

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 05.05.2023. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 050523 від 05.05.2023. 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

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

Міжнародний науково-технічний журнал
Заснований у січні 1965 року
Виходить 6 разів у рік

ТОМ 59, № 2, 2023

березень – квітень

ЗМІСТ

*Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Квасницький В. В., Ганущак О. В., Гос І. Д.,
Пелешенко С. І., Дем'янов О. І., Конорева О. В., Фіалко Н. М.* Отримання
нероз'ємних з'єднань титанових сплавів зі сталями (Огляд).....5

Проаналізовано зварювання титанових сплавів зі сталями. Виділено такі напрямки: використання заздалегідь виготовлених біметалевих перехідних елементів (зварюють традиційними способами), мінімізація енерго- і тепловитрат у зоні з'єднання металів, застосування зварювальної металургійної інженерії. Показано, що прогрес в області зварювальних технологій призвів до появи таких інноваційних рішень, як зварювання тертям з перемішуванням, а також використання рідкофазних прошарків і 3D-друку наноструктурних прошарків на краях для прискорення дифузії за дифузійного зварювання. Нові методи в зварювальній металургійній інженерії підвищують ефективність з'єднань типу Ti-Fe внаслідок застосування багатощарових композицій з танталу або ніобію з боку титану і бронзи – з боку сталі, а також вставок з ванадію і його сплавів, наприклад, легованих вольфрамом або хромом. Відзначено актуальність подальшої розробки стандартів для підтримки і поширення промислових технологій зварювання з'єднань типу Ti-Fe, навчання і підготовки технічного персоналу для впровадження цих технологій.

Ключові слова: з'єднання титан–сталь, міжфазна взаємодія, інтерметаліди, проміжні прошарки, міцність з'єднань.

Труш В. С., Погрелюк І. М., Лук'яненко О. Г., Кравчишин Т. М., Федірков В. М.
Вплив температурно-швидкісних параметрів нагрівання
на жаротривкість цирконію та сплаву Zr–1% Nb.....17

Виявлено відмінності кінетики окиснення цирконію та сплаву Zr–1% Nb під час нагрівання у повітрі залежно від швидкості нагріву, температури і тривалості витримки. Показано, що збільшення швидкості нагрівання від 2,5 до 6 і 7,5°C/min зменшує енергію активації окиснення Zr в інтервалі температур 20...1000°C з 70,2 до 67 і 52,7 kJ/mol, відповідно. Для цирконієвого сплаву Zr–1% Nb збільшення такої швидкості з 5 до 10 і 20°C/min спричинює зростання енергії активації окиснення з 65 до 70,1 та 78,5 kJ/mol, відповідно. Показано, що таке збільшення швидкості (цирконію з 2,5 до 7,5°C/min, а сплаву Zr–1% Nb з 5 до 20°C/min) є через зменшення товщини оксидної плівки ZrO₂. За ізотермічної витримки 5 h при 750°C сплав Zr–1% Nb і Zr за температури 800°C окиснюють-

ся за параболічним законом. При 800°C сплав Zr–1% Nb окиснюється за комбінованим законом: спочатку за параболічним, а потім за квазілінійним.

Ключові слова: цирконій, жаротривкість, енергія активації, твердість.

Горбань В. Ф., Фірстов С. О., Кранівка М. О. Вплив різних чинників на фізико-механічні властивості високоентропійних сплавів з ГЦК граткою.....24

Досліджено вплив електронної концентрації, ентальпії змішування та розмірної невідповідності на параметр гратки, модуль пружності та нормовану твердість високоентропійних сплавів з ГЦК граткою. Встановлено, що на параметр гратки, який визначає модуль пружності сплавів, впливає як електронна концентрація, так і ентальпія змішування. Виявлено пряmolінійну залежність нормованої твердості сплавів від розмірної невідповідності. Запропоновано формули для розрахунків твердості та модуля пружності.

Ключові слова: високоентропійні сплави, розмірна невідповідність, ентальпія змішування, твердість, модуль пружності.

Nengjun Ven, Витязь О. Ю., Грабовський Р. С. Механічні властивості сталі для морських плавучих платформ за статичного та циклічного навантажень.....30

Наведено результати виконання комплексу експериментальних випробувань зразків зі сталі Q420 з рівнем якості Q420B. Порівняно хімічні склади сталі, а також її механічні характеристики, вказані у сертифікаті на продукцію та визначені експериментально, зі значеннями стандарту. Проаналізовано результати втомних та корозійно-втомних випробувань сталі. Побудовано криві втоми у повітрі та штучній морській воді, а також визначено відповідні значення границі витривалості за кімнатної температури та при 0°C. Виявлено суттєвий вплив корозивного середовища на швидкість поширення втомних тріщин у сталі.

Ключові слова: сталь Q420B, хімічний склад сталі, механічні властивості, корозивне середовище, випробування на втому, криві втоми.

Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Мисливченко О. М., Євич Я. І., Hongguang Ye. Вплив експлуатаційних умов на структуру та механічні властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2.....36

Досліджено структуру та механічні властивості сталі 4X4H5M4Ф2 у термодетформованому і литому станах після гартування та відпуску, а також додаткового нагріву. Показано, що після додаткового нагріву гартованої та відпущеної сталі 4X4H5M4Ф2, який моделює умови експлуатації оснащення (робочу температуру за квазістаціонарної витримки), при 630...650°C відбувається її знеміцнення, що пов'язано з утворенням карбідів типу M_7C_3 . У литій сталі за цих умов така карбідна фаза у структурі металу відсутня, що супроводжується підвищенням її теплостійкості. Розширення температурного інтервалу експлуатації литої сталі 4X4H5M4Ф2 після оптимального режиму гартування і відпуску дасть змогу застосовувати інструмент, виготовлений з цієї сталі, до температури експлуатації 650°C. Рекомендовано не використовувати цю сталь в литому і термодетформованому станах для виготовлення інструменту, який працює в умовах циклічних ударних навантажень, для гарячого деформування кольорових металів та сплавів.

Ключові слова: штампова сталь, термодетформаційна і термічна обробки, фазовий склад, кристалічна структура, механічні властивості.

Іванов О. О., Присяжнюк П. М., Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Мариненко С. Ю.,
Коваль І. В., Гурик О. Я. 3D моделювання структури наплавлених
матеріалів на основі системи Fe–Ti–Mo–B–C.....41

Досліджено структуру наплавленого шару на основі системи Fe–Ti–Mo–B–C. Розроблено методологію 3D моделювання зерна фази Fe(Mo, B)₂, яка охоплює чотири етапи. Програмне забезпечення Blender використано для 3D моделювання, а Image Pro Plus – для аналізу зображень і результатів вимірювань. Виявлено, що в такому наплавленні основна зміцнювальна фаза Fe(Mo, B)₂ утворюється навколо зерен TiC, які виконують роль модифікатора.

Ключові слова: наплавлення, порошкове дугове зварювання, 3D моделювання.

Кушнір Р. М., Жидик У. В., Флячок В. М. Термопружний стан неоднорідної
ортотропної циліндричної оболонки відкритого профілю
за нестационарного нагрівання47

Досліджено термопружний стан неоднорідної ортотропної кругової циліндричної оболонки відкритого профілю за умови конвективного теплообміну між поверхнями оболонки і середовищем. Для цього використано узагальнену зсувну математичну модель неоднорідних анізотропних оболонок першого порядку та двовимірні нестационарні рівняння теплопровідності. Методами інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа знайдено аналітичний розв'язок нестационарної задачі теплопровідності та квазістатичної задачі термопружності для скінченної шарнірно опертої на краях оболонки. Розраховано напружений стан та прогини оболонки за зміни властивостей матеріалу в радіальному напрямку за степеневим законом.

Ключові слова: термопружність, циліндрична оболонка, неоднорідний матеріал, температурне навантаження.

Скальський В. Р., Мокрий О. М., Звірко О. І., Кирилів В. І., Романишин І. М.,
Максимів О. В. Оцінювання характеристик нанокристалічного шару
за допомогою поверхневих акустичних хвиль.....56

Досліджено вплив нанокристалічного шару, утвореного механоімпульсною обробкою, на швидкість поверхневих акустичних хвиль у зразках зі сталі 65Г. Використано акустичні хвилі з частотами 3, 6 та 9 МГц. Методом поетапного шліфування отримано різну товщину нанокристалічного шару. Описано методику оцінювання акустичних властивостей утвореного шару за швидкістю поверхневих акустичних хвиль, коли глибина проникнення хвилі більша за його товщину. Для визначення акустичних характеристик нанокристалічного шару додатково виміряно його товщину за допомогою металографічних досліджень.

Ключові слова: механоімпульсна обробка, швидкість поверхневих акустичних хвиль, нанокристалічний шар, пластична деформація.

Чаусов М. Г., Марущак П. О., Пилипенко А. П. Вплив ударно-коливального
навантаження на твердість поверхневих шарів алюмінієвого сплаву
Д16чАТВ.....62

Оцінено вплив ударно-коливального навантаження заданої інтенсивності, зокрема і зі застосуванням нанорозчинів карбиду вольфраму, вуглецю, а також нанорозчинів Al + Cu і Al + Cu + Mg за концентрацій 50:50% та 33:33:33%, відповідно, на твердість поверхневих шарів алюмінієвого сплаву Д16чАТВ. Виявлено та описано взаємозв'язок між параметрами динамічних незрівноважених процесів, які змінюють структурно-фазовий стан та механічні властивості сплаву, та твердістю поверхні обробленого матеріалу.

Ключові слова: алюмінієвий сплав Д16чАТВ, ударно-коливальне навантаження, зміна структурного і механічного стану, твердість.

