

## 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. ІДУТУС (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 31.08.2023. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12. Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 070923 від 07.09.2023. Ціна договірна. Реєстраційне свідоцтво серія ДК № 5068 від 22.03.2016

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

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, № 4, 2023**

липень – серпень

## ЗМІСТ

*Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Любчак М. О., Настасяк С. В.* Вплив експлуатаційної деградації матеріалу на залишковий ресурс нафтопроводів.....5

На основі розробленого раніше енергетичного підходу розв'язано задачу про визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з поверхневою півеліптичною мікротріщиною, в яку проникає ґрунтове корозивне середовище. Трубою рухається турбулентний потік нафти, який викликає двочастотне навантаження її стінки. Увагу зосереджено на мікрodefектах і пластичному матеріалі труби, що деградує під час розвитку тріщини, тому розв'язок задачі з допомогою енергетичного підходу зведено до нелінійного диференціального рівняння відносно функції розкриття тріщини біля її зони передруйнування зі змінними коефіцієнтами. Рівняння разом з початковою і кінцевою (вихід тріщини на внутрішню поверхню труби і її розгерметизація) умовами – математична модель для визначення залишкового ресурсу труби. Функцію розкриття тріщини знайдено наближено за розробленими раніше методами еквівалентних напружених станів і граничної інтерполяції. Отримано залежності залишкового ресурсу труби нафтопроводу зі сталі X70 з урахуванням деградації її матеріалу від початкового розміру дефекту.

**Ключові слова:** нафтопровід, деградація, енергетичний підхід, двочастотне навантаження, функція розкриття тріщини.

*Яворський І. М., Юзефович Р. М., Личак О. В., Семенов П. О., Варивода М. З.*

Аналіз вібрацій пошкодженого підшипникового вузла підйомного механізму портового крана.....14

Методи періодично нестационарних випадкових процесів використано для аналізу вібрацій пошкодженого підшипникового вузла підйомного механізму. Для виявлення та аналізу періодичної нестационарності першого та другого порядків застосовано метод найменших квадратів. На основі обчислених параметрів, які описують структуру періодичної нестационарності, зроблено висновок про тип дефекту і стадії його розвитку.

**Ключові слова:** періодично нестационарні випадкові процеси, вібраційний сигнал, модуляція, підшипниковий вузол, пошкодження.

Ясній В. П., Кречковська Г. В., Будз В. І., Студент О. З. Особливості втомного руйнування сплаву з пам'яттю форми за різної частоти навантаження.....23

Досліджено особливості руйнування зразків зі сплаву з пам'яттю форми (нітинолу) за малоциклової втоми з різною частотою навантаження (0,1; 1 та 10 Hz). Проаналізовано частотні залежності кількості циклів до руйнування зразків, максимальної та залишкової деформації, відповідно, перед та після руйнування. Встановлено, що максимальне значення дисипованої енергії в циклі навантаження знижується зі зростанням частоти від 0,1 до 10 Hz. Фрактографічно встановлено, що механізм втомного руйнування зразків залежить від частоти навантаження. За високої на зламні нітинолу переважали класичні втомні борозенки, декоровані вторинними тріщинами, тоді як за низької виявлено особливий тип борозенкового рельєфу з почерговою зміною кроку і орієнтації площин зсуву, по яких відбувалося локальне підростання тріщини в циклі навантаження. Їх появу пояснено властивими нітинолу фазовими перетвореннями, зумовленими перебудовою його кристалічної ґратки у вершині тріщини внаслідок багаторазових прямих і зворотних (аустеніт → мартенсит → аустеніт) фазових перетворень, відповідно, в півциклах навантаження чи розвантаження зразків.

**Ключові слова:** сплав з пам'яттю форми, малоциклова втома, дисипована енергія, механізм руйнування.

Усов В. В., Шкатуляк Н. М., Павленко Д. В., Ткачук О. М. Анізотропія пружних властивостей зразків зі сплаву Inconel 718, отриманих 3D-друком.....32

Досліджено анізотропію пружних властивостей сплаву Inconel 718, отриманого методом 3D-друку (селективне лазерне спікання) з порошків, залежно від його напрямку. Оцінено вплив вихідної (стартової) порошкової суміші та подальшої термічної обробки (post-treatment) на анізотропію пружних властивостей сплаву. Виявлено, що запропоновані види оброблення дають можливість її знизити. Наведено результати теоретичного оцінювання модулів пружності, зсуву, коефіцієнта Пуассона та їх анізотропії в горизонтальному та вертикальному напрямках побудови за пружними константами монокристала та характеристиками текстури, визначеними за допомогою дифракції рентгенівських променів. Встановлено, що теоретичні значення відхиляються від відповідних експериментальних у межах похибки 6...10%. За результатами оцінки пружних властивостей та їх анізотропії вдається підвищити точність розрахунку напружено-деформованого стану та оптимізувати стратегію 3D-друку складнопрофільних деталей зі сплаву Inconel 718.

