

## 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. МАРУЦАК, О. П. ОСТАШ, 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, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. SKALSKIY, 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. (Eng.), Prof. H. M. Nykyforchyn

Прийняття до друку статей та коротких викладів здійснюється на підставі незалежного анонімного рецензування

**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 02.12.2023. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.  
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 04/22 від 04.12.2023. 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

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

# ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

**ТОМ 59, № 6, 2023**

листопад – грудень

## ЗМІСТ

*Нарівський О. Е., Сніжної Г. В., Пуліна Т. В., Сніжної В. Л., Солідор Н. А.*  
Вплив питомої магнетної сприйнятливості сталей AISI 304 та 08X18H10  
на їх граничні потенціали в хлоридовмісних середовищах.....5

Потенціодинамічними методами досліджено тривкість сталей AISI 304 і 08X18H10 до щілинної корозії в хлоридовмісних середовищах. Встановлено ширину зазору (0,3 mm) між зразком і контртілом як модель між суміжними пластинами пластинчатих теплообмінників. За площами петлі гістерезису побудованих анодних потенціодинамічних кривих прямого і зворотного ходу порівняно об'єм локальних пошкод від щілинної корозії досліджуваних сталей. Максимальні площі петлі гістерезису сталей та об'єм локальних корозійних пошкод встановлено в плавках з найменшими ( $2,23 \cdot 10^{-8}$  і  $2,24 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg) та найбільшим ( $2,31 \times 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg) значеннями питомої парамагнетної сприйнятливості  $\chi_0$  аустеніту. Виявлено, що потенціал вільної корозії  $E_{\text{сорт}}$  сталей інтенсивно зсувається у від'ємний (від -0,28 до -0,41 V), а репасивації  $E_{\text{тр}}$  і щілинної корозії  $E_{\text{сrev}}$  – у додатний бік (від -0,38 до -0,29 V і від -0,1 до 0,1 V) відповідно зі збільшенням параметра  $\chi_0$  від  $2,23 \cdot 10^{-8}$  до  $2,25 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg, що сприяє зростанню їх  $\Delta E$ -критерію в щілини від 0,02 до 0,69 V та опору щілинній корозії. Це зумовлено тим, що в цьому інтервалі значень  $\Delta E$  зміну  $\chi_0$  визначають вмістом C, N, S, P і Cr у твердому розчині аустеніту сталей. Показано, що зі збільшенням параметра  $\chi_0$  сталей до  $2,31 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg їх потенціал  $E_{\text{сорт}}$  зсувається у додатний від -0,41 до -0,32, а  $E_{\text{тр}}$ ,  $E_{\text{сrev}}$  у від'ємний бік від 0,29 до -0,15 і від 0,1 до -0,02 V відповідно, що сприяє зниженню  $\Delta E$ -критерію сталей від 0,65 до 0,14 V та їх опору щілинній корозії. Параметр  $\chi_0$  сталей є інтегральною характеристикою парамагнетного стану аустеніту і його можна застосовувати для оцінювання опору щілинній корозії в хлоридовмісних середовищах.

**Ключові слова:** щілинна корозія, аустеніт, питома магнетна сприйнятливість, структурна гетерогенність, граничні потенціали, хлоридовмісне середовище.

*Зінь І. М., Дацко Б. М., Хлопик О. П., Сободош Н. Й., Корній С. А.* Вплив цеоліт-фосфатного протикорозійного пігменту на захисні властивості епоксидного покриття на вуглецевій сталі.....14

Досліджено вплив цеоліт-фосфатного протикорозійного пігменту, одержаного механохімічним методом, на захисні властивості епоксидного покриття на вуглецевій сталі. Методами електрохімічної імпедансної спектроскопії, оптичної 3D профілометрії та випробуваннями у камері тепла і вологи встановлено, що з його додаванням до епоксидної ґрунтовки суттєво зменшується швидкість підплівкової корозії металу.

**Ключові слова:** *вуглецева сталь, епоксидне покриття, протикорозійний цеоліт-фосфатний пігмент, механохімічна модифікація, підплівкова корозія.*

*Герцик О. М., Іжик О. Б., Єзерська О. А., Ковбуз М. О., Головчук М. Я., Еліяшевський Ю. І., Ташиак М. С.* Особливості модифікації поверхні аморфних сплавів олігомерними покриттями зі спиртових розчинів.....22

Методами вольтамперометрії, імпедансної спектроскопії, сканівної електронної та атомно-силової мікроскопії досліджено модифікацію контактної та зовнішньої поверхонь стрічкових аморфних сплавів  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  і  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$  1%-ми розчинами олігопероксидів на основі вінілацетату, 2-трет-бутилперокси-2-метил-5-гексен-3-їну (ВЕР), малеїнового ангідриду та н-вініл пірролідону, ВЕР і 2-фосфоноксі етил 2-метакрилату в ізопропіловому спирті. Встановлено формування щільніших покриттів на поверхні стрічки сплаву  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$  та згладжування її рельєфу внаслідок локальної адсорбції макромолекул олігопероксидів.

