

## 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, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТРЕНКО, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, А. М. СИРОТЮК, О. З. СТУДЕНТ, Г. Т. СУЛИМ, 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. ЯРТІСЬ (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. DURAGINA, 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, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, A. M. SYROTYUK, O. Z. STUDENT, H. T. SULYM, M. S. KHOMA, O. E. CHYHYRYNETS, V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRULNYK

## 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)

## Ідентифікатор друкованого медіа в Реєстрі – R30-03732

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

## Передплатний індекс 22574

**Адреса редакції:** 79060, Львів, 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.pcm@gmail.com

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

**Editorial office address:** Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St.,  
Lviv 79060, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74,  
(38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27.  
E-mail: journal.pcm@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

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,  
“ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ”, 2024

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 60, № 4, 2024**

липень – серпень

УДК 62:[544+539](051)

## ЗМІСТ

- Станкевич О. М., Ребот Д. П.* Методи штучного інтелекту  
для акустико-емісійного діагностування стадій руйнування (Огляд).  
Ч. 2: Штучні нейронні мережі та глибоке навчання.....5

На основі аналізу найновіших досліджень розглянуто можливості використання штучних нейронних мереж та методів глибокого навчання для автоматизації опрацювання сигналів акустичної емісії (АЕ), щоб ідентифікувати стадії руйнування. Порівняно точність результатів для різних підходів та виокремлено їх переваги та недоліки. Перспективним є впровадження у практику АЕ діагностування методів глибокого навчання.

**Ключові слова:** акустична емісія, штучна нейронна мережа, глибоке навчання, згорткова нейронна мережа, рекурентна нейронна мережа, ідентифікація дефектів.

- Андрейків О. С., Долінська І. Я., Любчак М. О.* Комплексне застосування методу акустичної емісії та енергетичного підходу для визначення залишкового ресурсу елемента конструкції за дії тривалого статичного навантаження, корозії і деградації матеріалу.....16

Побудовано комплексний метод застосування акустичної емісії (АЕ) та енергетичного підходу для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії тривалого статичного навантаження, корозивного середовища і експлуатаційної деградації матеріалів. В основу покладено перший закон термодинаміки для балансу енергетичних складників і роботи зовнішніх сил, а також баланс швидкостей їх зміни для елементарного стрибка просування тріщини. Прийнято гіпотезу лінійної залежності розміру площі активної тріщини від кількості виділених при цьому імпульсів АЕ. Зміну в часі параметрів експлуатаційної деградації матеріалу математично змодельовано лінійними залежностями. Задачу про визначення залишкового ресурсу тонкостінного елемента конструкції розв'язано за допомогою енергетичного підходу і зведено до диференціального рівняння з початковою і кінцевою умовами. В отриманій математичній задачі невідомі два параметри – розмір початкової плоскої тріщини і навантаженість матеріалу біля неї, які визначено так. Приладом АЕ впродовж заданого часу (150 h) зафіксовано кількість імпульсів АЕ і швидкість їх рахунку, які підставлено у формули для визначення площі початкової тріщини і параметра

завантаженості матеріалу в її околі. Для демонстрації застосування цього методу виконано числовий експеримент і розраховано залишковий ресурс пластини зі сталі Х70.

**Ключові слова:** *корозійно-механічна тріщина, акустична емісія, експлуатаційна деградація матеріалу, залишковий ресурс, енергетичний підхід.*

*Кравець В. С., Саврук М. П., Онишко Л. Й., Кваснюк О. І.* Вплив форми та розташування ортотропного включення на напружений стан анізотропного тіла за поздовжнього зсуву.....22

Досліджено напружений стан нескінченного анізотропного тіла (матриці) з гладким криволінійним ортотропним включенням за поздовжнього зсуву. Двовимірну задачу теорії пружності для кусково-однорідного анізотропного тіла зведено до системи двох дійсних сингулярних інтегральних рівнянь другого роду, числові розв'язки отримано методом квадратур. Показано вплив форми та розташування ортотропного включення на напружений стан кусково-однорідного тіла для низки значень пружних сталих ортотропних матеріалів матриці та включення. Проаналізовано знайдені розподіли напружень поздовжнього зсуву на межі розділу матеріалів для різних геометричних та механічних параметрів задачі.

**Ключові слова:** *антиплоска деформація, анізотропія, ортотропне включення, концентрація напружень, сингулярні інтегральні рівняння.*

*Адєєва Л. І., Тунік А. Ю., Коржик В. М., Строгонов Д. В., Костін В. А., Конорева О. В.* Особливості мікроструктури та властивості порошків алюмінідів заліза, отриманих методом плазово-дугової сфероїдизації.....31

Досліджено порошки алюмінідів заліза, отриманих методом плазово-дугового розпилення порошкового струмопровідного дроту зі сталеву оболонкою і алюмінієвим наповнювачем. Випробовувано у середовищі аргону на установці "PLAZAR-50-PL-W". Встановлено, що на всіх режимах роботи плазмотрона розпилені частки переважно сферичної форми. Кількість несферичних становить 7...12% у порошках фракції  $-315+200 \mu\text{m}$ , а в дрібніших – 4...5%. Основними фазами одержаних матеріалів є алюмініди заліза  $\text{Fe}_3\text{Al}$  і  $\text{FeAl}$  за різних співвідношень. У всіх фракціях порошків кількість металевого складника більша, ніж оксидного. Вміст оксидів зростає зі зменшенням фракції порошку і зниженням сили струму плазмотрона. Під час розпилення за сили струму 220 і 270 А у фракції порошку  $-200+100 \mu\text{m}$  зафіксовано більше алюмінідів і найменше оксидів. У дрібніших фракціях вміст алюмінідів становить 70,38...75,68, а оксидів зростає до 29,62 wt%. Мікротвердість металевих часток дорівнює 3,07...4,59 GPa. Оксидні складаються, в основному, з  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і володіють вищою мікротвердістю (5,32...8,15 GPa) за всіх режимів розпилення. Одержані порошки можна рекомендувати для 3D виробництва за прямого енергетичного наплавлення, до якого відносять лазерні (DMD – Direct Metal Deposition), а також для виготовлення точних заготовок з мінімальним припуском на механічну обробку за допомогою методів компактування у гранульній металургії – гарячого ізостатичного пресування (HIP – Hot Isostatic Pressing).