**Ключові слова:** жароміцний сплав, 3D-друк, селективне лазерне спікання, термічна обробка, гаряче ізостатичне пресування, рентгенівська дифракція, польні фігури, модуль пружності, анізотропія.

Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Механічні властивості сплаву Inconel 718, виготовленого за технологією вибіркового лазерного плавлення з динамічним фокусуванням на поверхні нанесення.....38

Технологія вибіркового лазерного плавлення – один зі сучасних методів виготовлення деталей складної геометрії, які важко відтворити в умовах традиційного виробництва. Під час фокусування променя лазера на поверхні платформи побудови виникає розфокусування за його відхилення від центра платформи. Забезпечити стабільні параметри та якість друку можна методом динамічного фокусування під час переміщення оптичної системи по осі Z. Експеримент виконано на 3D-принтері Alfa-280 (ТОВ “АЛТ України”), оснащеному двома сканувальними системами з одномодовими волоконними ітербієвими лазерами. Вивчено вплив розташування на платформі дослідних зразків зі жароміцного сплаву Inconel 718 на їх механічні властивості. Встановлено, що розбіжності значень тимчасового опору, відносних видовження та звуження зразків, розміщених у

кутах платформи, спадають від 1 до 38% через зміщення області розфокусування променя. Рекомендовано під час виготовлення розташовувати вироби якомога ближче до осі оптичної системи.

**Ключові слова:** вибіркоче лазерне плавлення, динамічне фокусування, корекція фокусної відстані, сплав Inconel 718, механічні властивості.

Гембара О. В., Сиротюк А. М., Сов'як І. М., Сапужак Я. І., Гембара Н. Т.,  
Гриненко М. В. Аналітична оцінка концентрації водню  
в дефектному матеріалі.....44

Сформульовано задачу дифузії водню в металі з порами. Пори є пастками для водню, їх вважали точковими, розподіленими однорідно по всьому об'єму металу. Отримано розв'язки задачі дифузії в дефектному тілі. Зокрема, для пластини одержано вирази для визначення концентрації як дифузійно-рухомого, так і пасткового водню. Також отримано співвідношення для визначення кількості сорбованого водню дефектною пластиною в довільний момент часу під час її наводнювання. Порівняно вміст водню, сорбованого бездефектною пластиною і пластиною з однорідно розподіленими пастками, та встановлено його 2–3 разове перевищення в останній.

**Ключові слова:** концентрація водню, пороподібні дефекти, дифузійно-рухомий водень, пастковий водень.

Хома М. С., Івашиків В. Р., Чучман М. Р., Рацька Н. Б., Василів Х. Б.  
Методичні особливості дослідження проникності водню  
крізь сталеву мембрану з кислого середовища.....51

Вибрано склад робочих середовищ для визначення параметрів дифузії водню крізь мембрану зі сталі 20 методом Деванатана–Стахурського: анодну комірку заповнено 0,2 М розчином КОН + 10 г/дм<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, а катодну – 1 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 10 г/дм<sup>3</sup> (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CS. Встановлено, що зі збільшенням густини струму катодної поляризації від 0 до 2 А/дм<sup>2</sup> ефективний коефіцієнт дифузії водню через мембрану збільшується у ~ 6 разів. Він враховує не лише перенесення водню крізь мембрану, а й залежить від типів пасток та тривалості перебування там водню. Абсорбція водню супроводжується підвищенням дефектності структури металу, внаслідок чого змінюються умови його дифузії. Оцінено залежність проникності водню через сталь від часу за рівнянням Лапласа за різних ймовірних значень ефективного коефіцієнтів дифузії та концентрації водню. Отримані експериментальні результати узгоджуються з теоретичними розрахунками.

**Ключові слова:** воднева проникність, ефективний коефіцієнт дифузії водню, сталь 20, катодна поляризація.

Бродніковський С. М., Подгурська В. Я., Лисуненко Н. О., Бродніковський Д. М.,  
Полішко І. О., Бездорожєв О. В., Кириша А. А., Васильєв О. Д.  
Вплив структури анода на електричні властивості  
твердооксидної паливної комірки.....59

Досліджено вольт-амперні та імпедансні характеристики твердооксидних паливних комірок (ТОПК) при 800°C залежно від структури анода, електроліту і катода. Встановлено, що за поєднання анода 10Sc1CeSZ–NiO з електролітом 10Sc1CeSZ, бар'єрним катодним шаром GDC і катодом LSCF–GDC підвищуються електричні характеристики такої ТОПК в 1,4 та 2,8 раза порівняно з ТОПК системи 3,5YSZ–NiO/8YSZ/LSM–8YSZ та системи 10Sc1CeSZ–NiO/8YSZ/LSM–8YSZ, відповідно. При цьому виявлено несумісність анода 10Sc1CeSZ–NiO та електроліту 8YSZ, що пов'язано з міграцією церію під час спікання півкомірки.