**Ключові слова:** *аморфні сплави, модифікація, олігопероксидні покриття, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.*

*Мартинюк А. В., Стечишин М. С., Цепенюк М. І., Борис М. М., Бандура В. М., Міхалевський В. Ц.* Кавітаційно-ерозійне зношування амінопласту в модельних середовищах цукрового виробництва.....28

Проаналізовано показники кавітаційно-ерозійної тривкості реактопластичних полімерних матеріалів, зокрема амінопластів марок КФА-1, КФА-2 та КМФА-3, у нейтральному, кислому і лужному середовищах. Отримані результати розглянуто у межах фізико-хімічної механіки руйнування полімерів з урахуванням специфіки кавітаційного навантаження, виду середовища і можливих механізмів їх руйнування.

**Ключові слова:** *кавітаційно-ерозійне зношування, амінопласти, корозивно-активні середовища.*

*Шишкіна Ю. О., Баглюк Г. А., Кирилюк Є. С., Кирилюк С. Ф., Толочина О. В., Талаш В. М.* Структура, фазовий склад та механічні і корозійні властивості алюмоматричних композитів.....34

Досліджено структуру, фазовий склад, основні механічні та корозійні властивості порошкових алюмоматричних композитів, отриманих методом гарячого штампування (ГШ). За результатами досліджень мікроструктури синтезованих лігатур різного складу виявлено світлі частинки зміцнювальної фази різноманітної дисперсності та форми, які досить рівномірно розподілені у сірій металевій матриці. Методом рентгенофазового аналізу встановлено чіткі лінії карбиду титану та алюмінію і низку ліній, що належать алюмінідам титану  $Al_3Ti$ ,  $Al_5Ti_3$ ,  $Al_2Ti$ ,  $AlTi_3$ ,  $Al_5Ti_2$ . Алюмоматричні композиційні матеріали зміцнено лігатурами системи Al–C–Ti різного складу. Виявлено, що у їх мікроструктурі є дві фази: основа – матриця з алюмінію, у якій розподілені агломерати лігатури. Ком-

позити, леговані 15 mass% лігатури (20Al–64Ti–16C) у вихідній шихті та одержані методом спікання та ГШ, мають підвищені характеристики міцності і тривалості у 3,5%-му розчині NaCl.

**Ключові слова:** алюмоматричні композиційні матеріали, механічні та корозійні властивості, електрохімічна корозія, гаряче штампування.

*Балицький О. І., Сиротюк А. М., Іваськевич Л. М.* Вплив газоподібного водню на властивості жароміцного нікелькобальтового сплаву за статичних і циклічних навантажень.....40

Досліджено вплив водню за тисків до 65 МПа на міцність, пластичність і малоциклову довговічність зразків зі сплаву ХН60КМЮБВТФ за температур 293...1073 К, швидкостей короткочасного розтягу 0,1...100 mm/min, частоти і амплітуди циклічного згину 50 Hz та 0,8 і 1,6%, відповідно. Встановлено, що характеристики зразків зменшуються зі зростанням тиску водню, зниженням швидкості і амплітуди навантаження у водні. За максимального окрихчення при тиску водню 65 МПа і швидкості розтягу 0,1 mm/min границя міцності та істинне напруження розриву гладких зразків зменшуються у 1,5 раза, а границя міцності зразків із концентратором напружень – більш ніж у два рази. При цьому відбувається крихке міжзеренне руйнування і практично повністю відсутня пластична деформація зразків. З підвищенням температури вплив водню зменшується, однак залишається відчутним до 1073 К.

**Ключові слова:** жароміцний нікелькобальтовий сплав, водневе окрихчення, малоциклова довговічність, міцність, пластичність.

*Цирульник О. Т., Студент О. З., Звірко О. І., Демянчук Д. О., Венгринюк О. І.* Оцінювання водневої крихкості експлуатованої трубної сталі методом *J*-інтеграла .....48

Руйнування, зумовлене водневим окрихченням, є основною проблемою для надійності та безпеки транспортування водню газопроводами. Трубним сталям властива підвищена пластичність, тому для визначення їх в'язкості руйнування віддають перевагу методам нелінійної механіки руйнування, серед яких – метод *J*-інтеграла. Досліджено вплив попереднього електрохімічного наводнювання за помірним режимом на в'язкість руйнування неексплуатованої та експлуатованої 34 роки на магістральному газопроводі сталі API 5L X67. Методична особливість експериментів – використання різної швидкості механічного навантаження зразків з тріщинами. Виявлено вплив тривалої експлуатації сталі на опір крихкому руйнуванню залежно від умов випроб.

**Ключові слова:** трубна сталь, в'язкість руйнування, метод *J*-інтеграла, експлуатаційна деградація, воднева крихкість.