Гембара О. В., Голіян О. М., Чепіль О. Я., Палюх В. М., Сапужак Я. І.,
Сов'як І. М. Визначення ресурсу вала з втомною тріщиною у водні.....67

Запропоновано теоретико-експериментальний підхід для прогнозування кінетики росту втомної тріщини та визначення ресурсу відповідальних елементів конструкцій у водні. За допомогою створеної розрахункової моделі росту втомної тріщини та експериментально побудованих кінетичних діаграм втомного руйнування сталі 35ХНЗМФА встановлено залишковий ресурс роторного вала парогенератора, послабленого поверхневою півеліптичною тріщиною, який у водні на два порядки менший, ніж у повітрі.

Ключові слова: втомна тріщина, газоподібний водень, кінетична діаграма втомного руйнування, прогнозування ресурсу.

Березовець В. В., Кононюк О. П., Денис Р. В., Завалій І. Ю. Синтез і водень-сорбційні властивості композитів MgH_2 з додатками $TiFe$ та Ti_3Fe_3O73

Механічним помелом у водні синтезовано гідриди композитів магнію з додатками інтерметаліду $TiFe$ та субоксиду Ti_3Fe_3O . Виявлено, що швидкість механохімічного гідрування магнію у присутності цих додатків зростає вдвічі, а температура десорбції водню знижується на $100...150^\circ C$. З додаванням графіту розмір частинок композитів зменшується, а швидкість утворення гідриду магнію під час помелу та у подальших циклах сорбції-десорбції водню підвищується. Досліджено властивості композитів залежно від різного початкового розміру частинок та чистоти магнію. Композити на основі стружки магнію синтезовано за спрощеною методикою.

Ключові слова: композити, гідрид магнію, сорбція-десорбція водню, інтерметалічні сполуки, субоксид, графіт.

Хома М. С., Похмурський В. І., Чучман М. Р., Василів Х. Б., Івашиків В. Р.,
Рацька Н. Б. Корозійно-механічні властивості та схильність до наводнювання трубної сталі за наявності в середовищі вуглекислого газу і сірководню.....80

Досліджено вплив різних концентрацій CO_2 та H_2S у хлоридно-ацетатному розчині на корозійно-механічні властивості сталі 17Г1С-У. У розчині, насиченому CO_2 , швидкість корозії сталі нижча, ніж за присутності H_2S , але зростає з часом через відсутність захисних карбонатних плівок на поверхні, параметри пластичності у 2–2,7 рази менші, ніж у повітрі, внаслідок виразкових пошкоджень. Швидкість корозії та наводнювання сталі визначає концентрація у середовищі сірководню. За вмісту 100 mg/dm^3 формуються щільні плівки композиції троїліт–макінавіт, які гальмують корозію, за вищою швидкістю корозії зростає через трансформацію сульфідів і утворення дефектніших поверхневих шарів. За концентрації H_2S від 100 mg/dm^3 характеристики міцності сталі знижуються на третину, а пластичності – в 3–5 разів.

Ключові слова: трубні сталі, вуглекислий газ, сірководень, корозія, наводнювання, механічні властивості, мікроструктура.

Dittes A., Mehner T., Friedrich S., Awiszus B., Lanpke T. Кількісна модель для прогнозування швидкості корозії холодновальцьованої сталі 316L.....88

Аустенітну нержавну сталь 316L використовують у багатьох елементах завдяки її хорошій корозійній тривкості. Однак виготовлення елементів впливає на мікроструктуру і, таким чином, може змінити корозійну тривкість сталі. Швидкість корозії сталі 316L за різних умов холодного вальцювання визначали для випад-

ку рівномірної корозії за випробувань у 0,5 М Н₂SO₄. Мікродеформацію, частку мартенситу та залишкове напруження визначали рентгеноструктурним методом. Шорсткість поверхні вимірювали за допомогою лазерної сканівної мікроскопії. Застосовуючи множинну регресію, отримали три різні модельні рівняння для прогнозування швидкості корозії як функції властивостей зразка. Аналіз показав, що особливо просте модельне рівняння, яке прогнозує швидкість корозії лише через пластичну деформацію, демонструє значні відхилення від експериментально встановлених швидкостей корозії. Однак малу розбіжність із експериментальними результатами із середнім відхиленням менше 4% отримали за модельним рівнянням, яке враховує мікроструктурні параметри та шорсткість поверхні. За його використання отримали вищу швидкість корозії за більших мікродеформації та залишкового напруження стиску аустенітної фази, а також більшої шорсткості поверхні. Виявлено, що більша частка мартенситу знижує швидкість корозії.

Ключові слова: *корозія, моделювання, холодна обробка, мікроструктура, аустенітна нержавна сталь, мартенситне перетворення.*

Борисов Ю. С., Вігілянська Н. В., Янцевич К. В., Дем'янов І. А. Корозійна тривкість псевдосплавних покриттів системи мідь–залізо, отриманих електродуговим напиленням.....98

Через зношування і корозію деталей збільшуються експлуатаційні витрати на різних підприємствах. Захистити їх можна шляхом електродугового напилення псевдосплавних захисних покриттів. Покриття отримано одночасним напиленням мідного та залізного дротів. Їх мікроструктуру досліджено за допомогою електронного мікроскопа, а фазовий склад – з використанням рентгенівської дифрактометрії. Виявлено, що таке покриття щільне і складається з ламелей міді та заліза з рівномірно розподіленими оксидними фазами Cu₂O, FeO. Його мікротвердість становить 2,1±0,7 GPa. Електрохімічні дослідження виконано в 3%-му розчині NaCl. Встановлено, що псевдосплавні покриття системи мідь–залізо товщиною 500 μm корозійнотривкі у цьому розчині.