**Ключові слова:** *плазово-дугове розпилення, дрові матеріали, інтерметалідні фази, мікроструктура, мікротвердість.*

<i>Кирилюк С. С., Баглюк Г. А., Кирилюк С. Ф., Бондар А. А., Варченко В. Т., Іванченко С. Е.</i> Вплив вмісту ферохрому у вихідній шихті на структуру, механічні та трибологічні властивості спеченої карбідосталі на основі системи Fe–Cr–C.....	42
---	----

Розглянуто особливості структури, фазового складу, основних фізико-механічних та трибологічних властивостей спечених карбідосталей на основі системи Fe–Cr–C, отриманих із порошкових сумішей залізо–високовуглецевий ферохром з різним вмістом ферохрому (25 та 40%) у вихідній шихті. Збільшення вмісту ферохрому призвело до росту усадки зразків під час спікання та зменшення поруватості спеченого композита з 7,4 до 2,2%, а також до підвищення границі міцності на згин з 1100 до 1665 МПа та твердості з 66 до 76 HRA, відповідно. За результатами рентгенофазового аналізу зі застосуванням методу Рітвельда у фазовому складі обох спечених композитів виявлено три фази:  $\alpha$ -Fe, аустенітну  $\gamma$ -Fe та карбідну (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Показано, що підвищення вмісту високовуглецевого ферохрому в шихті з 25 до 40% призводить до помітного зменшення розміру зерен матричної фази композита. За результатами трибологічних випробувань отриманих матеріалів встановлено, що за тертя без мастильного матеріалу по сталі ШХ15 коефіцієнт тертя пари є в межах 0,4...0,5 та незначно відрізняється для матеріалів різного складу. Водночас композит, отриманий із шихти з підвищеним (40%) вмістом ферохрому, забезпечує суттєво вищу зносостійкість (від 2,2 до 2,9 раза) порівняно зі сплавом, отриманим з шихти з 25% ФХ800, за всіх контактних тисків.

**Ключові слова:** карбідосталь, композит, спікання, ферохром, густина, міцність, твердість, зносостійкість, мікроструктура, коефіцієнт тертя.

<i>Трембач І. О., Трембач Б. О., Гринь О. Г., Лужецький Р. Я., Бречко В. О., Заковоротний О. Ю., Баленко О. І., Молчанов Г. І., Реброва О. М., Кабацький О. В.</i> Застосування повного факторного експерименту для оптимізації коефіцієнта заповнення та густини шихти самозахисного порошкового дроту.....	52
--	----

Обґрунтовано необхідність дослідження таких характеристик самозахисного порошкового дроту, як коефіцієнт заповнення ( $C_{WF}$ ) та густина шихти ( $\rho_{cf}$ ). За допомогою повного факторного експерименту вивчено вплив вмісту графіту, екзотермічного додатка і співвідношення його компонентів на ці характеристики і побудовано математичні моделі. Визначено, що найбільшу дію на  $C_{WF}$  має вміст екзотермічного додатка ( $C_{EA}$ ) та графіту ( $C_{\text{graphite}}$ ) у шихті. Максимальні значення  $C_{WF}$  та  $\rho_{cf}$  досягаються при  $C_{EA} = 20...28 \text{ wt\%}$ ,  $\text{MnO}_2/\text{Al} = 2...2,8$  та  $C_{\text{graphite}} = 4...6 \text{ wt\%}$ .

**Ключові слова:** самозахисний порошковий дріт, факторний експеримент, коефіцієнт заповнення, густина шихти, екзотермічний додаток.

<i>Ткачук О. В., Гвоздецький В. М., Студент М. М., Задорожна Х. Р., Ковальчук І. В., Погрелюк І. М.</i> Структурні особливості та зносотривкість покриття TiAlN на сплаві Ti–6Al–4V, сформованого поєднанням методів електродугового напилювання та азотування з газової фази.....	60
--	----

Досліджено формування покриття TiAlN на сплаві Ti–6Al–4V шляхом поєднання методів електродугового напилення та газового азотування. Встановлено, що фаза TiAlN утворюється у покритті під час газового азотування сплаву зі заздалегідь напиленим шаром алюмінію та титану. З підвищенням температури азотування від 650 до 850°C її вміст зменшується. Виявлено, що покриття TiAlN суттєво збільшує поверхневу твердість сплаву (до 12...15 GPa), а у трибопарі з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> забезпечує значно вищу зносотривкість порівняно з покриттям TiN, а також необробленим сплавом.