*Скальський В. Р., Станкевич О. М.* Акустико-емісійний критерій оптимізування кількості фібри в бетонній матриці.....56

Досліджено вплив об'ємної частки високоміцної фібри на механічні характеристики та акустичну емісію (АЕ) армованих бетонних балок під час випробувань методом триточкового згину. Запропоновано АЕ критерій оптимізації кількості фібри для забезпечення максимальної міцності на розтяг композитів на основі бетонної матриці, яким є мінімальне значення коефіцієнта міцності – відношення міцності на розтяг композиту до напружень початку генерування сигналів АЕ, що супроводжують зсувні механізми руйнування. Встановлено числові значення цього коефіцієнта для фібробетонів із базальтовою та сталевою фібрами.

**Ключові слова:** акустична емісія, базальтова та сталева фібри, фібробетон, вейвлет-перетворення, оптимізування об'ємної частки фібри.

- Іваницький Я. Л., Бліхарський З. Я., Максименко О. П., Панченко О. В.,  
Бліхарський Я. З. Розроблення методології моніторингу технічного стану  
мостових конструкцій і встановлення безпечного терміну експлуатації.....64

Розроблено методологію визначення технічного стану залізобетонних мостових конструкцій, яка ґрунтується на встановленні глибини та місця найбільшого прогину з допомогою лазерної проекційної системи, а також підхід для знаходження напружено-деформованого стану (НДС) по висоті балки. Для цього використано енергетичний спосіб, який передбачає розрахунок енергії пружно-пластичного деформування бетону і арматури. Експериментально встановлено питому енергію руйнування як інваріантну характеристику міцності бетону на розтяг і стиск, а також арматури на розтяг. Побудовано істинні діаграми деформування та руйнування зразків бетону, відібраних з конструкції. Експериментальні результати досліджень НДС за згину залізобетонної балки добре узгоджуються із обчисленими методом скінченних елементів.

**Ключові слова:** залізобетонна балка, питома енергія руйнування бетону на стиск і розтяг, оптико-цифрова кореляція спекл-зображень.

- Кречковська Г. В., Войтович А. А., Дзюбик А. Р., Кіндрацький Б. І.,  
Лампівський О. С., Богун Л. І. Відмінності структури та властивостей  
металу балки мостової конструкції.....72

Проаналізовано механічні властивості сталі 15ХСНД балки мостової конструкції. Встановлено, що характеристики міцності та пластичності, а також опір крихкому руйнуванню сталі її стінки відповідають регламентованим значенням. Міцність і пластичність сталі полицки не виходить за нормовані межі, але низькі показники її ударної в'язкості та крихкі відколи на макрозламах зразків свідчать про схильність до крихкого руйнування. Виявлено, що на повздовжніх зразках опір крихкому руйнуванню металу з полицки балки знизився втричі, а на поперечних – вдвічі проти властивому сталі зі стінки балки.

**Ключові слова:** сталь, балки, мостові конструкції, механічні властивості, ударна в'язкість.

- Гануліч Б. К. Напружений стан м'якого прошарку в умовах плоскої  
та осесиметричної деформації.....78

Розглянуто напружений стан м'якого прошарку за контактного зміцнення, коли розтягувальні напруження у середньому більші за границю плинності металу прошарку, але менші від напружень, які зумовлюють загальну плинність. Отримано аналітичні вирази за плоскої деформації та осесиметричного розтягу. У першому випадку напруження визначені зі застосуванням функції напружень Ері у вигляді відповідного полінома, у другому – на основі функції напружень п'ятого степеня, яка будується на відповідних поліномах Лежандра. Напруження задовольняють диференціальні умови рівноваги та крайові умови.

**Ключові слова:** м'який прошарок, плоска деформація, осесиметрична деформація, напружений стан.

- Трембач Б. О., Сільченко Ю. А., Суков М. Г., Рацька Н. Б., Дурягіна З. А.,  
Красношанка І. В., Кабацький О. В., Реброва О. М. Розроблення моделі  
засвоєння легувальних елементів самозахисного порошкового дроту  
та оптимізація складу його шихти.....83

Застосування екзотермічних додатків (ЕД) для шихти є одним із дієвих способів підвищення енергоефективності наплавлення порошковими дротами. Розроблено математичну модель залежності загального коефіцієнта засвоєння ( $\eta(SS)$ ) від співвідношень окиснювача до графіту (CuO/C) та окиснювача до порошку алю-

мінію (CuO/Al) в складі ЕД. Рекомендовано їх використовувати для оцінки переходу легувальних елементів шихти в наплавлений метал і для прогнозування  $\eta(SS)$ . Встановлено оптимальний вміст компонентів порошкового дроту.

**Ключові слова:** наплавлення, самозахисний порошковий дріт, загальний коефіцієнт переходу легувальних елементів, екзотермічний додаток, симплекс-центроїдний план експерименту, оптимізація.