Ключові слова: *псевдосплавне покриття, електродугове напилення, мікроструктура, мікротвердість, фазовий композит, корозійна тривкість.*

Веселівська Г. Г., Гвоздецький В. М., Студент М. М., Задорожна Х. Р., Дзьоба Ю. В. Вплив складу електроліту для твердого анодування алюмінію на корозійну тривкість синтезованих покриттів.....103

З'ясовано дію складу електроліту для твердого анодування алюмінію на корозійну тривкість синтезованих анодних покриттів. Тверде анодування здійснювали за температури –4...0°C впродовж 60 min за густини струму 5 A/dm². Базовий електроліт – 20%-ий водний розчин Н₂SO₄. Для визначення впливу сильних окиснювачів на характеристики анодних шарів до електроліту вводили перекис водню (Н₂О₂) у концентраціях 30; 50; 70 та 100 g/l. З'ясовано, що концентрація 70 g/l Н₂О₂ в електроліті, яка забезпечує синтез найтовстішого та найменш поруватого покриття, є оптимальною. Встановлено, що в початковий момент занурення анодних покриттів, синтезованих в пероксидводневому електроліті, їх корозійна тривкість знижується. Зі збільшенням його концентрації від 30 до 100 g/l струми корозії зростають на 30 і 90%, відповідно. Проте зі збільшенням експозиції покриттів у середовищі їх густини струмів корозії знижуються інтенсивніше зі зменшенням їх пористості. Після 14 days залежність корозійної тривкості покриттів від складу електроліту нівелюється, що може свідчити про повне закриття пор.

Ключові слова: тверде анодування, алюміній, 20%-ий водний розчин H_2SO_4 , перекис водню, оксидний шар, бар'єрний шар, пори, корозійні властивості, пористість.

Хлопик О. П., Зінь І. М., Дацко Б. М., Білий Л. М., Дусягіна З. А., Корній С. А.

Протикорозійні властивості композиційного інгібувального пігмента на основі природного силікату та монофосфату цинку..... 109

Методом механохімічного модифікування отримано композиційний інгібувальний пігмент на основі природного силікату – воластоніту та кислій солі (монофосфату цинку), який має поліпшені захисні властивості на алюмінієвому сплаві в середовищі слабокислих атмосферних опадів та переважає за цими характеристиками просту суміш силікату кальцію з монофосфатом цинку. Згідно з результатами досліджень на поверхні сплаву у витяжці пігмента формується ефективна корозійнотривка плівка, що складається з фосфатів кальцію, цинку та алюмінію.

Ключові слова: корозія алюмінієвого сплаву, природний силікат кальцію, монофосфат цинку, протикорозійний пігмент, атмосферні опади, потенціодинамічна поляризація, імпедансна спектроскопія, сканівна електронна мікроскопія.

Слободян З. В., Маглатюк Л. А., Купович Р. Б., Сободош Н. Й. Інгібування

корозії вуглецевої сталі полівінілпіролідом у хлорид-ацетатному розчині та модельній пластовій воді..... 117

Гравіметричними та електрохімічними методами досліджено вплив полівінілпіролідону (ПВП) з молекулярними масами 12600 та 28000 за концентрацій 0,2; 0,5 та 1 g/dm^3 на швидкість корозії сталі 20 у хлорид-ацетатному розчині та модельній пластовій воді. Встановлено, що в обох середовищах за динамічних умов максимальне гальмування швидкості корозії сталі є за концентрації ПВП 0,5 g/dm^3 . Подальше збільшення концентрації інгібітора до 1 g/dm^3 знижує ступінь захисту суттєвіше у хлорид-ацетатному розчині, ніж у пластовій воді. ПВП більшої молекулярної маси виявляє вищі захисні властивості, що характерно для полімерів, здатних адсорбуватися як лінійно, так і у вигляді клубка.

Ключові слова: екологічно безпечні інгібітори, полівінілпіролідон, швидкість корозії, ступінь захисту, гравіметричні та поляризаційні дослідження.