**Ключові слова:** твердооксидна паливна комірка, анод, йонна провідність, питома потужність, імпедансна спектроскопія.

Імбирович Н. Ю., Звірко О. І., Кужидловський К. Я. Морфологія та поруватість поверхні титанових сплавів після плазмо-електролітного оксидування у лужному середовищі з діатомітом.....67

Морфологія поверхні та поруватість є важливими функціональними властивостями біосумісних оксидокерамічних покриттів, синтезованих на титанових сплавах. З'ясовано дію складу електроліту для плазмо-електролітного оксидування титанового сплаву Ti-6Al-4V на шорсткість та поруватість сформованих покриттів. До базового лужного водного розчину на основі калію та кальцію гідроксидів, натрію силікату, пірофосфату та гексаметофосфату додавали кальцію гідроксилапатит та діатоміт. Показано, що додавання кальцію гідроксилапатиту сприяє формуванню поруватіших покриттів. Виявлено, що в результаті підвищення у 4 рази концентрації компонентів електроліту та додавання діатоміту (20 g/l) синтез покриттів стабілізується та формуються покриття з вищою шорсткістю (у 3–4 рази) та поруватістю (в 1,9 рази) порівняно з покриттями, синтезованими в електроліті без діатоміту. Збільшення удвічі тривалості синтезу у середовищі з діатомітом сприяє подальшому підвищенню шорсткості покриття.

**Ключові слова:** плазмо-електролітне оксидування, титанові сплави медичного призначення, шорсткість, поруватість, діатоміт.

Кускова Н. І., Сизоненко О. М., Присташ М. С., Торпаков А. С. Ущільнення матеріалу шляхом суміщення іскрового плазмового спікання та самопоширюваного високотемпературного синтезу у системі Ti-Al-C.....75

Ініціацією самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС) у системі Al-Ti-C під час іскрового плазмового спікання (ІПС) зразків отримано щільний матеріал, який містить МАХ-фази. Розвинуто просту реологічну теорію для опису суміщених процесів СВС та ІПС під час пресування. Встановлено, що залежність відносної густини порошкової засипки від часу масштабує чинник відношення тиску до в'язкості незмінної основи матеріалу. Одержано аналітичні часові залежності швидкості руху плунжера і висоти зразка, а також встановлено проміжок часу для досягнення заданої відносної густини матеріалу системи, за якими можна прогнозувати і аналізувати пресування порошкових сумішей під час ІПС.

**Ключові слова:** іскрове плазмове спікання, ущільнення, металоматричний композит, самопоширюваний високотемпературний синтез.

Рябцев І. О., Бабінець А. А., Лентюгов І. П., Жданов В. О., Рябцев І. І., Осин В. В. Методики досліджень властивостей наплавленого металу та їх використання для розроблення порошкових дротів.....82

Створено та удосконалено методики та зразки для комплексної оцінки експлуатаційних властивостей матеріалів для наплавлення деталей та інструментів для оброблення металів тиском. Зокрема, удосконалено методику оцінки зносотривкості наплавленого металу за кімнатних (20°C) та підвищених (600°C) температур, а також його термічної тривкості. Розроблено конструкції зразків та обрано оптимальні режими їх випроб, які імітують реальні умови експлуатації. Встановлено, що з введенням 0,01% мікрододачків бору експлуатаційні властивості наплавлених металів 25X5ФМС та 35В9Х3СФ поліпшуються в 1,2–1,6 рази. Удосконалено склад шихти порошкових дротів ПП-Нп-25Х5ФМС та ПП-Нп-35В9Х3СФ введенням до неї лігатури ФМІ-2, що містить бор.

**Ключові слова:** *дугове наплавлення, наплавлений метал, модифікування, методика досліджень, зносо- та термічна тривкість.*

*Веселівська Г. Г., Погрелюк І. М., Проскурняк Р. В., Купрін О. С.*

Адгезійна міцність покриттів TiN, осаджених на титан VT1-0 з різним станом поверхні.....89

Досліджено покриття TiN, отримані вакуумно-дуговим напиленням на поверхні технічно чистого титану VT1-0 та термодифузійним насиченням в атмосфері азоту. Покриття оцінювали за товщиною, фазовим складом, шорсткістю поверхні, мікротвердістю та адгезійною міцністю. Випробуваннями на адгезію Роквелла встановлено, що покриття TiN, нанесені як на необроблений, так і на попередньо азотований титан, відповідають рівню адгезії HF2, який прийнятний для комерційного використання на виробках.