*Земляний А. О., Бись С. С., Щепетов В. В., Харченко С. Д., Гладкий Я. М.*

Енергетичні аспекти трибосистем.....90

Досліджено енергетику трибосистем з позиції структурно-енергетичної теорії і універсального явища структурної пристосовності. Виявлено їх загальні закономірності та визначено характеристики. Під час розгляду енергетичних зв'язків триботехнічних параметрів, спираючись на загальноприйняті уявлення про термодинамічні співвідношення, враховано енергетичний процес в умовах пластичної деформації як конкуренцію двох взаємопов'язаних тенденцій. Звідси енергія, яка пов'язана з накопиченням пошкоджуваності та термічним зміцненням, ініціює руйнування поверхневого шару трибосистем.

**Ключові слова:** структура, енергетика трибосистем, деформація, зношування.

*Погрелюк І. М., Студент М. М., Задорожна Х. Р., Лаврись С. М.,*

*Кравчишин Т. М., Ковальчук І. В.* Трибологічні характеристики титану

після комбінованого оброблення.....95

Досліджено комбіноване оброблення, яке охоплює термодифузійне насичення елементами втілення (киснем, азотом) та електроіскрове легування графітовим електродом. Встановлено вплив приповерхневого зміцнення та послідовності ланок комбінованого оброблення на фазовий склад, структуру, поверхневу мікротвердість покриттів та трибологічні характеристики технічно чистого титану в парі зі сталлю.

**Ключові слова:** титан, електроіскрове легування, оксидування, азотування, комбіноване оброблення, твердість, коефіцієнт тертя.

*Івасенко І. Б., Берегуляк О. Р., Мандзій Т. С., Посувайло В. М., Воробель Р. А.*

Моделювання лазерно-модифікованого шару, армованого

частинками карбіду кремнію на алюмінієвому сплаві.....103

Розроблено методи моделювання частинок карбіду кремнію асиметричної форми та аналізу зображень поверхневого шару алюмінієвого сплаву, зміцненого такими частинками. Виконано 3D моделювання розподілу частинок карбіду кремнію різних розмірів та заповнення в поверхневому шарі алюмінієвого сплаву. Встановлено розподіл площ карбіду кремнію в різних площинах перерізу та за різного об'ємного заповнення зміцненого шару.

**Ключові слова:** карбід кремнію, 3D моделювання, алюмінієвий сплав, сегментація, обробка зображень.

*Головко В. В., Костін В. А., Жуков В. В.* Вплив наномодифікування

на мікроструктуру металу зварних швів низьколегованих сталей.....111

Досліджено інокулювання до зварювальної ванни нанорозмірних частинок тугоплавких оксидів  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$ . Показано, що цей процес для оксидів з низьким рівнем невідповідності ґратці  $\delta$ -Fe та підвищеним змочуванням рідким залізом ( $MgO$ ,  $ZrO_2$ ) сприяє зростанню розмірів дендритів, які формуються під час кристалізації розплаву. Встановлено, що модифікування металу оксидами  $MgO$ ,  $ZrO_2$  знижує твердість полігонального фериту та підвищує вміст нижнього

бейніту в мікроструктурі швів, стійкість металу швів проти крихкого руйнування, а оксидами  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  – твердість полігонального фериту, вміст верхнього бейніту в мікроструктурі швів та міцність зварних швів низьколегованих сталей.

**Ключові слова:** *низьколегована сталь, зварювання, мікроструктура, модифікування, інокулювання, нанорозмірні оксиди.*

*Горбань В. Ф., Крапівка М. О., Мисливченко О. М.* Умови формування та властивості високоентропійних сплавів, які утворюють  $\sigma$ -фазу.....118

Досліджено високоентропійні сплави (ВЕС) на основі елементів V–IX груп таблиці Менделєєва, які здатні утворювати між собою  $\sigma$ -фазу. Проконтрольовано її утворення в інтервалі електронної концентрації 6,7...8 e/at. Показано вплив електронної концентрації на вміст  $\sigma$ -фази у ВЕС з елементами, які утворюють  $\sigma$ -фазу у двокомпонентній системі. Визначено умови утворення однофазної структури  $\sigma$ -фази за кристалізації багатокомпонентних ВЕС. Встановлено межі існування 100% високоентропійної  $\sigma$ -фази та вплив параметрів ґратки на властивості. Зниження розміру параметрів  $c$  та  $a$   $\sigma$ -фази призводить до підвищення як твердості, так і модуля пружності сплавів зі структурою однофазної високоентропійної  $\sigma$ -фази.

**Ключові слова:** *високоентропійні сплави,  $\sigma$ -фаза, ентальпія змішування, твердість, модуль пружності.*

*Базиліак Л. І., Шепарович Р. Б., Лютий П. Я., Шеніда М. В., Кунтий О. І., Киця А. Р.* Синтез та каталітичні властивості біметалевих наночастинок Ag(Pd).....124

Методом гальванічного заміщення йонів паладію наночастинками срібла синтезовано біметалеві наноструктури Ag(Pd). За результатами сканівної електронної мікроскопії, енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу та порошкової дифракції X-променів встановлено, що їх можна розглядати як наносистеми типу “ядро–оболонка”, в якій роль ядра відіграватимуть агломерати срібла, а оболонки – осаджені на їх поверхні наночастинки паладію розміром 5...15 nm. Встановлено, що з додаванням наночастинок Ag(Pd) до реакційної системи каталітичне аеробне рідиннофазове окиснення бензилового спирту пришвидшується в 14 разів.