Стечишин М. С., Скиба М. Є., Стечишина Н. М., Машовець Н. С.,

Медведчук Н. К. Зносостійкість азотованої в тліючому розряді сталі 08X18H10..... 123

Досліджено вплив режимів безводного азотування сталі 08X18H10 на її фазовий склад, розподіл основних легувальних елементів, вміст азоту в нітридному шарі, мікротвердість та питоме зношування. Показано, що зі збільшенням температури і тривалості азотування сталі 08X18H10 одночасно зі зростанням товщини азотованого шару вміст азоту в ньому зменшується і знижується твердість верхньої частини нітридної зони, але при цьому загальна твердість плавно зростає до максимальних значень, характерних для меж нітридної та дифузійної зон. Лабораторні випробування на гідроабразивне зношування показали, що порівняно з вихідним станом зносостійкість азотованої при $P = 120 Pa$, $T = 600^\circ C$ упродовж 3 h сталі 08X18H10 зросла у два рази. Промислові випробування роторів центрифуг на збагачувальних фабриках підтвердили результати лабораторних досліджень.

Ключові слова: азотування, нержавні сталі, зносостійкість.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
H. V. KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE

PHYSICO-CHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

International Scientific-Technical Journal
Founded in January 1965
Published bimonthly

VOLUME 59, № 2, 2023

March – April

CONTENTS

- Korzhyk V. M., Khaskin V. Yu., Kvasnytskyi V. V., Ganushchak O. V., Hos I. D.,
Peleshenko S. I., Demianov O. I., Konoreva O. V., and Fialko N. M.*
Preparing integrated joints of titanium alloys with steels (A review).....5

The analysis of welding processes of titanium alloys with steels is presented. There are such research directions: the use of prefabricated bimetallic transition elements (welded by traditional methods); minimization of energy and heat in the weld area of metals; the use of methods of welding metallurgical engineering. The advances in welding technology have led to innovative solutions such as friction welding with stirring, as well as the use of liquid-phase layers and 3D printing of nanostructured layers at the welded edges to accelerate diffusion processes in diffusion welding. The new methods in welding metallurgical engineering increase the efficiency of Ti-Fe compounds due to the use of multilayer compositions of tantalum or niobium from the side of titanium and bronze – from the side of steel, and also vanadium inserts and its alloys, for example, alloyed with tungsten or chromium. The urgency of further development of standards for support and dissemination of industrial technologies for welding of Ti-Fe joints, training and preparation of technical staff for the implementation of these technologies is noted.

Keywords: *titanium-steel joints, interphase interaction, intermetallics, intermediate layers, strength of joints.*

- Trush V. S., Pohrelyuk I. M., Luk'yanenko O. G., Kravchyshyn T. M.,
and Fedirko V. M.* The influence of heating modes on heat-resistance
of Zr and the Zr-1% Nb alloy.....17

Differences in the oxidation kinetics of zirconium and Zr-1% Nb alloy during heating in air depending on the heating rate, temperature and duration of exposure are revealed. It is shown that increase in the heating rate from 2.5 to 6 and 7.5°C/min reduces the activation energy of the Zr oxidation process in the temperature range of 20...1000°C from 70.2 to 67 and 52.7 kJ/mol, respectively. For the Zr-1% Nb zirconium alloy, increase in the heating rate from 5 to 10 and 20°C/min causes an increase in the activation energy of the oxidation process from 65 to 70.1 and 78.5 kJ/mol, respectively. It is shown that such an increase in the heating rate (of zirconium from 2.5 to 7.5°C/min, and of the Zr-1% Nb alloy from 5 to 20°C/min) causes a decrease in the thickness of the ZrO₂ oxide film. During isothermal exposure for 5 h at 750°C, the Zr-1% Nb alloy and Zr at a temperature of 800°C are oxidized according to the

parabolic law. At 800°C the Zr–1% Nb alloy oxidizes according to the combined law: first, parabolic, and then quasi-linear.

Keywords: *zirconium, oxidation resistance, activation energy, hardness.*

Gorban V. F., Firstov S. A., and Krapivka M. O. The influence of different factors on physico-mechanical properties of high-entropy alloys with fcc lattice.....24

The effect of electron concentration, mixing enthalpy, and dimensional mismatch on the lattice parameter, elastic modulus, and normalized hardness of high-entropy alloys (HEA) is studied. The analysis shows that the lattice parameter, which determines the elastic modulus of HEA, is affected by both the electron concentration and mixing enthalpy. A rectilinear dependence of the normalized hardness of these alloys on the dimensional discrepancy is established. Based on the found regularities, formulas for calculating the hardness and elastic modulus for hard-soluble HEA with a FCC lattice are proposed.

Keywords: *high-entropy alloys, dimensional mismatch, enthalpy of mixing, hardness, modulus of elasticity.*

Nengjun Ben, Vytiaz O. Yu., and Hrabovsky R. S. Mechanical properties of steel for floating offshore platforms under static and cyclic loading.....30

The paper presents the results of a set of experimental tests of Q420 steel samples with quality level Q420B. The chemical composition of steel and its mechanical characteristics, indicated in the certificate for products and determined experimentally, were compared with the standard values in the certificate for products. The results of steel fatigue and corrosion-fatigue tests were analyzed. Fatigue curves in air and artificial seawater were constructed, and the corresponding values of endurance limits at room temperature and at 0°C were also determined. A significant influence of the corrosive environment on fatigue crack propagation rate in steel was established.

