (Італія), М. ЕЛЬБОВДЖАІНІ (США–Канада), Е. ГДУТУС (Греція), В. КЕЙН (Індія), Ж. КОРЕЙЯ (Португалія), Т. ЛАГОДА (Польща), Г. ЛЕСЮК (Польща), П. МОРЕЙРА (Португалія), А. ПІХ (Німеччина), Г. ПЛЮВІНАЖ (Франція), Я. ПОКЛЮДА (Чехія), Г. ШМІТТ (Німеччина), А. СЕДМАК (Сербія), Х. ТОРІБІО (Іспанія), Л. ТОТ (Угорщина), П. ТРАМПУШ (Угорщина), В. ЯРТИСЬ (Норвегія)

EDITORIAL BOARD

Z. T. NAZARCHUK (Editor-in-Chief), H. M. NYKYFORCHYN (Deputy Editor-in-Chief), R. R. KOKOT (Secretary), O. Ye. ANDREIKIV, R. Ye. GLADYSHEVSKII, I. M. DMYTRAKH, Z. A. DURIAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN', R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, L. M. LOBANOV, P. O. MARUSCHAK, O. P. OSTASH, V. V. PANASYUK, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. SKALSKYI, O. Z. STUDENT, M. S. KHOMA, O. E. CHYHYRYNETS', V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRUL'NYK

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), G. BOLZON (Italy), M. ELBOUJDAINI (USA–Canada), E. GDOUTOS (Greece), V. KAIN (India), J. CORREIA (Portugal), T. LAGODA (Poland), G. LESIUK (Poland), P. MOREIRA (Portugal), A. PICH (Germany), G. PLUVINAGE (France), J. POKLUDA (Czech Republic), G. SCHMITT (Germany), A. SEDMAK (Serbia), J. TORIBIO (Spain), L. TÓHT (Hungary), P. TRAMPUSH (Hungary), V. YARTYS' (Norway)

Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. Г. М. Никифорчин

Responsible for issue Dr. (Engn.), Prof. H. M. Nykyforchyn

Адреса редакції: 79601, Львів МСП, Наукова, 5, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. Тел.: (032) 263-73-74, (032) 229-62-30. Факс: (032) 264-94-27. E-mail: journal.pcmm@gmail.com

WWW-address: <http://pcmm.ipm.lviv.ua>

Editorial office address: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St., Lviv 79601, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74, (38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27. E-mail: journal.pcmm@gmail.com

Відповідальний секретар редакції **Р. Р. Кокот**

Редактори *Д. С. Бриняк, О. Т. Досин, Л. Є. Єлейко*

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

Зав. групою комп'ютерної підготовки видання *І. В. Калинюк*

Комп'ютерний набір *Л. Г. Колчак, Г. М. Кулик*

Підписано до друку 06.03.2023. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12. Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 060323 від 06.03.2023. Ціна договірна. Реєстраційне свідоцтво серія ДК № 5068 від 22.03.2016

Друкарня ТзОВ "Простір-М", 79000, Львів, вул. Чайковського, 8

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,
"ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ", 2023

ЗМІСТ

Погрелюк І. М., Лаврись С. М., Труш В. С., Лук'яненко О. Г., Кравчишин Т. М.
Ефективність газового азотування двофазних титанових сплавів.....5

Оцінено ефективність газового азотування двофазних титанових сплавів за результатами металографічного, рентгенофазового та дюрOMETричного аналізів. Встановлено, що з підвищенням коефіцієнта стабілізації β -фази послаблюється інтенсивність нітридоутворення та газонасичення під час азотування сплаву. Виявлено, що найнижча ефективність азотування відповідає високолегованому сплаву VT22 з найвищим коефіцієнтом β -стабілізації. Проаналізовано основні технологічні (термоциклування) та структурні (попередні деформаційне чи лазерне оброблення) підходи до поліпшення азотування.

Ключові слова: двофазний титановий сплав, газове азотування, твердість, структура, комбіноване оброблення, інтенсифікація.

*Подгурська В. Я., Купрін О. С., Чепіль Р. В., Остап О. П., Пріхна Т. О.,
Свердун В. Б., Бортницька М. О.* Фізико-механічні властивості покриттів на основі MAX фаз Ti_2AlC і $(Ti, Nb)_2AlC$ при $20^\circ C$ і $500^\circ C$14

Досліджено фізико-механічні характеристики, зокрема зносостійкість при $20^\circ C$ і $500^\circ C$ та опір фретинг-втоми при $20^\circ C$ сталі 15X16K5H2MBФAB-III без і з покриттями, отриманими методом вакуумно-дугового осадження за використання мішеней на основі MAX фаз Ti_2AlC і $(Ti_{1-x}Nb_x)_2AlC$, де $x = 0, 1$ і $0, 2$. Встановлено, що при $20^\circ C$ коефіцієнт тертя і питома швидкість зношування усіх покриттів більші, ніж досліджуваної сталі у контакт з кулькою зі сталі ШХ15 за навантаження 2 N. При цьому не зафіксовано однозначного зв'язку між мікротвердістю і трибологічними характеристиками матеріалів. Водночас фретингостійкість зразків з покриттям на основі Ti_2AlC у контакт з нікелевим сплавом 58NHXBKTБЮ-ВИ за багатоциклової втоми ($N > 10^5$ cycles) суттєво більша, ніж зразків без покриття. За випробувань при $500^\circ C$ трибологічні характеристики всіх матеріалів знижуються, але найменше для зразків з покриттям на основі Ti_2AlC . Не виявлено позитивного впливу легування ніобієм на зносо- і фретингостійкість цих покриттів.