**Ключові слова:** *електродугове напилення, газове азотування, зносотривкість.*

Губенко С. І. Вплив боридних включень на структуру і властивості сталі 04X14T3P1Ф для чохлів відпрацьованих паливних касет атомних електростанцій..... 68

Досліджено особливості хімічного та фазового складу, структури та перетворень у боридних включеннях у сталі 04X14T3P1Ф, з якої виготовляють чохла шестигранних труб для транспортування та зберігання відпрацьованого ядерного палива. Встановлено, що під час гарячої деформації відбуваються фазові та структурні трансформації: змінюється склад боридів внаслідок перерозподілу елементів, динамічно дифузійно подрібнюються та виділяються “сателітні” частинки, бориди руйнуються та відбуваються фазові перетворення. Виявлено можливість статичного дифузійного подрібнення боридів за високих температур нагріву. Обговорено вплив боридних включень на структуру та механічні властивості сталі за різних температур деформації.

**Ключові слова:** *сталь, боридні включення, деформація, механічні властивості, руйнування, дифузійне подрібнення, сателітні частинки.*

Петрушинець Л. В., Федорчук В. Є., Михайлов Л. В., Фальченко Ю. В., Новомлинець О. О., Воронін С. О. Дослідження мікроструктури з’єднань алюмінію з магнієм за дифузійного зварювання..... 76

Досліджено вплив температури та хімічного складу проміжних прошарків на формування структури зварних з’єднань зі сплавів алюмінію АМг2 та магнію МА2-1. Встановлено, що під час термодформаційного циклу зварювання при  $T = 400^{\circ}\text{C}$  між сплавами магнію і алюмінію формується дифузійна зона завтовшки  $\sim 80 \mu\text{m}$  з мікротвердістю в центральній частині 2160 МПа, де і відбувається розтріскування зварного з’єднання. Для зменшення інтенсивності дифузійних процесів у стику і запобігання утворенню між сплавами крихких інтерметалідних фаз як бар’єрних прошарків використано фольгу з нікелю або титану завтовшки  $30 \mu\text{m}$ . У з’єднаннях магнію з алюмінієм, отриманих з використанням прошарку з титану, інтерметалідні шари не утворюються. Механічними випробуваннями зразків на згин та розтяг встановлено, що максимальною міцністю володіють з’єднання магнію з алюмінієм ( $\sigma_B = 138...142 \text{ МПа}$ ), отримані за використання прошарків з титану.

**Ключові слова:** *дифузійне зварювання, алюмінієвий сплав, магнієвий сплав, проміжний прошарок, мікроструктура, механічні властивості.*

Лабур Т. М. Вплив швидкості зварювання стиснутою дугою на руйнування з’єднань з алюмінієвого сплаву 1201..... 82

Досліджено механічні властивості та особливості мікрорельєфу зламів зварних з’єднань з алюмінієвого сплаву 1201, отриманих за різних швидкостей зварювання (24...120 м/х) стиснутою дугою. Встановлено, що найвища пластичність з’єднань за швидкості зварювання 24 м/х, коли на поверхні зламів формується енергоємний ямковий мікрорельєф і деформаційні гребені. Міцність з’єднань при цьому знижується незначно.

**Ключові слова:** *алюмінієвий сплав, зварювання стиснутою дугою неплавким електродом, швидкість зварювання, міцність, пластичність, мікромеханізм руйнування.*

<i>Книш В. О., Шмичкова О. Б., Лук'яненко Т. В., Лукас С. Я., Демченко П. Ю., Гладишевський Р. С., Величенко О. Б. Оптимізація платино-паладіє-<math>TiO_2</math>- композитами функціональних властивостей анодно синтезованого діоксида титану .....</i>	86
---	----

Проаналізовано морфологію та хімічний склад композитів  $TiO_2$  з різним вмістом шляхетних металів, синтезованих у фторовмісному електроліті на основі етиленгліколю. Встановлено вплив умов синтезу покриття на структуру та стехіометрію отриманого оксидного покриття. Зокрема, на одержаних з допомогою сканувальної електронної мікроскопії зображеннях зберігається порувата структура покриттів після нанесення шарів металів. Мікроаналіз підтвердив наявність платини та паладію як у металічній формі, так і у вигляді оксиду. Рентгенівською дифракцією виявлено фази анатазу  $TiO_2$ , металічного титану, платини, паладію та оксиду паладію. Встановлено, що термічна обробка при  $500^\circ C$  сприяє збільшенню частки кристалічної фази. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія підтвердила наявність  $Ti\ 2p$ ,  $O\ 1s$ ,  $Pt\ 4f$  та  $Pd\ 3d$  на поверхні. Результати досліджень електрохімічних властивостей методом Мотта–Шоттки свідчать, що покриття мають  $n$ -тип провідності з високою концентрацією носіїв заряду. Покриття з платини стабільне після 9 h роботи, тоді як послідовно нанесені шари платини та паладію сприяють збільшенню терміну служби електрода майже у 24 рази.

**Ключові слова:** діоксид титану, шляхетні метали, порувата структура, термічна обробка, корозійна тривкість.

<i>Кононюк О. П., Березовець В. В., Завалій І. Ю., Борух І. В., Чекайло М. В. Генерування водню гідролізом гідридних композитів магнію з додатками <math>ZrNi_{0,5}Al_{1,5}</math> та графіту.....</i>	95
--	----

Реактивним кульовим помелом у водні синтезовано гідриди композитів магнію з додатками інтерметаліду  $ZrNi_{0,5}Al_{1,5}$  та графіту. Показано, що додавання  $ZrNi_{0,5}Al_{1,5}$  та графіту скорочує тривалість гідрування магнію під час помелу у водні. Досліджено вплив графіту на розмір частинок композитів. Встановлено дію цих додатків та концентрації  $MgCl_2$  на гідроліз гідриду магнію.