**Ключові слова:** *біметалеві наночастинки, срібло, паладій, аеробне окиснення, бензиловий спирт.*

## НАШІ ВТРАТИ

**Василь Іванович Похмурський**.....131

*Перелік статей, опублікованих у журналі “ФХММ” за 2023 р.*.....133

*Авторський покажчик*.....139



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, № 6, 2023**

November – December

---

---

## CONTENTS

*Narivs'kyi O. E., Snizhnoi G. V., Pulina T. V., Snizhnoi V. L., and Solidor N. A.*

The influence of the specific magnetic susceptibility of AISI 304 and 08X18H10 steels on their boundary potentials in chloride-containing media.....5

The resistance of AISI 304 and 08X18H10 steels to crevice corrosion in chloride-containing media was studied using potential-dynamic methods. The preset gap width of 0.3 mm between the sample and the counter body simulates the gap between adjacent plates of plate like heat exchangers. The area of the hysteresis loop of the constructed anode potential-dynamic curves of the forward and reverse stroke was used to compare the volume of local damage caused by crevice corrosion of the studied steels. The maximum areas of the steel hysteresis loop and the volume of local corrosion damage in the ingots with the lowest ( $2.23 \cdot 10^{-8}$  and  $2.24 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg) and highest ( $2.31 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg) values of the specific paramagnetic susceptibility  $\chi_0$  of austenite have been established. It is found that the free corrosion potential  $E_{\text{corr}}$  of steels intensively shifts in the negative direction (from  $-0.28$  up to  $-0.41$ ), and the repassivation  $E_{\text{tp}}$  and crevice corrosion  $E_{\text{crev}}$  – in the positive direction from  $-0.38$  up to  $-0.29$  and from  $-0.1$  to  $0.1$  V, respectively, with an increase in the parameter  $\chi_0$  from  $2.23 \cdot 10^{-8}$  up to  $2.25 \times 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg, which contributes to an increase in their  $\Delta E$ -criterion from 0.02 up to 0.69 V and resistance to crevice corrosion. This is due to the fact that in this range of values, the change in the  $\chi_0$  parameter is determined by deviations in the content of C, N, S, P and Cr in the solid solution of austenite in steels. It is shown that with an increase in the parameter  $\chi_0$  of steels to  $2.31 \cdot 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg, their potential  $E_{\text{corr}}$  shifts in the positive direction from  $-0.41$  up to  $-0.32$ , and  $E_{\text{tp}}$ ,  $E_{\text{crev}}$  – in the negative direction from 0.29 up to 0.15 and from 0.10 up to  $-0.02$  V, respectively, which contributes to a decrease in the  $\Delta E$  criterion of steels from 0.65 up to 0.14 V and their resistance to crevice corrosion. The  $\chi_0$  parameter of steels is an integral characteristic of the paramagnetic state of austenite and can be used to assess their resistance to crevice corrosion in chloride-containing media.

**Keywords:** *crevice corrosion, austenite, specific magnetic susceptibility, structural heterogeneity, repassivation potentials, chloride-containing media.*

- Zin I. M., Datsko B. M., Khlopyk O. P., Sobodosh N. Yo., and Korniy S. A.  
 The influence of zeolite-phosphate corrosion protection pigment  
 on the protective properties of epoxy coating on carbon steel.....14

The effect of the zeolite-phosphate anti-corrosion pigment obtained by the mechano-chemical method on the protective properties of the epoxy coating on carbon steel was investigated. Using the methods of electrochemical impedance spectroscopy, optical 3D profilometry, and tests in a heat and humidity chamber, it was established that the addition of such a pigment to an epoxy primer provides a significant reduction in underfilm corrosion of metal.

**Keywords:** carbon steel, epoxy coating, anti-corrosion zeolite-phosphate pigment, mechanochemical modification, underfilm corrosion.

- Hertsyk O. M., Izhyk O. B., Yezerska O. A., Kovbuz M. O., Holovchuk M. Ya.,  
 Eliyashkevsky Yu. I., and Tashak M. S. Peculiarities of modification  
 of amorphous alloys surface with oligomer coatings from alcohol solutions.....22

The modification of the contact and outer surfaces of strip amorphous alloys  $Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$  and  $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$  with 1% solutions of oligoperoxides based on vinyl acetate, 2-tert-butylperoxy-2-methyl-5-hexen-3-ine (VEP), maleic anhydride and n-vinyl pyrrolidone, VEP and 2-phosphonoxy ethyl 2-methacrylate in isopropyl alcohol was investigated by the methods of voltammetry, impedance spectroscopy, scanning electron and atomic force microscopy. The formation of denser coatings on the surface of the  $Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$  strip and the smoothing of its topography due to the local adsorption of macromolecules of oligoperoxides were established.