Ключові слова: високолегована сталь, покриття, висока температура, MAX фази титану, мікротвердість, трибологічні характеристики, фретинг-втома.

*Трембач Б. О., Глушкова Д. Б., Гвоздецький В. М., Винар В. А., Закієв В. І.,
Кабацький О. В., Савенок Д. В., Закаворотний О. Ю.* Прогнозування коефіцієнта заповнення та густини шихти самозахисного порошкового дроту змінного складу.....22

Показано, що використання екзотермічного додатка (ЕД) для шихти в порошковому дроті є перспективним напрямком поліпшення технологічних характеристик зварних швів. Побудовано математичні моделі визначення густини шихти та коефіцієнта заповнення, які залежать від вмісту ЕД, співвідношення графіту до окиснювача ЕД (CuO/C), співвідношення окиснювача до порошку алюмінію в його складі (CuO/Al). Визначено, що на досліджені режими наплавлення найбільше впливають такі значення: $ED = 26...28$ mass%, $CuO/C = 4...4,5$ і $CuO/Al = 4,5...5,25$.

Ключові слова: самозахисний порошковий дріт, наплавлення, коефіцієнт заповнення, густина шихти, екзотермічний додаток.

Коломієць В. В., Антощенко Р. В., Лук'яненко В. М., Рідний Р. В.,
Харченко С. О., Фабричнікова І. А., Богданович С. А., Свіргун О. А.
Характеристики якості оброблення наплавлених деталей.....30

Досліджено характеристики якості чистового оброблення наплавлених матеріалів різцями з твердого сплаву і надтвердого матеріалу (гексаніту-Р). Встановлено, що низька шорсткість обробленої поверхні є за обробки різцями із гексаніту-Р. Ця характеристика залежить від подачі, швидкості різання, форми вершини різця, його зносу і твердості наплавленого шару. Глибина наклепу обробленого шару більша за точіння наплавлених матеріалів невеликої твердості. Під час точіння різцями із гексаніту-Р у поверхневому шарі з'являються залишкові напруження стиску, які поліпшують експлуатаційні характеристики деталей.

Ключові слова: оброблення, наплавлені матеріали, якість, шорсткість, деталі машин.

Бабак В. П., Фіалко Н. М., Щенетов В. В., Харченко С. Д., Гладкий Я. М.,
Бись С. С. Самозмашувальні склокомпозиційні нанопокриття.....37

Досліджено характеристики тертя та зношування розроблених наноструктурних склокомпозиційних самозмашувальних покриттів, структурні складники яких якісно впливають на графітизацію та забезпечують формування поверхневого шару α -графіту, що мінімізує контактні параметри. Виявлено позитивну роль склофази – алюмоборосилкату, що змінює триботехнічні властивості покриттів. Встановлено, що підвищити адгезійну міцність можна, формуючи під час напилювання поверхневий шар зі склоподібного силкату натрію. Констатовано, що інтеркаляція графітового шару частинками підповерхневої зони суттєво не змінює триботехнічні характеристики. Розроблені наноструктурні склокомпозиційні покриття мають поліпшені антифрикційні властивості у всьому навантажувально-швидкісному діапазоні випробувань.

Ключові слова: тертя, зношування, інтенсивність зношування, склокомпозит, наноструктура.

Шевченко О. М., Кулак Л. Д., Кузьменко М. М., Коваль О. Ю.,
Котко А. В., Кравченко І. Ф., Фірстов С. О. Вплив деформаційної
і термічної обробок на структуру та жароміцність сплавів
системи Ti–Al–Zr–Si.....44

Досліджено жароміцні сплави системи Ti–Al–Zr–Si (базовий Ti–(6–7)Al–(2–3)Zr–(1–1,5)Si та додатково легований Ti–(6–7)Al–(3–5)Zr–(1–1,5)Si–(2–4)Sn), отримані електронно-променевим виплавленням. Деформували у β - або верхній частині ($\alpha+\beta$)-областей за допомогою кування та вальцювання у смугу. Базовий сплав провальцьовано у верхній частині $\alpha+\beta$ -області і одержано дрібнозернисту рівномірну структуру з розміром зерна 10...20 μm . Виявлено, що внутрішні напруження і дефектна субструктура сплаву інтенсифікують розпад твердого розчину та сприяють формуванню рівномірно розподілених дисперсних силіцидів, а отже, ними поліпшують характеристики міцності і жароміцності. Випробуванням на розтяг при 20; 650 і 700°C зразків сплаву Ti–(6–7)Al–(2–3)Zr–(1–1,5)Si у деформованому стані та після відпалів встановлено досить високі значення границь міцності і плинності. Після витримки 20 h за робочої температури 700°C структура стає рівноважнішою, через що міцність сплаву знижується, а відносне видовження збільшується. Додаткове легування базового сплаву цирконієм і оловом дещо підвищує пластичність і погіршує жароміцні властивості.

Ключові слова: жароміцні титанові сплави, міцність, жароміцність, структура, силіциди.