**Ключові слова:** композити  $MgH_2$ , графіт, гідрид магнію, водень, гідроліз.

<i>Хома М. С., Чучман М. Р., Івашків В. Р., Василів Х. Б., Рацька Н. Б. Проникність водню крізь сталеві мембрани під час корозії у хлоридно-ацетатному розчині за впливу сірководню, вуглекислого газу та механічної напруги.....</i>	102
---	-----

Досліджено проникність водню крізь мембрану зі сталі 20 під час корозії у хлоридно-ацетатному розчині за впливу розчинених  $CO_2$  і  $H_2S$  та механічної напруги. Встановлено, що у розчині, насиченому вуглекислим газом, проникність та ефективний коефіцієнт дифузії водню найменші. З додаванням у розчин від  $100\ mg/dm^3$  сірководню до концентрації насичення проникність водню зростає у 1,5–3,2 рази, що пов'язано з інтенсифікацією корозійних процесів на вхідній поверхні. При цьому ефективний коефіцієнт дифузії водню стабільний. За прикладеної механічної напруги підповерхнева концентрація атомів водню та його проникність збільшуються внаслідок зростання міжатомних відстаней у кристалічній ґратці. Проникність водню крізь сталь залежить насамперед від концентрації сірководню, яка визначає швидкості корозії і наводнення сталі.

**Ключові слова:** проникність водню, сталь, мембрана, сірководень, вуглекислий газ, механічна напруга.

<i>Герцик О. М., Єзерська О. А., Носенко В. К., Гавриляк Н. М., Пандяк Н. Л.</i> Електрохімічні параметри кобальтових аморфних сплавів у агресивних середовищах різної природи.....	108
---	-----

Різними електрохімічними методами досліджено корозійну тривкість контактної та зовнішньої поверхонь стрічок аморфних металевих сплавів на основі кобальту  $Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$ ,  $Co_{73,2}Fe_{4,3}Mn_{0,5}Si_{5,3}B_{16,7}$ ,  $Co_{73,3}(Fe, Ni, Mo, Mn)_{5,7}(Si_{0,2}B_{0,8})_{21}$  у водних розчинах HCl, NaCl та NaOH. Встановлено найнижчу корозійну тривкість сплаву  $Co_{72,0}Fe_{5,0}Si_{11,0}B_{12,0}$  у всіх досліджуваних агресивних середовищах. Часткова заміна Co та Fe на Mn, а також Ni, Mo децю її підвищує внаслідок формування щільних оксидних шарів на поверхні.

**Ключові слова:** кобальтові аморфні сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.

<i>Кирилів В. І., Максимів О. В., Звірко О. І., Ціж Б. Р., Кирилів Я. Б.</i> Корозійно-втомна витривалість сталі 45 після поверхневого наноструктурування механоімпульсною обробкою в різних середовищах.....	115
---	-----

Досліджено вплив технологічного середовища (ТС) під час формування нанокристалічної структури (НКС) на нормалізованій вуглецевій сталі 45 механоімпульсною обробкою (МІО) на параметри НКС та опір втомному та корозійно-втомному руйнуванню у 3%-му розчині NaCl. На зразках отримано поверхневий шар з феритно-аустенітною НКС та розміром зерна фериту 14 і 23 nm після МІО в мінеральній оливі та повітрі, відповідно. Встановлено, що втомна витривалість сталі з НКС суттєво вища, ніж без поверхнево обробленого шару, та практично не залежить від типу ТС під час МІО. Найвищим опором корозійній втомі володіє сталь з поверхневою НКС, сформованою МІО в оливі. Отримані результати проаналізовано з урахуванням характеристик НКС, мікротвердості зміцненого шару, розподілу в ньому залишкових напружень та хімічних елементів (H, N, C та O).

**Ключові слова:** нанокристалічна структура, середньовуглецева сталь, втома, корозійна втома, залишкові напруження.

<i>Кречковська Г. В., Федорович Я. Т., Коней Б. В., Михайлюк В. В.</i> Вплив позацентрового розтягу на корозійно-втомну витривалість насосних штанг.....	121
--	-----

Насосні штанги експлуатують у складних умовах, спричинених дією високих знако-змінних навантажень та корозивно-активних технологічних середовищ у свердловинах. Найжорсткіші умови навантаження насосних штанг пов'язують з позацентровим розтягом. Для прогнозування роботоздатності експлуатованих насосних штанг запропоновано імітаційно-розрахункове моделювання напружень, які виникатимуть у них за реальних експлуатаційних умов. Експериментально показано, що за позацентрового розтягу штанг їх втомна витривалість знижується, а втомні характеристики штанг зі сталей 20Н2М та 15Н3МА після 5 років експлуатації стають практично однакові.

**Ключові слова:** насосна штанга, напруження, напружено-деформований стан, втома, позацентровий розтяг.

<i>Тимусь М. Б., Зінь І. М., Корній С. А.</i> Інгібування корозії алюмінієвого сплаву в хлоридовмісному середовищі композицією на основі декстрину та натрію ізоаскорбату.....	129
--	-----

Методами електрохімічної імпедансної спектроскопії, електронної сканівної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу досліджено інгі-



бування корозії алюмінієвого сплаву в нейтральному хлоридовмісному середовищі композицією, яка містила рівні масові кількості декстрину та натрію ізоаскорбату. Встановлено зростання приблизно у 20 разів опору переносу заряду алюмінієвого сплаву внаслідок захисної дії інгібіторної композиції за її оптимальної концентрації. На поверхні металу в інгібованому розчині виявлено щільну адсорбційну органічну плівку. Ступінь захисту металу від корозії декстрин-ізоаскорбатною композицією перевищує 90%. Практичний ефект дослідження полягає в можливості отримання екологічно безпечної інгібіторної композиції на основі відновної рослинної сировини для захисту від корозії конструкцій з алюмінієвих сплавів.