**Keywords:** amorphous alloys, modification, oligoperoxide coatings, corrosion resistance, electrochemical characteristics.

- Martyniuk A. V., Stechyshyn M. S., Tsepenyuk M. I., Boris M. M., Bandura V. M.,  
 and Mikhalevskiy V. Ts. Cavitation-erosion wear of amino plastic  
 in simulated environments of sugar production.....28

The indicators of cavitation-erosion resistance of reactive plastic polymer materials, namely aminoplasts of the grades: KFA-1, KFA-2 and KMFA-3 in neutral, acidic and alkaline environments were analyzed. The obtained results are considered from the standpoint of the physicochemical fracture mechanics of polymers, taking into account the specifics of the cavitation load, the type of environment and possible mechanisms of their fracture.

**Keywords:** cavitation-erosive wear, aminoplasts, corrosive-active media.

- Shishkina Yu. O., Bagliuk G. A., Kyryliuk Ye. S., Kyryliuk S. F., Tolochyna O. V.,  
 and Talash V. M. Structure, phase composition, mechanical and corrosion  
 properties of aluminum-based composites.....34

The structure, phase composition, basic mechanical and corrosion properties of powder aluminum matrix composites obtained by the hot forging (HF) were studied. The results of studies of the microstructure of synthesized master alloy of different composition revealed the presence of particles of the strengthening phase of different dispersion and shape, which are rather evenly distributed in the metal matrix. The method of X-ray phase analysis established the presence of titanium and aluminum carbide, and also a number of lines belonging to titanium aluminides  $Al_3Ti$ ,  $Al_5Ti_3$ ,  $Al_2Ti$ ,  $AlTi_3$ ,  $Al_5Ti_2$ . Aluminium composite materials were strengthened by the Al-C-Ti master alloy of various composition. Studies of the samples obtained after HF showed that the microstructure of the composites is characterized by the presence of two

phases: the basis is the aluminum matrix, in which the agglomerates of master alloy are distributed. The composites reinforced with 15 mass% of the master alloy (20Al–64Ti–16C) in the initial charge and obtained by the method of sintering and HF have increased strength characteristics and demonstrate absolute stability in a 3.5% NaCl solution, regardless of the phase composition of the master alloy.

**Keywords:** *aluminum matrix composite materials, mechanical properties, corrosion properties, electrochemical corrosion, hot forging.*

- Balitskii A. I., Syrotyuk A. M., and Ivaskevych L. M.* The influence of gaseous hydrogen on the properties of heat-resistant nickel-cobalt alloy under static and cyclic loads.....40

The influence of hydrogen at pressures up to 65 MPa on the strength, plasticity, and low-cycle fatigue life of the XH60KMЮББТФ alloy samples at temperatures of 293...1073 K, short-term tensile rates of 0.1...100 mm/min, and cyclic bending frequencies and amplitudes of 50 Hz and 0.8 and 1.6% was studied. The properties of the samples decrease with increasing hydrogen pressure, decreasing speed and amplitude of loading in hydrogen. Under the maximum embrittlement at a hydrogen pressure of 65 MPa and a tensile rate of 0.1 mm/min, the ultimate strength and true fracture stress of smooth samples decrease in 1.5 times, and the ultimate strength of samples with a stress concentrator decreases in more than two times. In this case brittle intergranular fracture occurs and plastic deformation of the samples is almost completely absent. With increasing temperature the effect of hydrogen decreases, but remains noticeable at 1073 K.

**Keywords:** *heat-resistant nickel-cobalt alloy, hydrogen embrittlement, low-cycle durability, strength, plasticity.*

- Tsyurulnyk O. T., Student O. Z., Zvirko O. I., Demianchuk D. O., and Venhryniuk O. I.* Evaluation of hydrogen brittleness of operated pipe steel by *J*-integral method.....48

Fracture due to hydrogen embrittlement is a major concern for the reliability and safety of hydrogen transportation via gas pipelines. Pipe steels are characterized by high plasticity, therefore, methods of nonlinear fracture mechanics, including the *J*-integral method, are preferred for determining the fracture toughness. The influence of pre-charged hydrogen under a moderate fracture toughness mode of as-received API 5L X67 steel and after 34 years of operation on gas main pipeline was studied. A methodological feature of the experiments is the use of different rates of mechanical loading of specimens with cracks. The influence of the long-term operation of steel on its resistance to brittle fracture is revealed, depending on the test conditions.