Веселівська Г. Г., Студент М. М., Посувайло В. М., Задорожна Х. Р.,
Чугай О. М. Електрохімічні властивості плазмоелектролітно окисдованих
алюмінієвих покриттів, напиленних на магнієвому сплаві МА5.....53

Покриття на основі алюмінію напилювали на підкладку з магнієвого сплаву МА5 детонаційним та термовакуумним методами. Потенціодинамічними дослідженнями встановлено корозійну тривкість модифікованих поверхонь. Термовакуумне покриття непористе, але тонке (~ 50 μm). Під час синтезу керамічного покриття плазмоелектролітно окисдований (ПЕО) шар майже не взаємодіє з магнієвою основою. Встановлено, що корозійна тривкість детонаційного покриття вдвічі вища, ніж магнієвого сплаву МА5, але шар, синтезований на ПЕО покритті, нейтралізує цей ефект. Це пов'язано з його проростанням через напилене покриття (завтовшки ~200 μm) до основи та присутністю в ньому наскрізних пор, що з часом спричинить відшарування такого комбінованого покриття. Протилежну електрохімічну картину можна спостерігати на поверхні термовакуумного напиленого покриття без і з ПЕО шаром. Тут струми корозії менші в 25 разів і на 2 порядки відповідно. Така суттєва різниця в корозійній тривкості алюмінієвих покриттів зумовлена їх пористістю та дефектами структури через особливості технологічного процесу.

Ключові слова магнієвий сплав МА5, детонаційне покриття, плазмоелектролітне окисдування, корозійні властивості, пористість.

Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д., Дейнеко Л. М., Zhou-Hua Jiang, Jialong Tian.
Вплив поверхнево-активних елементів на структуру меж зерен і стійкість
до міжкристалітної корозії аустенітних Cr-Ni і Cr-Ni-Mo сталей.....59

Встановлено гранично допустимі вмісти поверхнево-активних елементів таких, як вуглець, азот, бор у низьковуглецевих Cr-Ni і Cr-Ni-Mo сталях, які забезпечують високу стійкість до міжкристалітної корозії (МКК) під час випробування в сильно- і слабоокисних середовищах. Доведено, що для забезпечення високої стійкості до МКК у киплячій 65% HNO₃ (за ISO 3651-1) вміст вуглецю у сталях 03X18H11 (304L) і 03X17H14M3 (316L) не повинен перевищувати 0,025 і 0,015% відповідно, а в киплячій H₂SO₄ (за ISO 3651-2, метод В) – 0,03%. Встановлено, що азот у кількості до 0,2% не впливає негативно на МКК досліджуваних сталей, а одночасне підвищення азоту і вуглецю спричиняє негативний синергетичний ефект. Показано негативну дію 0,003% і, більшою мірою, 0,03% бору на зернограничну структуру і стійкість до МКК сталей, загартованих від температур > 1100°C. Розроблено технології підвищення стійкості до МКК труб із досліджуваних сталей на основі принципу зернограничного конструювання полікристалічних матеріалів.

Ключові слова: аустенітні Cr-Ni та Cr-Ni-Mo сталі, поверхнево-активні елементи, вуглець, азот, бор, стійкість до міжкристалітної корозії, зернограничне конструювання.

Щербаківа Л. Г., Коржова Н. П., Лежа Т. М., Самелюк А. В., Воскобойнік І. В.,
Мельник В. Х. Корозійна тривкість евтектичних сплавів системи Al-Mg-Ge.....64

Досліджено вплив легування на механічні та корозійні властивості ливарних евтектичних (α-Al + Mg₂Ge)-сплавів алюмінію на основі потрібної системи Al-Mg-Ge. Електрохімічними (вольтамперометричним, хронопотенціометричним) та гравіметричним методами вивчено їх корозійне розчинення у 3%-му розчині NaCl. Встановлено, що згідно зі шкалою корозійної тривкості ці сплави тривкі або дуже тривкі, а за поєднанням корозійних і механічних властивостей можуть конкурувати з промисловими ливарними сплавами алюмінію.

Ключові слова: корозія, ливарні сплави алюмінію, механічні властивості, потрібна система Al-Mg-Ge.

<i>Васильєв Г. С., Герасименко Ю. С.</i> Застосування корозиметрів для контролю реагентної водопідготовки теплових мереж.....	71
---	----

Реагентний метод водопідготовки з використанням приладів корозійного контролю випробувано на районній котельні міста Києва. На прямому та зворотному трубопроводах тепломережі та на лінії підживлення встановлено давачі швидкості корозії. Визначено протинакипну ефективність реагенту вимірюванням зміни твердості води до та після нагрівального обладнання. Результати корозійного моніторингу показали, що швидкість корозії в тепломережі підтримується на рівні 0,1 mm/year, а на лінії підживлення внаслідок реагентної обробки вона знизилася до 0,03 mm/year у недеаерованій воді. Розрахунок економічної ефективності показав, що реагентний спосіб підготовки води для теплових мереж на 13% дешевший від традиційного підходу і може слугувати альтернативою традиційному, особливо в умовах енергозбереження.

Ключові слова: маловуглецева сталь, поляризаційний опір, корозиметр, теплова мережа, внутрішня корозія, накип.

<i>Японцева Ю. С., Мальцева Т. В., Кублановський В. С., Вишневецький О. А.</i> Корозійна поведінка електролітичних сплавів CoRe за витримки у лужному середовищі.....	79
---	----

Досліджено корозійну поведінку в 1 М розчині КОН електролітичних бінарних і потрійних сплавів, осаджених з цитратно-пірофосфатних електролітів. На підставі вимірювань імпедансу показано утворення щільного оксидного шару, який перекриває доступ електроліту до металу через тріщини та пори. Підібрано та обґрунтовано еквівалентні схеми та розраховано параметри корозійного процесу за 9 days витримки зразків у корозивному розчині. За допомогою хімічного картування показано, що продуктом корозії є переважно оксид кобальту. Потрійний сплав характеризується вищою початковою корозійною тривкістю $6 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ та значним поляризаційним опором після сповільнення та стабілізації корозійного процесу – $37 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$.

