

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

## EDITORIAL BOARD

Z. T. NAZARCHUK (Editor-in-Chief), H. M. NYKYFORCHYN (Deputy Editor-in-Chief), R. R. KOKOT (Secretary), O. Ye. ANDREIKIV, R. Ye. GLADYSHEVSKII, I. M. DMYTRAKH, Z. A. DURIAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN', R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, L. M. LOBANOV, P. O. MARUSCHAK, O. P. OSTASH, V. V. PANASYUK, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. 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. (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. Копчак, Г. М. Кулик*

---

Підписано до друку 03.05.2022. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.  
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 100522 від 10.05.2022. 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", 2022

# ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

**ТОМ 58, № 2, 2022**

березень – квітень

## ЗМІСТ

*Лобанов Л. М., Пащин М. О., Міходуй О. Л., Шльонський П. С., Чопик В. В.,  
Карлов О. М.* Підвищення опору втомному руйнуванню зварних з'єднань  
керованою синхронізацією електродинамічних дій.....5

Щоб використовувати сучасні зварні транспортні конструкції зі сплавів на основі алюмінію, слід розробити перспективні методи подовження їх ресурсу, одним з яких є електродинамічна обробка (ЕДО), яка підвищує їх довговічність, оптимізуючи напружено-деформований стан у зоні передбачуваного втомного руйнування. Мікропроцесорним керуванням у двоканальній ЕДО можна збільшити ефективність оброблення через керовану синхронізацію складників електродинамічних дій порівняно із одноканальною. Під час втомних випробувань дослідних зварних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6 за амплітуди циклу  $2\sigma_a = 80 \dots 160$  МПа обидві ЕДО поліпшують їх довговічність  $N$  відповідно у 2,0–2,4 і 2,2–2,7 рази, попри той факт, що двоканальна реалізована за втричі менших енергетичних витрат проти одноканальної. Наслідком унеможливлення проходження імпульсного струму крізь дослідний зразок за двоканальної ЕДО є зниження параметра  $N$  у 1,5 рази проти ЕДО із його проходженням, яке пов'язано із відсутністю впливу електроімпульсного складника, що інтенсифікує релаксацію залишкових зварювальних напружень внаслідок електропластичності. Двоканальна ЕДО шва і лінії сплавлення удвічі підвищує значення  $N$  порівняно з обробленням лише шва, що пояснюють розповсюдженням зони напружень стиску на лінію сплавлення, яке забезпечує менший розмах циклічних напружень, ніж після ЕДО шва.

**Ключові слова:** електродинамічна обробка, електродний пристрій, одно- і двоканальна схеми, залишкові зварювальні напруження, алюмінієвий сплав, довговічність, імпульс електричного струму, амплітуда циклу, вихрові струми, електропластичний ефект, пластичні деформації, імпульсне електромагнетне поле.

*Жерносєков А. М., Федорчук В. Є., Кисла Г. П., Коваль В. А., Фальченко Ю. В.*  
Вплив форми імпульсів зварювального струму на властивості з'єднань  
алюмінієвих сплавів.....12

Досліджено вплив параметрів імпульсних джерел живлення під час зварювання плавким електродом на особливості формування структури і властивостей зварних з'єднань різних алюмінієвих сплавів. Здійснено порівняльні дослідження

вибраних джерел живлення та отримано зварні з'єднання алюмінієвих сплавів за оптимальних режимів зварювання. Виконано металографічні дослідження та встановлено особливості знеміцнення алюмінієвих сплавів у зоні термічного впливу під дією тепла зварювальної дуги. Виявлено переваги використання джерел з регульованою формою струму для формування зварного шва, його структури та механічних властивостей зварних з'єднань.

**Ключові слова:** імпульсно-дугове зварювання, плавкий електрод, форма імпульсів струму, алюмінієві сплави, зварні з'єднання, зона термічного впливу, мікроструктура, розподіл твердості, механічні властивості.