**Ключові слова:** *титан VT1-0, вакуумно-дугове напилення, термодифузійне насичення, покриття TiN, адгезійна міцність.*

*Тьомкін Д. О., Педаш О. О., Данілов С. М., Клочихін В. В., Наумик О. О.,*

*Наумик В. В.* Структура та властивості литих лопаток зі сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого нікелево-ітрієвою лігатурою.....95

Досліджено структуру та властивості робочих лопаток, відлитих зі жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого нікелево-ітрієвою лігатурою ІТН-1, в литому та стандартно термообробленому станах, а також після гарячого ізостатичного пресування (ГП) та подальшої термічної обробки. Встановлено, що хімічний склад, а також механічні та жароміцні властивості матеріалу дослідних литих лопаток як без, так і з ГП задовільні і відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85. У пері та хвостовику лопатки без ГП виявлено скупчення усадкової пухкості та окремі мікропори розміром до  $\sim 180$  і  $117 \mu\text{m}$ , відповідно. Кут згину дослідних лопаток після ГП та стандартної термічної обробки становить  $105\text{...}115^\circ$  (без тріщин). Під час ГП при  $1210^\circ\text{C}$  і за тиску  $160 \text{ MPa}$  мікропори і пухкості, що не виходять на поверхню деталей (розташовані у внутрішніх обсягах металу), заліковуються. У структурі лопаток після ГП мікропори практично відсутні, що сприяє стабілізації структури та властивостей матеріалу. Розмір поодиноких мікропор у місцях зосередження грубої пухкості до модифікування не перевищує  $30 \mu\text{m}$ .

**Ключові слова:** *жароміцний нікелевий сплав, лита лопатка, хімічний склад, модифікування, ітрій, гаряче ізостатичне пресування, макро- і мікроструктура, механічні властивості.*

*Сухацький Ю. В., Шеніда М. В., Корній С. А.* Сонохімічний синтез

наночастинок шпінелі  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ .....102

Сонохімічним методом (співосадження в ультразвуковому полі) синтезовано наночастинки шпінелі  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ . Встановлено, що дифракційні піки Брегга синтезованого продукту узгоджувались із еталонною моделлю шпінелі  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ , а середній розмір кристаліта, розрахований за рівнянням Дебая–Шеррера, становив  $\sim 7 \text{ nm}$ . Отримані наночастинки шпінелі  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  використано як активатори калію персульфату під час окиснювальної деградації діазинового барвника сафраніну Т. Зазначено, що ступінь деградації сафраніну Т дорівнював  $98,3\%$  за тривалості передового окиснення “ультразвук/ $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ”  $7200 \text{ s}$  і вмісту каталізатора  $0,1 \text{ g/l}$ , а константа швидкості –  $1,529 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

**Ключові слова:** *сонохімічний синтез, метод співосадження, ультразвук, наночастинки, шпінель,  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ .*

<i>Коптєва Ж. П., Вортман М. Я., Іутинська Г. О., Коптєва Г. Є., Абдуліна Д. Р., Лемешко В. М., Терєбіленко А. В., Пилипенко А. М., Шевченко В. В.</i>	
Мікробна деструкція гуанідиновмісних полімерів.....	108

Вивчено деструкцію гуанідиновмісних полімерів, а також хімічні і фізико-механічні властивості синтезованих матеріалів за впливу вугледеньокиснювальних бактерій (ВОБ). За допомогою сканувальної електронної мікроскопії на їх поверхні виявлено формування біоплівки ВОБ. Встановлено, що такі полімери пригнічують каталазу і ліполітичну активність у 1,3–3 рази проти контрольного середовища і їх деструкція незначна (4,4...6,53%). Міцність на розрив та відносне видовження матеріалів практично не змінюються за 180 days експерименту, що узгоджується з результатами ІЧ-мікроскопії. Метод термогравіметричного аналізу засвідчив, що початкова температура розкладу досліджуваних матеріалів не знижувалась, тобто їх властивості після впливу ВОБ не змінились. Припускали, що під впливом бактерій на поверхні полімерів, можливо, відбувалась незначна біодеструкція. Отже, випробуваний матеріал на основі поліуретану є перспективним для захисту різних конструкцій від біопшкоджень.

**Ключові слова:** *гуанідиновмісні полімери, біодеструкція, вугледеньокиснювальні бактерії, ферменти, ІЧ-мікроскопія, термогравіметрія, міцність до розриву, відносне видовження.*

<i>Слободян З. В., Маглатюк Л. А., Купович Р. Б., Різун Ю. Я., Юркевич Р. М.</i>	
Інгібування корозії вуглецевої сталі в хлоридно-ацетатному розчині та пластовій воді нітрогенвмісними сполуками.....	117

Гравіметричними та електрохімічними дослідженнями встановлено, що в хлоридно-ацетатному розчині за перемішування нітрогенвмісні уротропін, карбамід, цистеїн за концентрацій 1 g/l та композиція карбамід + цистеїн мають задовільні інгібувальні властивості. У пластовій воді цистеїн та його композиції з уротропіном і камеддю ефективно гальмують швидкість корозії сталі. Досліджені сполуки є інгібіторами змішаної дії, оскільки сповільнюють обидві електродні реакції.