Keywords: *Q420B steel, chemical composition of steel, mechanical properties, corrosive environment, fatigue test, S–N curves.*

Gogaev K. O., Sydorchuk O. M., Myslyvchenko O. M., Yevych Y. I., and Hongguang Ye. The influence of operating conditions on the structure and mechanical properties of 4X4H5M4Φ2 die steel.....36

The structure and mechanical properties of 4X4H5M4Φ2 steel in heat-deformed and cast states after quenching and tempering, as well as additional heating are investigated. It is shown that after additional heating of hardened and tempered 4X4H5M4Φ2 steel, which models the operating conditions of the equipment (operating temperature during quasi-stationary exposure), its weakening occurs at 630...650°C, which is associated with the formation of M₇C₃ carbides. Cast steel under these conditions does not have such a carbide phase in the metal structure, which is the cause of an increase in its heat resistance. The expansion of the operating temperature range of cast 4X4H5M4Φ2 steel after the optimal mode of hardening and tempering allows us to use a tool made of this steel up to an operating temperature of 650°C. It is recommended not to use such steel in the cast and heat-deformed states for the manufacture of a tool for hot deformation of non-ferrous metals and alloys, which operates under conditions of cyclic impact loading.

Keywords: *die steel, thermodeformation and heat treatments, phase composition, crystal structure, mechanical properties.*

- Ivanov O. O., Prysiashniuk P. M., Bodrova L. G., Kramar G. M., Marynenko S. Yu., Koval I. V., and Guryk O. Ya. 3D simulation of the structure of soldered materials based on Fe–Ti–Mo–B–C system.....41

The structure of the deposited layer based on the Fe–Ti–Mo–B–C system is investigated. A methodology for 3D modeling of the Fe(Mo, B)₂ grain has been developed, which includes four stages. Blender software is used for 3D modeling, and the Image Pro Plus software – for image analysis and measurements. The results show that in the Fe–Ti–Mo–B–C surfacing, the main strengthening phase Fe(Mo, B)₂ is formed around TiC grains, which are modifiers.

Keywords: *surfacing, powder arc welding, 3D modeling.*

- Kushnir R. M., Zhydyk U. V., and Flyachok V. M. Thermoelastic state of a nonhomogeneous orthotropic cylindrical shell with an open profile under transient heating.....47

The thermoelastic state of an inhomogeneous orthotropic circular cylindrical shell with an open profile under the condition of convective heat exchange between the surfaces of the shell and the environment is investigated. A generalized shear mathematical model of heterogeneous anisotropic shells of the first order and two-dimensional non-stationary heat conduction equations are used in this case. Using the methods of Fourier and Laplace integral transformations, an analytical solution to the non-stationary problem of thermal conductivity and the quasi-static problem of thermoelasticity for a finite hinged shell supported at the edges is found. The stress state and deflections of the shell are calculated for the case of material properties change in the radial direction according to the power law.

Keywords: *thermoelasticity, cylindrical shell, heterogeneous material, temperature load.*

- Skalskyi V. R., Mokryi O. M., Zvirko O. I., Kyryliv V. I., Romanyshyn I. M., and Maksymiv O. V. Assessment of characteristics of nanocrystalline layer using the surface acoustic waves56

The effect of the nanocrystalline layer formed by mechanical pulse treatment on the velocity of surface acoustic waves in 65Г steel samples was studied. Acoustic waves with frequencies equal to 3; 6 and 9 MHz were used. Different thicknesses of the nanocrystalline layer were obtained by the stepwise grinding method. The method of estimating the acoustic properties of the formed layer based on the velocity of surface acoustic waves in the case when the depth of wave penetration is greater than its thickness was described. To determine the acoustic characteristics of the nanocrystalline layer, an additional measurement of its thickness was carried out using metallographic studies.

Keywords: *mechanical pulse treatment, velocity of surface acoustic waves, nanocrystalline layer, plastic deformation.*

- Chausov M. G., Maruschak P. O., and Pylypenko A. P. The influence of impact-oscillation load on hardness of surface layers of Д16чАТВ aluminium alloy.....62

The effect of impact-oscillation loading of a given intensity was evaluated, in particular, using nanosolutions of tungsten carbide, carbon, as well as Al + Cu and Al + Cu + Mg nanosolutions at a concentration of 50:50% and 33:33:33%, respectively, on the hardness of the surface layers of the Д16чАТВ aluminum alloy. The relationship between the parameters of dynamic non-equilibrium processes (DNP), which change the structural phase state and mechanical properties of the alloy and the surface hardness of the material, was identified and described.