Ключові слова: корозія, кобальт, реній, електроосадження, сплав.

<i>Даниляк М.-О. М., Корній С. А.</i> Інгібування корозії алюмінієвого сплаву екологічно безпечною композицією на основі гуміарабіку та цинк ацетату.....	85
---	----

Електрохімічними та гравіметричними методами досліджено інгібувальні властивості екологічно безпечної композиції на основі полісахариду – гуміарабіку та солі ацетатної кислоти – цинк ацетату для підвищення корозійної тривкості алюмінієвого сплаву Д16Т у нейтральному середовищі. Встановлено, що ефективність композиції зростає зі збільшенням концентрації і максимальна за вмісту 2 g/l кожного компонента. Захисна дія зумовлена її адсорбційними властивостями, зокрема, гідроксильними та карбоксильними групами, а також здатністю катіонів Zn^{2+} взаємодіяти з аніонами OH^- з подальшим утворенням гідроксидів цинку, що сприяє блокуванню катодних ділянок та уповільненню корозії. Виявлено, що ступінь захисту сплаву після 168 h експозиції у 0,1%-му розчині NaCl становить 86...89%, що вказує на ефективність обраної композиції.

Ключові слова: корозія, екологічно безпечні інгібітори корозії, природні полімери, полісахариди, синергічні композиції, адсорбція, ефективність інгібування, гуміарабік, цинк ацетат.

<i>Демченко Н. Р., Ткаченко С. В., Бондар О. С.</i> Інгібування мікробної корозії сталі четвертинними солями імідазохінолінію.....	93
--	----

Броміди 2,3-діарил-4,5-дигідроімідазо[1,2-а]хіноліній-3 досліджено як біоциди та інгібітори мікробної корозії низьковуглецевої сталі, індукованої бактеріями штаму *Desulfovibrio* sp. M-4.1. Ефективність захисту металу від біокорозії стано-

вить 84,6... 92,4%. Визначено, що інгібувальні властивості досліджених речовин обумовлені їх антимікробною дією до сульфатвідновлювальних бактерій (СВБ) *Desulfovibrio* sp. M-4.1: діаметр зони пригнічення росту бактерій 24,7...45,5 mm. За мікробної корозії четвертинні солі повністю пригнічують ріст планктонної форми СВБ та суттєво впливають на формування біоплівки (кількість клітин зменшується на 6–8 порядків порівняно з контрольним зразком). Сульфатвідновна активність бактерій *Desulfovibrio* sp. M-4.1 зменшується на 88,8...91,6%. Ефективність дії досліджених четвертинних солей обговорено з урахуванням результатів розрахунків молекулярних дескрипторів.

Ключові слова: *итам сульфатвідновлювальних бактерій Desulfovibrio sp. M-4.1, мікробна корозія сталі, четвертинні солі імідазохінолінію, біоциди, інгібітори, молекулярні дескриптори.*

Чернов І. О., Зуйок В. А., Грицина В. М., Бєлаш М. М., Колодій І. В.

Корозійна тривкість порошків і таблеток титанату диспрозію в модельному середовищі теплоносія реактора ВВЕР-1000..... 100

Подано результати автоклавних випробувань корозійної тривкості порошків і таблеток титанату диспрозію в модельному середовищі і параметрах теплоносія першого контуру реактора ВВЕР-1000. Встановлено, що за експозиції в автоклаві до 500 h характерне зменшення ваги порошків, яка не перевищує 0,5%, а її збільшення залежить від їх густини. Таблетки з найвищою густиною (7,1...7,2 g/cm³) найбільш корозійно тривкі, а з густиною 5,74...5,79 g/cm³ кородують з монотонним зростанням ваги з тривалістю експозиції. Після 2300 h витримки середній приріст становив ~156 mg/dm² (0,3%). Зміни фазового складу порошків і таблеток після корозійних випробувань не виявлено. Дефектні макети поглинальних елементів після автоклавних експериментів не втрачали цілісності і не змінювали лінійних розмірів. Після їх розрізання порошки без перешкод витягали з оболонок. Зміни фазового складу порошків також не зафіксовано.

Ключові слова: *титанат диспрозію, корозійна стійкість, таблетки, порошок, густина.*

Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Звягін Н. С., Любчак М. О. Акустико-емісійний метод визначення залишкового ресурсу енергетичного

обладнання з тріщинами повзучості за статичного навантаження..... 104

Розроблено акустико-емісійний метод визначення залишкового ресурсу енергетичного обладнання з тріщинами високотемпературної повзучості за довготривалого статичного навантаження розтягом, в основі якого – запропонований раніше авторами спосіб побудови еталонної акустико-кінетичної діаграми росту такої тріщини в такому ж матеріалі, як і досліджуваний, а також схема еталонної аналітичної акустограми цього процесу. Вважали, що об'єкт руйнується шляхом розвитку в ньому уже наявних плоских тріщин в полі нормальних розтягальних напружень. Початкову площу тріщини і навантаження об'єкта визначено за параметрами акустограми, записаної під час її поширення в дослідженому об'єкті. Для демонстрації застосування методу виконано числовий експеримент.