**Ключові слова:** *екологічно безпечні інгібітори, ступінь захисту, синергізм.*

<i>Масюк А. С., Білий Л. М., Гуменецький П. В., Левицький В. Є., Гуменецький Т. В.</i>	
Структура та властивості поліестерних композитів з полімерсилікатним модифікатором.....	123

Досліджено вплив металовмісних полімерсилікатних модифікаторів на закономірності тверднення та властивості поліестерних композитів. Встановлено вплив концентрації та способу введення модифікатора (полівінілового спирту і полівінілпіролідону) та природи металу на характеристику поверхні металовмісних полімерсилікатних матеріалів. Виявлено, що під час одержання таких матеріалів виникають міжмолекулярні взаємодії активних силікатних та функційних груп високомолекулярного компонента.

**Ключові слова:** *модифікатор, полівінілпіролідон, тверднення, міжмолекулярна взаємодія, структура, спектроскопічні дослідження, поліестерні композиції, силікатні наповнювачі.*

## НАШІ ВТРАТИ

<b>Володимир Панасюк.....</b>	<b>129</b>
-------------------------------	------------





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, № 4, 2023**

July – August

---

---

## CONTENTS

*Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., Liubchak M. O., and Nastasiak S.V.*

The influence of operational degradation of material on residual life  
of oil pipelines.....5

On the basis of the energy approach previously developed by the authors, the problem of determining the residual life of an oil pipeline pipe with a surface semi-elliptical microcrack, into which the soil corrosive medium penetrates, is solved. A turbulent flow of oil moves along such a pipe, which causes two-frequency loading of its wall. Since micro-defects and the plastic material of the pipe, which degrades during crack propagation, are considered, the solution of the problem using the energy approach is reduced to a nonlinear differential equation with respect to the crack opening function near its pre-fracture zone with variable coefficients. The equation together with the initial and final conditions (crack opening on the inner surface of the pipe and its depressurization) is a mathematical model for determining the residual life of the pipe. The crack opening function is found approximately using the method of equivalent stress states and the limit interpolation method developed earlier by the authors. The dependences of the residual life of the oil pipeline pipe made of X70 steel, taking into account the degradation of its material, were obtained.

**Keywords:** *oil pipeline, degradation, energy approach, two-frequency loading, crack opening function.*

*Javorskyj I. M., Yuzefovych R. M., Lychak O. V., Semenov P. O.,*

*and Varyvoda M. Z.* Vibration analysis of the damaged bearing unit  
of the port crane lifting mechanism.....14

The methods of periodically non-stationary random processes were used to analyze the vibrations of the damaged bearing unit of the lifting mechanism. To identify and analyze periodical nonstationarity of the first and second orders the least squares method was used. On the basis of the calculated parameters, which describe the structure of periodical nonstationarity, a conclusion about the type of defect and its development was made.

**Keywords:** *periodically non-stationary random processes, vibration signal, modulation, bearing unit, damage.*

<i>Iasnii V. P., Krechkovska H. V., Budz V. I., and Student O. Z. Peculiarities of fatigue fracture of shape memory alloy at different load frequency.....</i>	<i>23</i>
--	-----------

The features of fracture of shape memory alloy samples (nitinol) under low-cycle fatigue with different load frequencies (0.1; 1 and 10 Hz) were investigated. The frequency dependences of such indicators as the number of cycles before the fracture of samples, the maximum and residual deformation before and after their fracture, respectively, were analyzed. It was established that the maximum value of the dissipated energy in the load cycle decreases with an increase of frequency from 0.1 to 10 Hz. It is shown fractographically that the mechanism of fatigue failure of specimens depends on the frequency of loading. At high frequency at the nitinol fracture surface classical fatigue striations decorated with secondary cracks dominated. While at low frequency, a special type of striated relief was found with alternating changes in the striation spacing and the orientation of shear planes, in which a local crack growth occurred in the loading cycle. Their appearance is explained by phase transformations inherent in nitinol, due to the rearrangement of its crystal lattice at the crack tip with multiple direct and reverse phase transformations (austenite  $\rightarrow$  martensite  $\rightarrow$  austenite) occurring in half-cycles of loading and unloading of samples, respectively.

**Keywords:** *shape memory alloys, low-cycle fatigue, dissipated energy, fracture mechanism.*

<i>Usov V. V., Shkatuliak N. M., Pavlenko D. V., and Tkachuk O. M. Anisotropy of elastic properties of Inconel 718 alloy specimens obtained by 3D printing.....</i>	<i>32</i>
---	-----------

The anisotropy of the elastic properties of Inconel 718 alloy produced by 3D printing (selective laser sintering) from powders was studied depending on the direction of 3D printing. The influence of the initial powder mixture and the subsequent heat treatment (post-printing treatment) on the anisotropy of the elastic properties of the alloy was evaluated. It is shown that the proposed treatments can reduce the anisotropy of the elastic properties of the alloy. The results of theoretical estimation of the elastic and shear moduli, Poisson's ratio, and their anisotropy in the horizontal and vertical directions of 3D printing are presented, using elastic constants of the single crystal and texture characteristics determined by X-ray diffraction. It is shown that the obtained theoretical values deviate from the corresponding experimental ones by 6...10%. The results of estimating elastic properties and their anisotropy can be used to improve the accuracy of calculating the stress-strain state and optimize the strategy of 3D printing complex parts from Inconel 718 alloy.