**Ключові слова:** *декстрин, натрій ізоаскорбат, інгібування корозії, алюмінієвий сплав, електрохімічна імпедансна спектроскопія, енергодисперсійний рентгенівський аналіз, ступінь захисту.*

*Стечишин М. С., Стечишина Н. М., Машовець Н. С., Здоренко Д. В.,  
Цепенюк М. І., Юськів В. М. Корозійно-механічне зношування  
карбоазотованих сталей у лужному середовищі..... 137*

Досліджено вплив безводневого азотування та карбоазотування в тліючому розряді з автономними характеристиками процесу на структуру і фазовий склад, електрохімічні та трибологічні властивості конструкційних сталей. Встановлено, що додавання пропану до аргоно-азотної газової суміші підвищує їх корозійно-механічну зносостійкість у 4–18 разів.

**Ключові слова:** *азотування, конструкційні сталі, зносостійкість, коефіцієнт тертя.*

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 60, № 4, 2024**

July – August

---

---

UDC 62:[544+539](051)

## CONTENTS

- Stankevych O. M. and Rebot D. P.* Methods of artificial intelligence for acoustic emission diagnostics of fracture stages (A review).  
P. 2: Artificial neural network and deep learning.....5

Based on the analysis of the latest studies, the possibilities of using artificial neural networks and deep learning algorithms for automating the processing of acoustic emission (AE) signals to identify fracture stages are considered. The accuracy of the results for different approaches is compared and their advantages and disadvantages are highlighted. Deep learning methods have broad prospects for implementation in practice of AE diagnostics.

**Keywords:** *acoustic emission, artificial neural network, deep learning, convolution neural network, recurrent neural network, identification of defects.*

- Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., and Liubchak M. O.* Complex application of the method of acoustic emission and energy approach to determine the residual life of a structure under effect of long-term static load, corrosion and material degradation.....16

A comprehensive method of applying acoustic emission (AE) and the previously developed energy approach to determine the residual lifetime of thin-walled structural elements under conditions of long-term static load, corrosive environment effect and operational degradation of materials is developed. The method is based on the first law of thermodynamics of the balance of energy components and the work of external forces, as well as their rates of change for an elementary jump of crack propagation. The hypothesis of a linear relationship between the size of the area of the active crack and the number of acoustic emission pulses released at the same time is assumed. The change in the characteristics of the oil and gas pipeline material during its operational degradation is mathematically modeled by a linear dependence on time. The above-formulated problem of determining the residual lifetime of a thin-walled structural element was solved using the energy approach and reduced to a differential equation with initial and final conditions. In the mathematical problem obtained in this way, two parameters are unknown: the size of the initial plane crack and the loading parameter of the material near it. These parameters were determined as follows. With the help of the AE device, during the given time (150 hours), the number of AE pulses and the rate of their counting were recorded. These values were introduced into the established formulas for determining, the area of the initial crack and the parameter of

loading of the material in its vicinity. To demonstrate the application of this complex method, a numerical experiment was performed and the residual life of a X70 steel plate was determined.

**Keywords:** *corrosion-mechanical crack, acoustic emission, operational degradation of material, residual lifetime, energy approach.*

*Kravets V. S., Savruk M. P., Onyshko L. Yo., and Kvasniuk O. I.* The influence of the shape and location of orthotropic inclusion on the stress state of an anisotropic body under longitudinal shear.....22

The stress state of an infinite anisotropic body (matrix) with a smooth curvilinear orthotropic inclusion under longitudinal shear was studied. The two-dimensional problem of the theory of elasticity for a piecewise homogeneous anisotropic body is reduced to a system of two real singular integral equations of the second kind, the numerical solutions of which are obtained by the quadrature method. The influence of the shape and location of the orthotropic inclusion on the stress state of a piecewise homogeneous body for a some series of values of elastic constant orthotropic materials of the matrix and inclusion is defined. The found distributions of longitudinal shear stresses at the interface of materials for various geometric and mechanical parameters of the problem were analyzed.

**Keywords:** *antiplane deformation, anisotropy, orthotropic inclusions, stress concentration, singular integral equations.*

*Adeeva L. I., Tunik A. Yu., Korzhyk V. M., Strohonov D. V., Kostin V. A., and Konoreva O. V.* Peculiarities of the microstructure and properties of iron aluminide powders obtained by the method of plasma-arc spheroidization.....31