**Keywords:** *pipe steel, fracture toughness, J-integral method, in-service degradation, hydrogen embrittlement.*

- Skalskyi V. R. and Stankevych O. M.* Acoustic-emission criterion for optimizing the quantity of fiber in the concrete matrix.....56

The influence of the volume fraction of high-strength fiber on the mechanical characteristics and acoustic emission (AE) of reinforced concrete beams during their three-point bending test was studied. A criterion for AE optimization of the volume fraction of high-strength fiber to ensure the maximum tensile strength of composites based on a concrete matrix is proposed, which is the minimum value of the strength coefficient – the ratio of the tensile strength of the composite to the stresses of the beginning of the generation of AE signals accompanying shear fracture mechanisms. Numerical values of this coefficient were established for fiber concrete with basalt and steel fibers.

**Keywords:** *acoustic emission, basalt and steel fiber, acoustic emission, wavelet transform, optimization of fiber volume fraction.*

- Ivanytskyi Ya. L., Blikharskyi Z. Ya., Maksymenko O. P., Panchenko O. V., and Blikharskyi Ya. Z.* Development of a methodology for monitoring the technical state of bridge structures and establishment of safe operation period.....64

A methodology for determining the technical state of reinforced concrete bridge structures has been developed. It is based on establishing the depth and location of the largest deflection using a laser projection system, as well as an approach to finding the stress-strain state along the height of the beam. For this, an energy approach is used, which involves the calculation of the energy of elastic-plastic deformation of concrete and reinforcement. The specific fracture energy as an invariant characteristic of concrete strength under tension, compression, and also tension of reinforcement have been established experimentally. A method of constructing true diagrams of deformation and fracture of concrete samples taken from the structure has been created. The results of experimental studies of the stress-strain state during bending of a reinforced concrete beam agree well with those calculated by the finite element method.

**Keywords:** *reinforced concrete beam, specific compressive and tensile fracture energy of concrete, optical-digital correlation of speckle images.*

- Krechkovska H. V., Voitovich A. A., Dzyubyk A. R., Kindratskyi B. I., Lampitskyi O. S., and Bohun L. I.* Differences in structure and properties of the metal of the beam of bridge construction.....72

Mechanical properties of the 15XCHД steel of the beam of the bridge structure were analyzed. It was established that the characteristics of strength and plasticity, as well as the resistance to brittle fracture of the steel of its wall correspond to the regulated values. The values of strength and plasticity of the steel shelf do not exceed the normalized limits, but the low values of its impact strength and brittle cleavages on the macrofractures of the samples indicate a tendency to brittle failure. It was found that the resistance to brittle fracture of the metal from the beam shelf decreased in three times on the longitudinal samples, and in two times on the transverse ones to compare to the inherent brittle fracture resistance of steel from the beam wall.

**Keywords:** *steel, beam, bridge structures, mechanical properties, impact toughness.*

- Hanulich B. K.* Stress state of a soft interlayer under conditions of plane and axisymmetric deformations.....78

The stress state of a soft interlayer under contact strengthening, when tensile stresses are greater than the yield strength, and less than the stresses causing a general yield, is considered. The analytical expressions under plain strain and axisymmetric tension are obtained. In the first case the stresses are determined using the Airy stress function as a corresponding polynomial, in the second case – based on the stress function of the fifth degree, built on the corresponding Legendre polynomial. The stresses satisfy the differential equations of equilibrium and boundary conditions.

**Keywords:** *soft interlayer, plane strain, axisymmetric strain, stress state.*

- Trembach B. O., Silchenko Yu. A., Sukov M. G., Ratska N. B., Duriagina Z. A., Krasnoshapka I. V., Kabatskyi O. V., and Rebrova O. M.* Development of a model of assimilation of alloying elements self-protecting powder wire and optimization of its charge composition.....83

Use of exothermic additions (EA) for the charge is one of the effective ways to increase the energy efficiency of the flux-cored arc surfacing process. A mathematical model of the dependence of the overall transition element factor ( $\eta(SS)$ ) on the ratio of exo-

thermic mixture oxidizing agent to graphite content (CuO/C) and the ratio of oxidizing agent to reducing agent of exothermic mixture (CuO/Al) was developed. It is recommended to use these dependences to assess the transition of alloying elements of the charge into the deposited metal and to predict the overall transition element factor  $\eta(SS)$ . The optimal content of flux-cored wire components was determined.

**Keywords:** *surfacing, FCAW-S, transition element factor, overall transition element factor, exothermic addition, simplex-centroid design, optimization.*

*Zemlianyi A. O., Bys S. S., Shcepatov V. V., Kharchenko S. D., and Hladkyi Ya. M.*

Energy aspects of tribosystems.....90

The energy of tribosystems is studied from the standpoint of structural-energy theory and the universal phenomenon of structural adaptability. The general regularities of tribotechnical interaction were found and the characteristics of mechanical and thermodynamic processes were determined. When considering the energy relations of tribotechnical parameters, based on generally accepted ideas about thermodynamic relations, it is advisable to consider the energy process under conditions of plastic deformation as a competition of two interrelated trends. Thus, the energy associated with damage and thermal strengthening initiates the fracture of the surface layer of tribosystems.