Keywords: *aluminum alloy Д16АТВ, impact-oscillation loading, change of structural and mechanical state, hardness.*

Hembara O. V., Holian O. M., Chepil O. Ya., Paliukh V. M., Sapuzhak Ya. I., and Soviak I. M. Assessing life time of a shaft with a crack in hydrogen67

A theoretical-experimental approach for predicting the kinetics of fatigue crack growth and determining the lifetime of the responsible elements of structures in hydrogen is proposed. Based on the created calculation model of fatigue crack growth and experimentally constructed kinetic diagrams of fatigue failure of 35XH3MΦA steel, the residual life of the rotor shaft of the steam generator, weakened by a surface semi-elliptical crack in air and in gaseous hydrogen environment, is determined. It is established that hydrogen reduces the residual life of the rotor shaft by two orders of magnitude in hydrogen, compared to its residual life in air.

Keywords: *fatigue crack, hydrogen gas, fatigue fracture kinetic diagram, lifetime prediction.*

Berezovets V. V., Koniuk O. P., Denys R. V., and Zavalii I. Yu. Synthesis and hydrogen sorption of MgH₂ composites with TiFe and Ti₃FMgH₂ additives.....73

Hydrides of magnesium composites with additions of TiFe intermetallic and Ti₃Fe₃O suboxide was synthesized by mechanical grinding in hydrogen. It was found that the rate of mechanochemical hydrogenation of magnesium in the presence of these additives doubles, and the temperature of hydrogen desorption decreases by 100...150°C. With the addition of graphite, the particle size of the composites decreases, and the rate of formation of magnesium hydride during grinding and in subsequent cycles of hydrogen sorption-desorption increases. The properties of composites depending on different initial particle sizes and magnesium purity were investigated. Composites based on magnesium shavings were synthesized using a simplified method.

Keywords: *composites, magnesium hydride, sorption-desorption of hydrogen, intermetallic compounds, suboxide, graphite.*

Khoma M. S., Pokhmurskii V. I., Chuchman M. R., Vasylyv Kh. B., Ivashkiv V. R., and Ratska N. B. Corrosion-mechanical properties and susceptibility to hydrogenation of pipe steel in the presence of carbon oxide and hydrogen sulphide in environment.....80

The effect of different concentrations of CO₂ and H₂S in a chloride-acetate solution on the corrosion-mechanical properties of 17Г1С-Y steel is studied. In a solution saturated with CO₂, the corrosion rate of steel is lower than in the presence of H₂S, but increases over time due to the absence of protective carbonate films on the surface, plasticity parameters are 2–2.7 times lower than in air, due to ulcerated surface damage. The corrosion rate and hydrogenation of steel is determined primarily by the hydrogen sulfide concentration in the environment. At a concentration of 100 mg/dm³, dense films of the troilite-mackinavite composition are formed, which inhibit corrosion. At higher concentrations, the corrosion rate increases due to the sulfides transformation and the formation of surface layers with defects. With an increase in the H₂S concentration from 100 mg/dm³, the strength characteristics of steel decrease in three, and plasticity by 3–5 times.

Keywords: *pipe steels, carbon dioxide, hydrogen sulfide, corrosion, hydrogenation, mechanical properties, microstructure.*

Dittes A., Mehner T., Friedrich S., Awiszus B., and Lanpke T. Quantitative model for the prediction of the corrosion rate of cold-rolled 316L steel.....88

The austenitic stainless steel 316L is used for numerous components due to its excellent corrosion resistance. However, forming of components influences the microstruc-

ture and can thus change the corrosion resistance of the steel. In this context, the corrosion rate of the steel 316L is determined for the case of uniform corrosion of various cold-rolled conditions by ageing tests in 0.5 M H₂SO₄. The microstrain, the martensite fraction, and the residual-stress state are quantified using X-ray diffraction. The surface roughness is measured by laser scanning microscopy. Three different model equations are derived by means of multiple regression to predict the corrosion rate as a function of the specimen properties. The analysis shows that a particularly simple model equation, which predicts the corrosion rate only via the plastic strain, shows insufficiently large deviations from the experimentally determined corrosion rates. However, a low divergence to the experimental results with a mean deviation of less than 4% is achieved by using a model equation that takes microstructural parameters and the surface ratio into account. Within this model equation, an increased corrosion rate is achieved with higher microstrain and residual compressive stress of the austenite phase as well as a higher surface-area ratio. A higher fraction of martensite is found to lower the corrosion rate.

Keywords: *corrosion, modeling, cold-forming, microstructure, austenitic stainless steel, martensitic transformation.*

Borisov Yu. S., *Vigilianska N. V., Iantsevitch C. V., and Demianov I. A.*

Corrosion resistance of pseudoalloy copper-iron coatings
obtained by the electric arc spraying.....98

High wear and corrosion of parts lead to an increase in operating costs at various plants. These parts can be protected by the electric arc spraying of pseudoalloy protective coatings. The coating was obtained by simultaneous spraying of copper and iron wires. The microstructure was investigated with an electron microscope and the phase composition was assessed by X-ray diffractometry. The porosity and microhardness of the coating were also evaluated. It is shown that such coating has a dense structure and consists of Cu and Fe metallic lamellas together with homogeneously distributed minor Cu₂O, FeO oxide phases. The microhardness of the coating is 2.1±0.7 GPa. An electrochemical test of the coating was performed in a 3% NaCl solution. It was found that the pseudoalloy coating of copper-iron system with a thickness of 500 μm have high corrosion resistance in this solution.