Iron aluminide powders obtained by the method of plasma-arc spraying of a flux-cored conductive wire with a steel shell and an aluminium filler were investigated. The experiments were carried out in an argon environment on the "PLAZAR-50-PL-W" installation. It was established that at all operation modes of the plasma torch, the sputtered particles are mostly spherical in shape. The number of particles of non-spherical shape is 7...12% in powders of the  $-315+200$   $\mu\text{m}$  fraction and in smaller fractions it is equal to 4...5%. The main phases of the obtained materials are  $\text{Fe}_3\text{Al}$  and  $\text{FeAl}$  iron aluminides in various ratios. In all powder fractions the amount of the metal component is greater than of the oxide component. The number of oxides increases with a decrease in the powder fraction and a decrease in the plasma torch current. Under spraying at a current of 220 and 270 A in the powder fraction  $-200 + 100$   $\mu\text{m}$ , a larger amount of aluminides 83.88 and 86.30 and the lowest content of oxides up to 10...18% was recorded. In smaller powder fractions the content of aluminides is 70.38...75.68, and the amount of the oxide component increases to 29.62 wt%. The microhardness of metal particles is 3.07...4.59 GPa. Oxide particles consist mainly of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  iron oxides and have a higher microhardness of 5.32...8.15 GPa under all spraying modes. The obtained powders can be recommended in 3D production for the direct energy deposition method, which includes laser deposition processes (DMD – Direct Metal Deposition). These materials can be used in the production of precise workpieces with a minimum allowance for mechanical processing using compaction methods in granular metallurgy – hot isostatic pressing (HIP).

**Keywords:** *plasma-arc spraying, wire materials, intermetallic phases, microstructure, microhardness.*

<i>Kyryliuk Ye. S., Bagliuk G. A., Kyryliuk S. F., Bondar A. A., Varchenko V. T., and Ivanchenko S. E. The effect of ferrochrome content in the initial charge on the structure, mechanical and tribotechnical properties of Fe–Cr–C sintered carbide steel.....</i>	42
--	----

Peculiarities of the structure, phase composition, basic physico-mechanical and tribological properties of sintered high chromium Fe–Cr–C alloys, produced from powder mixtures of iron–high-carbon ferrochrome with different ferrochrome content (25 and 40%) in the initial charge are presented. The increase in the ferrochrome content in the charge led to increase in the shrinkage of the samples during sintering and, accordingly, a decrease in the porosity of the sintered composite from 7.4 to 2.2% as well as an increase in the bending ultimate strength from 1100 to 1665 MPa and hardness from 66 to 76 HRA, respectively. According to the results of X-ray phase analysis using the Rietveld method, three phases were found in the phase composition of both sintered composites:  $\alpha$ -Fe, austenitic  $\gamma$ -Fe phase and carbide phase  $(Cr, Fe)_7C_3$ . It is shown that increase in the content of high-carbon ferrochrome in the charge from 25 to 40% leads to a noticeable decrease in the size of the matrix phase grains of the composite. The results of tribological tests of the produced materials, show that during dry friction on IIIX15 steel, the friction coefficient is within 0.4...0.5 and differs slightly for materials of different composition. At the same time, the composite produced from the charge with an increased (40%) content of ferrochrome provides significantly higher wear resistance (from 2.2 to 2.9 times) compared to the alloy obtained from the charge with 25%  $\Phi$ X800 for all contact pressures.

**Keywords:** *high chromium Fe–Cr–C alloy, composite, sintering, ferrochrome, density, strength, hardness, wear resistance, microstructure, friction coefficient.*

<i>Trembach I. O., Trembach B. O., Grin A. G., Luzhetskyy R. Ya., Brechko V. A., Zakovorotniy A. Yu., Balenko O. I., Molchanov H. I., Rebrova O. M., and Kabatskiy O. V. Application of a complete factorial experiment to optimize the filling factor and charge density of the self-shielding flux-cored wire .....</i>	52
---	----

The necessity to study such characteristics of self-shielding flux-cored wire as the filling rate ( $C_{WF}$ ) and core filler density ( $\rho_{cf}$ ) is grounded. The influence of the exothermic addition content, exothermic addition components ratio, graphite content on the filling rate ( $C_{WF}$ ) and filler density ( $\rho_{cf}$ ) was studied using Fractional Factorial Design, the mathematical models are built. It is shown that the content of exothermic addition ( $C_{EA}$ ) and graphite ( $C_{graphite}$ ) in the charge has the greatest influence on the filling rate ( $C_{WF}$ ). Maximum values  $C_{WF}$  and density  $\rho_{cf}$  are obtained with the following characteristics:  $C_{EA} = 20...28$  wt%,  $MnO_2/Al = 2...2.8$  and  $C_{graphite} = 4...6$  wt%.

**Keywords:** *self-shielded flux-cored wire, factorial design, filling rate, core filler density, exothermic addition.*

<i>Tkachuk O. V., Hvozdetzkyi V. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R., Kovalchuk I. V., and Pohrelyuk I. M. Structural features and wear resistance of the TiAlN coating formed on the Ti–6Al–4V alloy by combining electric arc spraying and gas nitriding methods.....</i>	60
--	----

The formation of the TiAlN coating on Ti–6Al–4V alloy by combination of the arc spraying and gas nitriding methods was investigated. It was established that the TiAlN phase is formed in the coating during gas nitriding of the titanium alloy with a pre-sprayed layer of aluminum and titanium. By increasing nitriding temperature from 650 to 850°C, the content of the TiAlN phase decreased. The TiAlN coating significantly increases the surface hardness of the alloy (up to 12...15 GPa), and in a tribo-pair with  $Al_2O_3$  provides significantly higher wear resistance compared to the TiN coating and untreated alloy.

**Keywords:** arc spraying, gas nitriding, wear resistance.

- Gubenko S. I. The influence of boride inclusions on the structure and properties of 04X14T3P1Φ steel intended for covers of spent fuel cassettes of nuclear power plants..... 68

The features of the chemical and phase composition, structure and transformations in boride inclusions in 04X14T3P1Φ steel used for the manufacture of hexagonal pipe covers for transportation and storage of spent nuclear fuel are studied. It is shown that in the process of hot deformation the phase and structural transformations occur: a change in the composition of borides due to the redistribution of elements, dynamic diffusion fragmentation and release of “satellite” particles, fracture of borides, boride phase transformation. The possibility of static diffusion sputtering of borides at high heating temperatures is demonstrated. The influence of boride inclusions on the structure and mechanical properties of the steel at various deformation temperatures is discussed.