**Keywords:** *heat-resistant alloy, 3D printing, selective laser sintering, heat treatment, hot isostatic pressing, X-ray diffraction, pole figures, modulus of elasticity, anisotropy.*

<i>Adzhamskyi S. V., Kononenko G. A., and Podolskyi R. V. Mechanical properties of Inconel 718 alloy produced by selective laser melting technology with dynamic focusing on the application surface.....</i>	<i>38</i>
---	-----------

The technology of selective laser melting is one of the modern methods of manufacturing parts of complex geometry, which are difficult to reproduce in the conditions of traditional production. When focusing the laser beam on the surface of the construction platform, there is a problem of defocusing the laser beam when it deviates from the center of the platform. One of the ways to ensure stable parameters and print quality is the method of dynamic focusing when moving the optical system along the Z axis. The experiment was performed on an Alfa-280 3D printer (ALT Ukraine LLC), equipped with two scanning systems with single-mode fiber ytterbium lasers. The influence of the location on the platform of test samples made of heat-resistant alloy Inconel 718 on the features of mechanical properties was studied. It was established that the mechanical properties (temporal resistance, relative elongation, relative narrowing) of samples located in the corners of the platform had differences in values

from 1 to 38% due to the displacement of the beam defocusing area. When manufacturing products, it is recommended to place them as close as possible to the axis of the optical system.

**Keywords:** *selective laser melting, dynamic focusing, focal length correction, Inconel 718 alloy, mechanical properties.*

*Hembara O. V., Syrotyuk A. M., Soviak I. M., Sapuzhak Ya. I., Hembara N. T., and Hrynenko M. V.* Analytical estimation of hydrogen concentration in a defective material.....44

The problem of hydrogen diffusion in a metal with pores is formulated. Pores are sources of absorption (traps) of hydrogen. Traps were considered to be point-like, distributed uniformly over the entire volume of the metal. Solutions to the problem of diffusion in a defective body have been obtained. In particular, expressions for determining the concentration of both diffusion-moving and trapped hydrogen are obtained for the plate. We also obtained a ratio for determining the amount of hydrogen sorbed by a defective plate at an arbitrary moment of time during its hydrogenation. The amount of hydrogen sorbed by a defect-free plate and a plate with uniformly distributed traps was compared. A 2–3 time excess of hydrogen content in the defective plate compared to the defect-free plate was established.

**Keywords:** *hydrogen concentration, void-like defects, diffusible hydrogen, trapped hydrogen.*

*Khoma M. S., Ivashkiv V. R., Chuchman M. R., Ratska N. B., and Vasylyv Kh. B.* Methodological features of the study of hydrogen permeability through a steel membrane from an acidic environment.....51

The composition of the working environments was chosen for determining the parameters of hydrogen diffusion through a steel 20 membrane by the Dewanathan–Stahurskii method: the anodic cell was filled with a solution of 0.2 M KOH + 10 g/dm<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, and the cathodic cell was filled with a solution of 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 10 g/dm<sup>3</sup> (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CS. It is shown, that the effective diffusion coefficient of hydrogen through a membrane made of steel 20 increases by ~ 6 times with an increase in the current density of the cathodic polarization from 0 to 2 A/dm<sup>2</sup>. The effective diffusion coefficient takes into account not only the transfer of hydrogen through the membrane, but also depends on the types of traps and the duration of hydrogen's stay in them. Absorption of hydrogen is accompanied by an increase in the defectiveness of the metal structure, which changes the conditions of hydrogen diffusion. The dependence of hydrogen permeability through steel on time was evaluated using the Laplace equation for different probable values of the effective diffusion coefficient and hydrogen concentration. The obtained experimental results agree with theoretical calculations.

**Keywords:** *hydrogen permeability, effective diffusion coefficient for hydrogen, steel 20, cathodic polarization.*

*Brodnikovskiy Ye. M., Podhurska V. Ya., Lysunenko N. O., Brodnikovskiy D. M., Polishko I. O., Bezdorozhev O. V., Kyrysha A. A., and Vasylyev O. D.* The influence of the anode structure on the electrical properties of a solid oxide fuel cell.....59

The volt-ampere and impedance characteristics of solid oxide fuel cells (SOFC) at 800°C were studied depending on the structure of the anode, electrolyte, and cathode. The combination of the 10Sc1CeSZ–NiO anode with the 10Sc1CeSZ electrolyte, the GDC barrier cathode layer, and the LSCF–GDC cathode leads to a 1.4-fold increase in the electrical properties of this SOFC compared to the SOFC of the 3.5YSZ–NiO / 8YSZ / LSM–8YSZ system and 2.8 times compared to the SOFC of the 10Sc1CeSZ–

NiO / 8YSZ / LSM–8YSZ system. At the same time, we revealed the incompatibility of the 10Sc1CeSZ–NiO anode and the 8YSZ electrolyte, which is associated with cerium migration during sintering of the half-cell.