Ключові слова: *тріщина високотемпературної повзучості, акустична емісія, залишковий ресурс, еталонна акустико-кінетична діаграма поширення тріщини високотемпературної повзучості, схема еталонної аналітичної акустограми під час поширення такої тріщини.*

<i>Majd M. Kh., Bahrami M., Nouri A., Nazarpak M. H.</i> Порівняння методом скінченних елементів розмірів двох скоб зі сплаву NiTi для кріплення кістки.....	112
--	-----

Оскільки переломи зап'ястних кісток найчастіше відбуваються в човноподібній кістці, здійснено пошук найвідповіднішого розміру скоб зі сплаву NiTi (нітинолу) з ефектом пам'яті форми для їх зрощення. Порівняно дві компресійні скоби (DynaClip™ Bone Fixation System, 10×10 і 14×14 mm). З допомогою програми SolidWorks створено модель, щоб детально вивчити вплив розміру скоб на кістку. Вважали, що човноподібна кістка є тришаровою композитною структурою, яка складається з колагену та мінеральних кристалів. Оцінено розподіл напружень уздовж вигнутої її середини. Метод скінченних елементів реалізувано за допомогою програмного забезпечення ABAQUS на основі нітинолових скоб з ефектом пам'яті форми і надпружних режимів. Встановлено, що за меншого розміру скоб відчутніше діють напруження на центральну зону кістки, тоді як за більшого – концентруються на периферійних зонах. Тому запропоновано використовувати ці скоби в різних орієнтаціях або паралельно одна до одної, щоб поліпшити біомеханічну поведінку регенованої кістки.

Ключові слова: перелом кістки, зрощення кістки, сплав з ефектом пам'яті форми NiTi, скоба, скінченний елемент, човноподібна кістка, моделювання.

<i>Козачок О. П.</i> Локальне фрикційне зношування пружного півпростору з регулярною системою виступів.....	121
---	-----

Досліджено контакт двох пружних півплощин (плоска деформація), поверхня одного з яких має пологі періодичні виступи циліндричної форми, за локального зношування на основі моделі фрикційно-втомного руйнування. Сформульовану контактну задачу зведено до сингулярного інтегро-диференціального рівняння з ядром Гільберта для товщини зношеного матеріалу та рівнянь для визначення невідомих ділянок зношування. Проаналізовано зміну форми виступів та контактного тиску після зношування.

Ключові слова: зносоконттакт, регулярна текстура, локальне зношування, сингулярне інтегро-диференціальне рівняння.

CONTENTS

Pohrelyuk I. M., Lavrys S. M., Trush V. S., Luk'yanenko A. G., and Kravchyshyn T. M.
Effectiveness of gas nitriding of two-phase titanium alloys.....5

Assessment of the efficiency of gas nitriding of two-phase titanium alloys was carried out using metallographic, XRD and durometric analyses. It was shown that the higher β -stabilization coefficient in the alloy, the lower the intensity of nitride formation and gas saturation during nitriding. It was shown that the lowest nitriding efficiency corresponded to BT22 high-alloyed titanium alloy with the highest β -stabilization coefficient. The main technological (thermal cycling) and structural (preliminary deformation or laser treatment) approaches to their increasing the nitriding efficiency are analyzed.

Keywords: *two-phase titanium alloy, gas nitriding, hardness, structure, combined treatment, intensification.*

*Podhurska V. Ya., Kuprin O. S., Chepil R. V., Ostash O. P., Prikhna T. O.,
Sverdun V. B., and Bortnytska M. O.* Physicomechanical properties of coatings
based on MAX phases of Ti_2AlC and $(Ti, Nb)_2AlC$ at 20°C and 500°C.....14

Physicomechanical characteristics, in particular wear resistance at 20°C and 500°C and resistance to fretting fatigue at 20°C of the steel (0.15C–16Cr–5Co–2Ni–0.7V–0.6Mo–0.3Nb–0.4N) without and with coatings obtained by the method of vacuum-arc deposition using targets based on the MAX phases of Ti_2AlC and $(Ti_{1-x}Nb_x)_2AlC$, where $x = 0.1$ and 0.2 , are investigated. It is established that at 20°C the friction coefficient and the wear specific rate of all coatings are greater than that of the studied steel in contact with a ball made of the steel (1.0C–1.5Cr–0.3Ni–0.3Mn–0.3Si–0.25Cu) under a load of 2 N. No unambiguous relationship between microhardness and tribological characteristics of materials is recorded. At the same time, the resistance to fretting fatigue of the samples with Ti_2AlC -based coating in contact with the Ni-alloy (17Cr–12W–11Fe–6Co–3Ti–1.5Nb–1.6Al) in high-cycle region ($N > 10^5$ cycles) is significantly higher than that of uncoated samples. At 500°C the tribological characteristics of all materials decrease, but the least for samples with Ti_2AlC based coating. No positive influence of niobium doping on the wear and fretting fatigue resistance of these coatings is found.

Keywords: *high alloyed steel, coating, high temperature, titanium MAX phases, microhardness, tribological characteristics, fretting fatigue.*

*Trembach B. O., Hlushkova D. B., Hvozdetskyi V. M., Vynar V. A., Zakiev V. I.,
Kabatskyi O. V., Savenok D. B., and Zakavorotnyi O. Yu.* Prediction
of filling factor and charge density of self-shielding flux-cored wire
with variable composition.....22

The use of exothermic addition (EA) as a filler core component in a flux-cored wire is a promising way to improve the welding and technological characteristics of welded joints. The mathematical models to determine the core filler density and the filling factor, which depend on the EA content, the ratio of graphite and oxidizer of the EA (CuO/C) and the ratio of the oxidizer to the reducing agent in the composition of the EA (CuO/Al) are built. It is found that the investigated fusion modes depend most of all on such parameters: EA = 26...28 mass%, CuO/C = 4...4.5 and CuO/Al = 4.5...5.25.