**Keywords:** steel, boride inclusions, deformation, mechanical properties, fracture, diffusion sputtering, satellite particles.

- Petrushynets L. V., Fedorchuk V. Ye., Mikhailov L. V., Falchenko Iu. V., Novomlynets O. O., and Voronin S. O. Investigation of the microstructure of aluminum and magnesium joints during diffusion welding..... 76

The influence of temperature and chemical composition of intermediate layers on the formation of welded joints structure made of AMg2 aluminum and MA2-1 magnesium alloys is investigated. It is found that during thermo-deformation welding cycle at  $T = 400^{\circ}\text{C}$ , a diffusion zone with a thickness of  $\sim 80 \mu\text{m}$  is formed between magnesium and aluminum alloys, with a microhardness in the central part of 2160 MPa, where the cracking occurs. To reduce the intensity of diffusion processes at the interface and prevent the formation of brittle intermetallic phases between the alloys, nickel or titanium foil with a thickness of  $30 \mu\text{m}$  was used as a barrier layer. In the magnesium-aluminum joints obtained using a titanium foil layer, intermetallic layers do not form. Mechanical bending and tensile tests showed that the strongest magnesium-aluminum joints ( $\sigma_B = 138...142 \text{ MPa}$ ) were obtained when using titanium layers.

**Keywords:** diffusion welding, aluminum alloy, magnesium alloy, intermediate layer, microstructure, mechanical properties.

- Labur T. M. The influence of constricted arc welding speed on the fracture of 1201 aluminium alloy joints..... 82

Mechanical properties and features of fracture microrelief in welded joints of 1201 aluminium alloy, produced by constricted arc welding at different speeds (24...120 m/h) were studied. When welding at the speed of 24 m/h, the joint ductility is the highest, and energy-intensive pit microrelief and deformation ridges are formed on the fracture surface. The strength of joints in this case slightly decreases, but their ductility increases.

**Keywords:** aluminium alloy, arc welding with a non-fusible electrode, welding speed, strength, plasticity, fracture micromechanism.

- Knysch V. O., Shmychkova O. B., Luk'yanenko T. V., Pukas S. Ya., Demchenko P. Yu., Gladyshevskii R. Ye., and Velichenko A. B. Optimization of platinum-palladium-TiO<sub>2</sub> by composites of functional properties of anodic synthesized titanium dioxide..... 86

A detailed analysis of the morphology and chemical composition of TiO<sub>2</sub> composites with varying noble metal content, synthesized in a fluoride-containing ethylene glycol-based electrolyte, is presented. The study demonstrates how the synthesis conditions

of the coating affect the structure and stoichiometry of the resulting oxide coating. SEM images show that the porous structure of the coatings is preserved after the deposition of metal layers. EDS analysis confirmed the presence of platinum in metallic form and palladium in both metallic and oxide forms. X-ray diffraction revealed the presence of anatase  $\text{TiO}_2$ , metallic titanium, platinum, palladium, and palladium oxide phases. Thermal treatment at  $500^\circ\text{C}$  was shown to increase the crystalline phase fraction. XPS spectroscopy confirmed the presence of Ti 2p, O 1s, Pt 4f, and Pd 3d on the surface. Electrochemical properties studied using the Mott–Schottky method indicated that the coatings exhibit *n*-type conductivity with a high carrier concentration. The platinum coating remained stable after 9 h of operation, while sequentially deposited layers of platinum and palladium extended the electrode lifetime in almost 24 times.

**Keywords:** *titanium dioxide, noble metals, porous structure, thermal treatment, corrosion stability.*

*Kononiuk O. P., Berezovets V. V., Zavalii I. Yu., Borukh I. V., and Chekailo M. V.*

Hydrogen generation by hydrolysis of magnesium hydride composites with additions of  $\text{ZrNi}_{0.5}\text{Al}_{1.5}$  and graphite..... 95

Hydrides of magnesium composites with additions of intermetalide  $\text{ZrNi}_{0.5}\text{Al}_{1.5}$  and graphite were synthesized by reactive ball milling in hydrogen. It is shown that the duration of hydrogenation of magnesium after addition of  $\text{ZrNi}_{0.5}\text{Al}_{1.5}$  and graphite is reduced. The influence of graphite on the particle size of composites was investigated. The effect of these additions and  $\text{MgCl}_2$  concentration on the hydrolysis of magnesium hydride was established.

**Keywords:**  *$\text{MgH}_2$  composites, graphite, magnesium hydride, hydrogen, hydrolysis.*

*Khoma M. S., Chuchman M. R., Ivashkiv V. R., Vasylyv Kh. B., and Ratska N. B.*

Hydrogen permeability through steel membranes during corrosion in chloride-acetate solution under the influence of hydrogen sulphide, carbon dioxide and mechanical stress..... 102

Hydrogen permeability through a steel 20 membrane during corrosion in a chloride-acetate solution under the influence of dissolved  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  and mechanical stress was investigated. It was established that the permeability and effective diffusion coefficient of hydrogen are the lowest in a solution saturated with carbon dioxide. Adding hydrogen sulfide to the solution at a concentration from  $100 \text{ mg/dm}^3$  to saturation leads to an increase in the permeability of hydrogen through the membrane from 1.5 to 3.2 times, which is associated with the intensification of corrosion and hydrogenation of the charging surface. At the same time, the effective hydrogen diffusion coefficient is stable. The applied mechanical stress increases the subsurface concentration and permeability of hydrogen atoms in the metal. The penetration of hydrogen depends, first of all, on the hydrogen sulfide concentration in the solution, which determines the corrosion and hydrogenation rates of the steel.