**Keywords:** *structure, energy of tribosystems, deformation, wear.*

*Pohrelyuk I. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R., Lavrys S. M., Kravchyshyn T. M., and Kovalchuk I. V.* Tribological characteristics of titanium

after combined treatment.....95

The combined treatment which includes thermodiffusion saturation with interstitial elements (oxygen and nitrogen) and electrospark alloying with a graphite electrode was studied. The effect of near-surface hardening and the sequence of combined treatment steps on the phase composition, structure, surface microhardness and tribological characteristics of coatings deposited on commercially pure titanium in tribopairs with steel was evaluated.

**Keywords:** *titanium, electrospark alloying, oxidation, nitriding, combined treatment, hardness, friction coefficient.*

*Ivasenko I. B., Berehulyak O. R., Mandziy T. S., Posuvailo V. M., and Vorobel R. A.*

Modeling of a laser-modified layer reinforced with silicon carbide particles on an aluminum alloy.....103

Methods of modeling silicon carbide particles of asymmetric shape as well as the methods of image analysis of the surface layer of an aluminum alloy reinforced with silicon carbide particles have been developed. 3D modeling of the distribution of silicon carbide particles of different sizes and filling percentages in the surface layer of the aluminum alloy was carried out. The distribution of silicon carbide areas in different cross-sectional planes and with different volumetric filling of the strengthened layer was established.

**Keywords:** *silicone carbide, 3D modeling, aluminum alloy, segmentation, image processing.*

*Golovko V. V., Kostin V. A., and Zhukov V. V.* The influence of nanomodification on the formation of microstructure of the welded joints metal

of low-alloy steel.....111

The inoculation of nano-sized particles of refractory  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$  oxides into the welding bath was studied. The inoculation of oxides with a low-level mismatch to the  $\delta$ -Fe lattice and increased wetting with liquid iron ( $MgO$ ,  $ZrO_2$ ) contri-

butes to the growth of dendrites, which are formed during melt crystallization. Metal modification with MgO, ZrO<sub>2</sub> oxides decreases the hardness of polygonal ferrite and increases the content of lower bainite in the microstructure of joints, brittle fracture resistance of the joint metal. Metal modification with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> oxides contributes to an increase in the hardness of polygonal ferrite, the content of upper bainite in the joints microstructure and strength of welded joints of low-alloy steels.

**Keywords:** *low-alloy steel, welding, microstructure, modification, inoculation, nanosized oxides.*

<i>Gorban' V. F., Krapivka M. O., and Myslyvchenko O. M.</i> Formation conditions and properties of high-entropy alloys creating the $\sigma$ -phase.....	118
---	-----

High-entropy alloys (HEA) based on the renewal of elements of the V–IX groups of the Periodic Table, which are capable of forming  $\sigma$ -phase with each other, are studied. The formation of the  $\sigma$ -phase in the range of electronic concentration of 6.7...8 el/at was monitored. The effect of electron concentration on the content of the  $\sigma$ -phase in HEA containing elements forming the  $\sigma$ -phase in a two-component system is shown. The conditions for the formation of a single-phase structure of the  $\sigma$ -phase during crystallization of multicomponent HEA are determined. The limits of the existence of a 100% high-entropy phase are established and the influence of lattice parameters on their properties is revealed. A decrease in the size of the parameter  $c$  and  $a$  of the  $\sigma$ -phase leads to an increase in both the hardness and modulus of elasticity of alloys with a single-phase structure of the high-entropy  $\sigma$ -phase.

**Keywords:** *high-entropy alloys,  $\sigma$ -phase, mixing enthalpy, hardness, elastic modulus.*

<i>Bazyliak L. I., Sheparovych R. B., Liutyi P. Ya., Shepida M. V., Kuntiyi O. I., and Kytsia A. R.</i> Synthesis and catalytic properties of Ag(Pd) bimetallic nanoparticles.....	124
--	-----

Ag(Pd) bimetallic nanostructures (Ag(Pd)NPs) were synthesized by the method of galvanic replacement of palladium ions with silver nanoparticles. On the basis of a comparative analysis of the results of scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray microanalysis and X-ray powder diffraction, it was established that the obtained Ag(Pd)NPs can be considered as “core-shell” nanosystems, in which the core is silver, and the shells are palladium nanoparticles with a size of 5...15 nm. Ag(Pd)NPs were studied as catalysts for the aerobic liquid-phase oxidation of benzyl alcohol. It was shown that the addition of Ag(Pd)NPs to the reaction system accelerates the reaction in 14 times.

**Keywords:** *bimetallic nanoparticles, silver, palladium, aerobic oxidation, benzyl alcohol.*

OUR LOSSES	
<b>Vasyl Ivanovych Pokhmurskii</b> .....	131
<b>List of papers published in “Physicochemical Mechanics of Materials” in 2023</b> .....	133
<b>Authors' index</b> .....	139