Keywords: *self-shielded flux cored wire, fusion, fill factor, exothermic addition.*

- Kolomiyets V. V., Antoshchenkov R. V., Luk'yanenko V. M., Ridnyi R. V.,
 Kharchenko S. O., Fabrychnikova I. A., Bohdanovych S. A., and Svirhun O. A.
 Characteristics of the quality of deposited details treatment.....30

The quality characteristics of the finishing treatment of deposited materials with cutting wires made of hard alloy and super hard material (hexanite-R) are investigated. It has been established that during finishing turning of the deposited parts, the low roughness of the machined surface is achieved when machining with hexanite-R cutters. The roughness of the machined surface depends on the feed the optimum cutting speed, the shape of the tool tip and its wear. The depth of the surface hardening of the machined layer with cutters is greater when turning the weld materials of low hardness. When turning with hexanite-R cutters, compressive residual compression stresses are formed in the surface layer, which improve the performance characteristics of parts.

Keywords: *treatment, dopped materials, quality, rougness, machine parts.*

- Babak V. P., Fialko N. M., Shcepotov V. V., Kharchenko S. D., Hladkyi Ya. M.,
 and Bys S. S. Self-lubricating glass composite nanocoatings.....37

The friction and wear characteristics of the developed nanostructured glass-composite self-lubricating coatings, the structural components of which have a qualitative effect on the graphitization process and ensure the production of an α -graphite surface layer that minimizes contact parameters, are investigated. The positive role of the glass phase in the form of aluminoborosilicate, which affects the tribological properties of coatings, has been established. It is established that an increase in adhesive strength is achieved due to the formation of a surface layer of glassy sodium silicate during spraying. It is stated that the intercalation of the graphite layer by the particles of the subsurface zone does not affect the tribotechnical characteristics of the coatings. The developed nanostructured glass-composite coatings demonstrate high anti-friction characteristics throughout the entire load-speed range of tests.

Keywords: *friction, wear, wear intensity, glass composite, nanostructure.*

- Shevchenko O. M., Kulak L. D., Kuzmenko M. M., Koval O. Yu., Kotko A. V.,
 Kravchenko I. F., and Firstov S. O. The influence of the deformation
 and heat treatment on the structure and heat-resistant properties
 of Ti–Al–Zr–Si alloys.....44

The heat-resistant Ti–Al–Zr–Si alloys (basic Ti–(6–7)Al–(2–3) Zr–(1–1.5)Si and additionally alloyed Ti–(6–7)Al–(3–5)Zr–(1–1.5)Si–(2–4)Sn), obtained by electron beam smelting were studied. Deformation was carried out in the β - or upper part of the $(\alpha+\beta)$ -area by means of forging and rolling into a strip. The influence of deformation and heat treatment modes on the structure and heat-resistant properties of the obtained alloys was investigated. The rolling, which was carried out at the upper part of the $\alpha+\beta$ area, and the fine-grained uniform structure with a grain size of 10...20 μm in the base alloy was obtained. Internal stresses and defective substructure of the deformed alloy intensify the decomposition of the solid solution and promote the formation of evenly distributed dispersed silicides, which allows obtaining high strength and heat resistance characteristics. Tensile tests at 20; 650 and 700°C of the Ti–(6–7)Al–(2–3) Zr–(1–1.5)Si alloy samples after deformation and annealing also showed a fairly high level of the tensile strength and yield strength, the relative elongation meets the requirements for heat-resistant alloys. As a result of holding 20 h at the operating temperature of 700°C, the structure becomes more equilibrium, due to which the strength level of the deformed alloy decreases, and the relative elongation increases. Additional alloying of the base alloy with zirconium and tin slightly increases plasticity and decrease heat-resistant properties.

Keywords: *heat-resistant titanium alloys, strength, heat-resistance, structure, silicides.*

- Veselivska H. H., Student M. M., Posuvailo V. M., Zadorozhna Kh. R.,
and Chuhai O. M. Electrochemical properties of plasma-electrolytically
oxidized aluminum coatings sprayed on MA5 magnesium alloy.....53

The aluminum-based coating was sprayed onto a substrate made of MA5 magnesium by detonation and thermal vacuum methods. Potentiodynamic polarization studies were carried out to evaluate corrosion resistance of the modified surfaces. Thermal vacuum coating is non-porous, but thin (~ 50 μm). In the process of synthesizing the oxide ceramic coating, the plasma-electrolyte oxidation (PEO) layer of the aluminum coating almost does not interact with the magnesium base. It was found that the corrosion resistance of the detonation coating was twice as high as that of the MA5 magnesium alloy, but the layer synthesized on the PEO coating neutralized this effect. This is due to the growth of the PEO layer through the sprayed coating (thickness ~ 200 μm) to the base and the presence of through pores in it, which over time causes the peeling of such a combined coating. The opposite electrochemical picture can be observed on the surface of the thermal vacuum sprayed coating without and with the presence of a PEO layer on it. Here, the corrosion currents are lower by 25 times and by 2 orders of magnitude, respectively. Such a significant difference in the corrosion resistance of aluminum coatings is caused by their porosity and defects in the structure, which is due to the peculiarities of the technological process.

Keywords: MA5 magnesium alloys, detonation coating, plasma electrolytic oxidation, corrosion properties, porosity.