**Keywords:** *solid oxide fuel cell, anode, ion conductivity, specific power, impedance spectrometry.*

*Imbirovych N. Yu., Zvirko O. I., and Kurzydowski K. J.* Morphology and porosity of titanium alloys surface after plasma-electrolytic oxidation in an alkaline environment with diatomite.....67

Surface morphology and porosity are important functional properties of biocompatible oxide ceramic coatings synthesized on titanium alloys. The effect of the composition of the electrolyte for the plasma-electrolytic oxidation of the Ti–6Al–4V titanium alloy on the roughness and porosity of the formed coatings is clarified. Calcium hydroxylapatite and diatomite were added to the basic alkaline aqueous solution based on potassium and calcium hydroxides, sodium silicate, pyrophosphate and hexametho-phosphate. It is shown that the addition of calcium hydroxylapatite contributes to the formation of coatings with higher porosity. It is found that as a result of a 4-time increase in the concentration of electrolyte components and the addition of diatomite (20 g/l), the coating synthesis is stabilized and coatings with higher roughness (in 3–4 times) and porosity (in 1.9 times) are formed compared to coatings, synthesized in an electrolyte without diatomite. Doubling the duration of synthesis in an environment with diatomite contributes to a further increase in the coating roughness.

**Keywords:** *plasma-electrolytic oxidation, medical titanium alloys, roughness, porosity, diatomite.*

*Kuskova N. I., Syzonenko O. M., Prystash M. S., and Torpakov A. S.* Compacting of material by combining spark plasma sintering and self-expanding high temperature synthesis in Ti–Al–C system.....75

Initiation of self-expanding high-temperature synthesis (SHS) in Al–Ti–C system in the process of spark plasma sintering (SPS) of specimens allows obtaining a material with high density, which contains MAX-phases. A simple rheological theory has been developed, which can describe SHS and SPS processes under certain conditions. Within the framework of this model, the processes of pressing and extrusion at uniaxial pressure are considered. It is shown that the dependence of relative density of powder mixture on time is scaled by the factor of the ratio of pressure to toughness of the invariant base of the material. Analytical time dependences of the plunger speed and sample height, as well as the time required to achieve the specified value of the relative density of the Al–Ti–C material, which allows us to predict and analyze the compression of powder mixtures in the IPS process are obtained.

**Keywords:** *spark plasma sintering, seals, metal-matrix composite, self-expanding high-temperature synthesis.*

*Ryabtsev I. O., Babinets A. A., Lentugov I. P., Zdanov V. O., Ryabtsev I. I., and Osin V. V.* Methods of investigation of the properties of deposited metal and their use for the development of flux-cored wires .....82

Methods and samples have been developed and improved for comprehensive evaluation of the operational properties of materials for hardening parts and tools for pressure metal processing. In particular, the method for assessing the wear resistance of deposited metal at room (20°C) and elevated (600°C) temperatures, as well as the thermal stability of deposited metal, is improved. Designs of samples and optimal test modes, which simulate their real operating conditions, are selected. It is established that the introduction of the boron microadditives in the amount of 0.01% leads to an increase in the service properties of the deposited 25X5ΦMC and 35B9X3CΦ steels in 1.2–1.6

times. According to these results, the composition of the flux-cored ПП-НП-25Х5ФМС and ПП-НП-35В9Х3СФ wires was improved due to the addition of FMI-2 ligature containing boron.

**Keywords:** *arc surfacing, deposited metal, modification, test methods, wear and thermal resistance.*

*Veselivska H. H., Pohrelyuk I. M., Proskurnyak R. V., and Kuprin O. S.*

Adhesion strength of TiN coatings deposited on VT1-0 titanium  
with different surface conditions.....89

The TiN coating obtained by vacuum-arc spraying on the surface of commercially pure VT1-0 titanium and thermodiffusion saturation in a nitrogen atmosphere was studied. The coating was evaluated by thickness, phase composition, surface roughness, its microhardness and adhesive strength. Rockwell adhesion tests showed that the TiN coatings applied to both untreated and pre-nitrided titanium meet HF2 adhesion level acceptable for commercial use on products.