Keywords: *pseudoalloy coatings, electric arc spraying, microstructure, microhardness, phase composition, corrosion resistance.*

Veselivska H. H., Hvozdetzkyi V. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R.,

and Dzioba Yu. V. The influence of the electrolyte composition for hard
anodizing of aluminium on corrosion resistance of synthesized coatings.....103

The effect of the composition of the electrolyte for hard anodizing of aluminum on the corrosion resistance of the synthesized anodic coatings is studied. The hard anodizing process is carried out at a temperature of -4...0°C for 60 min at a current density of 5 A/dm². The basic electrolyte is a 20% aqueous solution of H₂SO₄. To determine the effect of strong oxidants on the characteristics of the anode layers, hydrogen peroxide (H₂O₂) is added to the electrolyte in concentrations of 30; 50; 70 and 100 g/l. It is found that the concentration of 70 g/l H₂O₂ in the electrolyte, which ensures the synthesis of the thickest and least porous coating, is optimal. It was established that at the initial moment of immersion of anodic coatings synthesized in hydrogen peroxide electrolyte, their corrosion resistance decreases. When its concentration increases from 30 to 100 g/l, corrosion currents increase by 30 and 90%, respectively. However, with increasing exposure of coatings in the environment, their corrosion current density decreases more intensively with a decrease in their porosity. After 14 days, no dependence of the corrosion durability of the coatings on the composition of the electrolyte observed, which may indicate a complete closure of the pores.

Keywords: *solid anodizing, aluminum, 20% aqueous solution of H₂SO₄, hydrogen peroxide, oxide layer, barrier layer, pores, corrosion properties, porosity.*

- Khlopyk O. P., Zin I. M., Datsko B. M., Bilyy L. M., Duriagina Z. A.,
and Korniy S. A. Anticorrosion properties of composite inhibiting pigment
based on natural calcium silicate and zinc monophosphate..... 109

A composite inhibiting pigment based on natural silicate – wollastonite and acid salt (zinc monophosphate) was obtained by the method of mechanochemical modification. The new composite pigment wollastonite–zinc monophosphate has high protective properties on aluminum alloy in the environment of weakly acidic atmospheric precipitation, and is superior to a simple mixture of calcium silicate and zinc monophosphate in protective characteristics. According to the research results, an effective corrosion-resistant film consisting of calcium, zinc and aluminum phosphates is formed on the surface of the alloy in the extraction of the composite pigment.

Keywords: *an aluminum alloy corrosion, natural calcium silicate, zinc monophosphate, anticorrosion pigment, atmospheric precipitation, potentiodynamic polarization, impedance spectroscopy, scanning electron microscopy.*

- Slobodyan Z. V., Mahlatiuk L. A., Kupovych R. B., and Sobodosh N. Yo. Inhibition
of carbon steel corrosion by polyvinylpyrrolidone in chloride-acetate
solution and in model strattal water..... 117

The influence of polyvinylpyrrolidone (PVP) with molecular mass of 12600 and 28000 at concentrations of 0.2; 0.5 and 1 g/dm³ on the corrosion rate of 20 steel in the chloride-acetate solution and in the model reservoir water was investigated by gravimetric and electrochemical methods. Under dynamic conditions maximum inhibition of the steel corrosion rate is observed at a PVP concentration of 0.5 g/dm³ in both media. A further increase in inhibitor concentration to 1 g/dm³ reduces the degree of protection more significantly in chloride-acetate solution than in the reservoir water. The PVP with a higher molecular mass exhibits higher protective properties, which is typical of polymers capable of adsorbing both linearly and in a ball.

Keywords: *environment friendly inhibitors, polyvinylpyrrolidone, corrosion rate, degree of protection, gravimetric and polarization studies.*

- Stechyshyn M. S., Skyba M. Ye., Stechyshyna N. M., Mashovets N. S.,
and Medvedchuk N. K. Wear resistance of glow-discharge nitrided
08X18H10 steel 123

The influence of the modes of anhydrous nitriding of 08X18H10 steel on the phase composition, distribution of the main alloying elements, and the content of nitrogen in the nitride layer, microhardness distribution and specific wear of nitrided austenitic stainless steel was investigated. The conducted studies showed that with an increase in the temperature and duration of nitriding of 08X18H10 steel, simultaneously with the increase in the thickness of the nitrided layer, the nitrogen content in it decreases and a drop in the hardness of the upper part of the nitride zone is observed. At the same time the hardness gradually increases to the maximum values typical of the boundary of the nitride and diffusion zones. Laboratory tests on hydroabrasive wear showed that, compared to the initial state, the wear resistance of 08X18H10 steel, nitrided at $P = 120$ Pa, $T = 600^{\circ}\text{C}$ for 3 h, increased twofold. Industrial tests of centrifuge rotors at processing plant confirmed the results of laboratory studies.

Keywords: *nitriding, stainless steels, wear resistance.*