- Dergach T. O., Sukhomlin G. D., Deyneko L. M., Zhou-Hua Jiang,
and Jialong Tian. The influence of surfactant elements on grain boundary
structure of grain boundaries and resistance against intergranular corrosion
of austenitic Cr–Ni and Cr–Ni–Mo steels.....59

The maximum permissible content of surface-active elements of carbon, nitrogen and boron in low-carbon Cr–Ni and Cr–Ni–Mo steels, which provide high resistance against intergranular corrosion (IGC) when tested in strongly and weakly oxidizing environments, have been established. It has been proven that in order to ensure high resistance against IGC when tested in boiling 65% HNO₃ (according to ISO 3651-1), the carbon content in 03X18H11 (304L) and 03X17H14M3 (316L) steels should not exceed 0.025% and 0.015%, respectively, and when tested in boiling H₂SO₄ (ISO 3651-2, method B) – 0.03%. It is established that nitrogen in the amount of up to 0.2% does not have a negative effect on the IGC of the studied steels, and the simultaneous increase of nitrogen and carbon gives a negative synergistic effect. The negative influence of 0.003% and, to a greater extent, 0.03% boron on the grain boundary structure and resistance against IGC of steels hardened at temperatures >1100° is shown. Technologies for increasing the resistance against IGC of pipes made of the studied steels have been developed, taking into account the principle of grain boundary engineering of polycrystalline materials.

Keywords: austenitic Cr–Ni and Cr–Ni–Mo steels, surface-active elements, carbon, nitrogen, boron, intergranular corrosion resistance, grain boundary engineering.

- Shcherbakova L. G., Korzhova N. P., Legka T. M., Sameluk A. V., Voskoboinik I. V.,
and Melnyk V. Kh. Corrosion resistance of eutectic Al–Mg–Ge alloys.....64

The influence of alloying on the mechanical and corrosion properties of casting eutectic (α-Al + Mg₂Ge) aluminum alloys based on the Al–Mg–Ge ternary system has been studied. Corrosion dissolution of these alloys in 3% NaCl solution is studied by electrochemical (voltammetric, chronopotentiometric) and gravimetric methods. It is shown that according to the scale of corrosion resistance these alloys are stable or very stable, and the combination of corrosion and strength properties can compete with industrial casting aluminum alloys.

Keywords: corrosion, casting aluminum alloys, mechanical properties, ternary

system Al–Mg–Ge.

- Vasyliev G. S. and Herasymenko Yu. S. Use of corrometers for controllable reagent water treatment in heating networks.....71

Testing of the reagent method of water treatment with the use of corrosion control devices was carried out at the district boiler house of Kyiv city. To control the corrosion rate, corrosion rate probes were installed on the forward and reverse pipelines of the heating network, and on the supply line. The anti-scale efficiency of the reagent was determined by measuring the change in the hardness of water before and after the heating equipment. The results of corrosion monitoring showed that the corrosion rate in the heating network is maintained at 0.1 mm/year. The corrosion rate on the feed line due to reagent water treatment was reduced to 0.03 mm/year in non-deaerated water. The calculation of economic efficiency has shown that the reagent method of water treatment for heating networks is 13% cheaper than traditional approach and can serve as an alternative to traditional, especially regarding energy conservation.

Keywords: *mild steel, polarization resistance, corrometer, heating network, internal corrosion, scaling.*

- Yapontseva Yu. S., Maltseva T. V., Kublanovsky V. S., and Vyshnevskiy O. A. Corrosion behavior of electrolytic CoRe alloys under exposure in an alkaline media.....79

Corrosion behavior of electrolytic binary and ternary alloys in the 1 M KOH solution deposited from citrate-pyrophosphate electrolytes was studied. Based on the performed impedance measurements, the formation of a dense oxide layer, which blocks the access of the electrolyte to the metal through cracks and pores, is shown. Equivalent schemes have been selected and substantiated, and the parameters of the corrosion process have been calculated for 9 days of the samples exposure in the corrosive solution. Using chemical mapping, it is shown that the corrosion product is predominantly cobalt oxide. A ternary alloy is characterized by a higher initial corrosion resistance of $6 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ and a significant polarization resistance after slowing down and stabilization of the corrosion process – $37 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$.

Keywords: *corrosion, cobalt, rhenium, electrodeposition, alloy.*

- Danyliak M.-O. M. and Korniy S. A. Corrosion inhibition of aluminium alloy by environment-friendly composition based on gum arabic and zinc acetate.....85

The inhibitory properties of an environment-friendly composition based on polysaccharide – gum arabic and acetic acid salt – zinc acetate to increase the corrosion resistance of D16T aluminium alloy in a neutral environment were investigated by electrochemical and gravimetric methods. It was established that the inhibitory efficiency of the composition increased with increasing concentration, and was maximally effective at 2 g/l of each component. The protective effect of the composition can be associated with the adsorption capacity of zinc acetate and gum arabic, due to the presence of hydroxyl and carboxyl groups in them, as well as the ability of Zn^{2+} cations to interact with OH^- anions, with the subsequent formation of zinc hydroxides, which blocks cathode areas and slows down corrosion processes. It is shown that the degree of protection of the D16T aluminium alloy after 168 h of exposure in a 0.1% NaCl solution is 86...89%, which indicates the effective protective effect of the selected inhibitory composition.