**Keywords:** *titanium VT1-0, vacuum-arc spraying, thermodiffusion saturation, TiN coating, adhesive strength.*

*Tomkin D. O., Pedash O. O., Danilov S. M., Klochikhin V. V., Naumyk O. O.,  
and Naumyk V. V.* Structure and properties of cast blades

made of ЖС3ДК-BI alloy modified with nickel-yttrium ligature.....95

The structure and properties of the working cast blade of the heat-resistant ЖС3ДК-BI nickel alloy, modified with nickel-yttrium ligature ITH-1, in the cast and standard heat-treated states, as well as after hot isostatic pressing (HIP) and subsequent heat treatment, were studied. It was established that the chemical composition, as well as the mechanical and heat-resistant properties of the material of the experimental cast blades, both without and after the HIP, are satisfactory and meet the requirements of standard OST 1 90126-85. In the feather and shank of the blade without HIP, an accumulation of shrinkage friability and microporosity up to ~ 180 and 117  $\mu\text{m}$ , respectively, were found. The bending angle of the experimental blades after the HIP and standard heat treatment is 105...115° (without the formation of cracks). In the process of HIP at a temperature of 1210°C and a pressure of 160 MPa micropores and coarse particles that do not reach the surface of the parts (located in the internal volumes of the metal) are healed. Micropores are practically absent in the structure of the examined blades after HIP, which contributes to the stabilization of the structure and properties of the material. The size of the single micropores present after the HIP, detected in the places of coarse debris concentration before the HIP operation, does not exceed 30  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** *heat-resistant nickel alloy, cast blade, chemical composition, modification, yttrium, hot isostatic pressing, macro- and microstructure, mechanical properties.*

*Sukhatskiy Yu. V., Shepida M. V., and Korniy S. A.* Sonochemical synthesis

of MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel nanoparticles.....102

MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel nanoparticles were synthesized by the sonochemical method (co-precipitation in an ultrasonic field). The Bragg diffraction peaks of the synthesized product agreed with the MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel reference model, and the average MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystallite size, calculated using the Debye-Scherrer equation, and was ~7 nm. The obtained MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel nanoparticles were used as potassium persulfate activators during the oxidative degradation of the diazine dye safranin T. The degradation degree of safranin T for the duration of the advanced oxidation “ultrasound/MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>” of 7200 s and a catalyst loading of 0.1 g/l was equal to 98.3%, and the rate constant was 1.529 · 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>.

**Keywords:** *sonochemical synthesis, co-precipitation method, ultrasound, nanoparticles, spinel, MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.*

*Kopteva Zh. P., Vortman M. Ya., Iutynska G. O., Kopteva G. E., Abdulina D. R., Lemeshko V. M., Terebilenko A. V., Pylypenko A. M., and Shevchenko V. V.*  
Microbial destruction of guanidine containing polymers..... 108

The fracture of guanidine-containing polymers and the chemical and physico-mechanical properties of the synthesized materials under the influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB) were studied. Scanning electron microscopy revealed the formation of a HOB biofilm on the surface of the studied materials. Such polymers inhibited catalase and lipolytic activity in 1.3–3 times compared to the environment under control. According to the obtained data, the fracture of guanidinium polymers was insignificant (4.4...6.53%). The physico-mechanical properties of the materials – tensile strength and relative elongation practically did not change during 180 days of the experiment. These results are consistent with the results of IR microscopy. The method of thermogravimetric analysis showed that for the two studied materials the initial temperature of decomposition did not decrease and their properties after exposure to the HOB did not change. It can be assumed that under the influence of bacteria on the surfaces of these polymers, minor surface biodegradation may have occurred. Therefore, the tested polyurethane-based material is promising for protecting various structures against biodegradation.

**Keywords:** *guanidine-containing polymers, biodegradation, hydrocarbon-oxidizing bacteria, enzymes, IR microscopy, thermogravimetry, tensile strength, relative elongation.*

*Slobodyan Z. V., Mahlatiuk L. A., Kupovykh R. B., Risun Yu. Ya., and Yurkevych R. M.* Corrosion inhibition of carbon steel in chloride-acetate solution and in stratal water by nitrogen-containing compounds..... 117

Gravimetric and electrochemical studies established that nitrogen-containing urotropin, urea, cysteine of concentrations 1 g/l and the composition of urea + cysteine exhibit satisfactory inhibitory properties in a chloride-acetate solution upon mixing. In stratal water, cysteine and its compositions with urotropin and gum effectively inhibit the rate of steel corrosion. The studied compounds are inhibitors of mixed action, since they retard electrode reactions.

**Keywords:** *environmentally safe corrosion inhibitors, degree of protection, synergism.*

*Masiuk A. S., Bilyi L. M., Humenetskyi P. V., Levytskyi V. Ye., and Humenetskyi T. V.*  
Structure and properties of polyester composites with polymer silicate modifier..... 123

The effect of metal-containing polymer silicate modifiers on the regularities of hardening and properties of polyester composites was studied. The effect of the nature, concentration, and method of introduction of the modifier component (polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone) and the nature of the metal on the surface characteristics of metal-containing polymer silicate materials was determined. It was found that intermolecular interactions of active silicate and functional groups of the high-molecular component occur during such materials production.

**Keywords:** *modifier, polyvinylpyrrolidone, hardening, intermolecular interaction, structure, spectroscopic studies, polyester compositions, silicate fillers.*

## OUR LOSSES

**Volodymyr Panasyuk**..... 129