**Keywords:** *hydrogen permeability, steel, membrane, hydrogen sulfide, carbon dioxide, mechanical stress.*

*Hertsyk O. M., Yezerska O. A., Nosenko V. K., Havryliak N. M., and Pandiak N. L.*

Electrochemical parameters of cobalt amorphous alloys in aggressive environments of various nature..... 108

The corrosion resistance of contact and outer surfaces of strips of amorphous metal alloys based on cobalt  $\text{Co}_{72.0}\text{Fe}_{5.0}\text{Si}_{11.0}\text{B}_{12.0}$ ,  $\text{Co}_{73.2}\text{Fe}_{4.3}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{5.3}\text{B}_{16.7}$ ,  $\text{Co}_{73.3}(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Mo}, \text{Mn})_{5.7}(\text{Si}_{0.2}\text{B}_{0.8})_{21}$  in aqueous solutions of HCl, NaCl and NaOH was investigated. The  $\text{Co}_{72.0}\text{Fe}_{5.0}\text{Si}_{11.0}\text{B}_{12.0}$  alloy has the lowest corrosion resistance in all investigated aggressive environments. Partial replacement of Co and Fe by Mn, as well as Ni, Mo slightly increases the corrosion resistance of the material due to the formation of dense oxide layers on the surface.

**Keywords:** *cobalt amorphous alloys, corrosion resistance, electrochemical characteristics.*

- Kyryliv V. I., Maksymiv O. V., Zvirko O. I., Tsizh B. R., and Kyryliv Ya. B. Corrosion fatigue endurance of steel 45 after surface nanostructuring by mechanical pulse treatment in different environments..... 115

The influence of the technological environment (TE) during the formation of a nanocrystalline structure (NCS) on the normalized carbon steel 45 by mechanical pulse treatment (MPT) on the parameters of the NCS and resistance to multicycle fatigue and corrosion-fatigue failure in a 3% NaCl aqueous solution was investigated. On the specimens, a surface layer with a ferritic-austenitic NCS and a ferrite grain size of 14 and 23 nm was obtained after MPT in mineral oil and air, respectively. It was established that the fatigue endurance of steel with NCS is significantly higher than that without a surface treated layer, and practically does not depend on the type of applied TE during MPT. The highest resistance to corrosion fatigue is characterized by steel with a surface NCS formed by MPT in oil. The obtained results were analyzed taking into account the NCS characteristics, the microhardness of the strengthened layer, the distribution of residual stresses and chemical elements (H, N, C and O).

**Keywords:** *nanocrystalline structure, medium carbon steel, fatigue, corrosion fatigue, residual stresses.*

- Krechkovska H. V., Fedorovych Ya. T., Kopei B. V., and Mykhailiuk V. V. The effect of eccentric tension on the corrosion-fatigue resistance of pump rods..... 121

Complex operating conditions of sucker rods in wells are caused by the action of high alternate loads and corrosive-active technological environments. The most severe load conditions of sucker rods are associated with eccentric tension. In order to predict the performance of operated sucker rods, simulation and calculation modeling of the stresses which will occur in them under real operating conditions is proposed. It is experimentally demonstrate that under eccentric tension of rods, their fatigue life decreases, and the fatigue characteristics of rods made of 20H2M and 15H3MA steels become practically the same after their 5 years of operation.

**Keywords:** *sucker rod, stress, stress-strain state, fatigue, eccentric tension.*

- Tymus M. B., Zin I. M., and Korniy S. A. Corrosion inhibition of an aluminum alloy in a chloride-containing environment by a composition based on dextrin and sodium isoascorbate..... 129

Using the methods of electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, and energy dispersive X-ray analysis, the corrosion inhibition of aluminum alloy in a neutral chloride-containing environment with a composition containing equal weight amounts of dextrin and sodium isoascorbate was investigated. An approximately 20-time increase in the charge transfer resistance of the aluminum alloy due to the protective effect of the inhibitory composition at its optimal concentration was established. A dense adsorption organic film was found on the surface of the metal in the inhibited solution. The degree of metal corrosion protection by the dextrin-isoascorbate composition exceeds 90%. The practical effect of the research is the possibility of obtaining an environment friendly inhibitory composition based on renewable plant materials for corrosion protection of aluminum alloy constructions.

**Keywords:** *dextrin, sodium isoascorbate, corrosion inhibition, aluminium alloy, electrochemical impedance spectroscopy, energy dispersive X-ray analysis, degree of protection.*

*Stechyshyn M. S., Stechyshyna N. M., Mashovets N. S., Zdorenko D. V.,  
Tsepenyuk M. I., and Yuskiv V. M.* Corrosion-mechanical wear  
of carbonitrided steel in an alkaline environment..... 137

The influence of hydrogen-free nitriding in a glow discharge with autonomous process characteristics on the structure and phase composition, electrochemical and tribological characteristics of structural steels was investigated. It was established that the addition of propane to the argon-nitrogen gas mixture increased their corrosion and mechanical wear resistance in 4–18 times.

**Keywords:** *nitriding, structural steels, wear resistance, coefficient of friction.*