Keywords: *corrosion, environmentally friendly inhibitors, natural polymers, polysaccharides, synergistic compositions, adsorption, inhibition efficiency, gum arabic, zinc acetate.*

<i>Demchenko N. R., Tkachenko S. V., and Bondar O. S.</i> Inhibition of microbial steel corrosion by quaternary salts of imidazoquinolinium.....	93
--	----

The 2,3-diaryl-4,5-dihydro-imidazo[1,2-a]quinolinium-3 bromides were tested as biocides and inhibitors of microbial corrosion of low-carbon steel induced by bacteria of strain *Desulfovibrio* sp. M-4.1. The degree of metal protection against corrosion induced by sulfate-reducing *Desulfovibrio* sp. M-4.1 bacteria is 84.6...92.4%. 2-(para-tolyl)-3-(41-methoxyphenyl)-4,5-dihydro-imidazo[1,2-a]quinolinium bromide demonstrated the best protective effect. It was established that sulfate-reducing bacteria of *Desulfovibrio* sp. M-4.1 strain are sensitive to 2,3-diaryl-4,5-dihydro-imidazo[1,2-a]quinolinium-3 bromides. Under the action of imidazoquinolinium quaternary salts, the inhibition zones of bacterial growth have the diameters of 24.7...45.5 mm. Quaternary salts of imidazoquinolinium completely suppress the growth of sulfate-reducing *Desulfovibrio* sp. M-4.1 bacteria in plankton and significantly affect the formation of biofilm (the number of cells decreases by 6–8 orders compared to the control sample) under conditions of microbial corrosion. Suppression of the sulfate-reducing activity of *Desulfovibrio* sp. M-4.1 bacteria by quaternary salts of imidazoquinolinium (by 88.8...91.6%) was proven. The effectiveness of the quaternary salts was discussed with account of the calculation results of molecular descriptors.

Keywords: *strains of sulphate-reducing bacteria Desulfovibrio sp. M-4.1, microbial corrosion of steel, quaternary salts of imidazoquinolinium, biocides, inhibitors, molecular descriptors.*

<i>Chernov I. O., Zuyok V. A., Grytsyna V. M., <u>Belash M. M.</u>, and Kolodiy I. V.</i> Corrosion resistance of dysprosium titanate powders and tablets in the model environment of the coolant of the WWER-1000.....	100
---	-----

The results of autoclave tests of corrosion resistance of dysprosium titanate powders and pellets in the model environment and the parameters of the primary coolant of the WWER-1000 reactor are presented. It is found that when exposed to an autoclave for up to 500 h, the powders are characterized by a decrease in weight, which does not exceed 0.5%, and its weight gain depends on their density. Pellets with the highest density (7.1...7.2 g/cm³) are characterized by the highest corrosion resistance. Corrosion kinetics of dysprosium titanate pellets with a density of 5.74...5.79 g/cm³ is characterized by a monotonous weight gain with increasing exposure in the autoclave. After 2300 h of autoclaving, the average increase was ~156 mg/dm² (0.3%). The change in the phase composition of powders and pellets of dysprosium titanate after corrosion tests is not detected. Studies of the conditions of defective absorber elements models after autoclave tests have shown that they retain their integrity without changing the linear dimensions. After cutting the absorber elements models, the powders are freely removed from the cladding. The change in the phase composition of the powders is also not detected.

Keywords: *dysprosium titanate, corrosion resistance, pellets, powder, density.*

<i>Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., Zviagin N. S., and Liubchak M. O.</i> Acoustic-emission method for determining the residual life of energy equipment with creep cracks under static load.....	104
---	-----

An acoustic-emission method for determining the residual life time of power equipment with high-temperature creep cracks under long-term static tensile load has been developed. This method is based on the previously proposed method of constructing a reference acoustic-kinetic diagram of the propagation of a high-temperature creep crack in the same material as the object under study, as well as a scheme of a reference analytical acousogram during crack propagation. The essence of the method is

as follows. It is believed that the object fracture takes place by the propagation of already existing plain cracks in it, near which there are normal tensile stresses. It is proposed to determine the initial area of the crack and the load of the object based on the parameters of the acousogram recorded during crack propagation in the investigated object. The numerical experiment was conducted to demonstrate the application of this method.

Keywords: *high-temperature creep crack, acoustic emission, residual resource, reference acoustic-kinetic diagram of high-temperature creep crack propagation, scheme of the reference analytical acousogram for high-temperature creep crack propagation.*

Majd M. Kh., Bahrami M., Nouri A., and Nazarpak M. H. A finite element comparison between two sizes of NiTi commercial staples used in scaphoid fracture fixation.....112

Most carpal bone fractures occur in the scaphoid. This work is aimed at finding the most suitable size of NiTi shape memory alloy (nitinol) staples to heal scaphoid fractures by comparing two commercially available compression staples (DynaClip™ Bone Fixation System, 10×10 and 14×14 mm). In the present study the scaphoid bone was selected for simulating a model in SolidWorks software. To accurately investigate the effect of staple size on the bone the scaphoid was assumed to be a three-layer composite structure consisting of collagen and mineral crystals. The stress distributions along a path located at the waist of the scaphoid were assessed. The finite element analysis was carried out in ABAQUS software based on the nitinol staple shape memory effect and super-elasticity behavior. The results indicated that the smaller size of staples induced a more significant stress on the central zone of the scaphoid, whereas the larger size of staples showed a peak stress concentration on the peripheral zones with a reduced stress concentration at the center. Hence, it is suggested to utilize the two of these staples in different orientations or in parallel with each other to improve the biomechanical behavior of the regenerated bone.

Keywords: *bone fracture, bone healing, shape memory NiTi alloy, staple, finite element, scaphoid, simulation.*

Kozachok O. P. Local frictional wear of an elastic half-space with a regular system of protrusions121

Wear-contact of two elastic half-planes (plain deformation), the surface of one of which has periodic sloping protrusions of cylindrical shape under local wear on the basis of the model of frictional-fatigue fracture is investigated. The formulated contact problem is reduced to a singular integro-differential equation with a Hilbert nucleus with respect to the thickness of the worn material and equations for determining the unknown areas of wear. The shape of the protrusions and contact pressure at the beginning and after wear are analyzed.

Keywords: *wear-contact, regular texture, local wear, singular integro-differential equation.*