Сизоненко О. М., Ташев П., Торпаков А. С., Липян Є. В., Пристаиш М. С., Кандева М., Дякова В. Вплив високовольтного електророзрядного оброблення порошків на властивості металоматричних композитів системи Ti-TiC.....20

Досліджено вплив режиму високовольтної електророзрядної обробки вихідної порошкової шихти у газі та етиловому спирті на структуру, фазовий склад, твердість, мікротвердість, зносо- та корозійну стійкість металоматричних композитів системи Ti-TiC, консолідованих методом іскрового плазмового спікання. Показано, що за використання електродної системи типу "вістря-площина" в середовищі газу та спирту збільшення питомої енергії до 20 MJ/kg призводить до накопичення вільного вуглецю, що негативно впливає як на іскрове плазмове спікання, так і на властивості отриманого металоматричного композита.

**Ключові слова:** іскрове плазмове спікання, металоматричний композит, високовольтний електричний розряд, нановуглець, електророзрядне диспергування, титан, плазма, плазмові технології.

Матвійчук О. О., Андреев І. В., Гнатенко І. О., Євдокимова О. В., Давиденко С. А., Цисар М. О. Технологія формування мезоструктур у спечених твердих сплавах WC-Co та WC-Ni.....29

Вперше продемонстровано, що звичайним рідкофазним спіканням за температур від 1290 до 1370°C та тривалості ізотермічної витримки 10...20 min можна отримати мезоструктурний твердий сплав WC-Co або WC-Ni. Твердість сплавів з мезоструктурою зі зменшенням вмісту кобальту від 28 до 20 mass% зростає з 77,5 до 81 HRA, при цьому мікротвердість мезоелементів може підвищитись від 4,76 до 6,3 GPa. Мезоструктурні сплави WC-Co ефективні для гірничих інструментів, де необхідні високі зносо- та ударостійкість і знакозмінність навантажень, а сплав WC-Ni – у важконавантажених парах тертя.

**Ключові слова:** спечені тверді сплави WC-Co, WC-Ni, карбід вольфраму, гранула, мезоструктура, пари тертя.

Шевченко О. М., Кулак Л. Д., Кузьменко М. М., Котко А. В., Фіртсов С. О. Вплив кремнію на структуру і твердість біомедичних сплавів Ti-18Nb-4Zr-xSi у литому стані та після гартування.....33

Досліджено литі біомедичні сплави Ti-18Nb-4Zr-xSi з 0,5...1,5 wt.% кремнію. Гартували у воді при 900...1200°C з витримкою 5 min і 1 h. Виявлено, що нагрів сплавів під гартування призводить до розпаду нерівноважних фаз, вміст кремнію розподіляється між фазами у твердому розчині та силіцидами. Оскільки майже весь кремній зв'язується з цирконієм і титаном у силіциди, твердість використовуваних сплавів залежить переважно від кількості останніх і становить 26...28 HRC, досягаючи максимальних значень для сплавів евтектоїдного складу ~0,8...1,2 wt.% Si, де найбільше виділяються дисперсні силіциди. Зі збільшенням вмісту кремнію у заевтектоїдних сплавах зростають розміри силіцидів, а також формується більша кількість β-фази в литих, в результаті чого їх твердість по-

мітно знижується. За низьких температур гартування 900...1000°C евтектоїдний розпад з виділенням відносно крупних стабільних (Ti,Zr)<sub>3</sub>Si силіцидів спричиняє падіння твердості < 25 HRC. Під час гартування литих сплавів Ti-18Nb-4Zr-xSi за температур  $\geq 1100^\circ\text{C}$  формуються дисперсніші силіциди, через що твердість евтектоїдних сплавів збільшується до 38...39 HRC. Зміни параметрів  $\alpha''$ -фази свідчать про те, що під час гартування від 1200°C у результаті розчинення частини силіцидів кремній переходить у твердий розчин, при цьому також збільшується кількість крупних силіцидів на межах зерен і твердість загартованих сплавів знижується.

**Ключові слова:** біомедичні сплави Ti-Nb-Zr-Si, структура, силіциди, гартування, твердість.

Філоненко Н. Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Сафронова О. А. Вплив вмісту хімічних елементів та деформаційного і термічного оброблення на формування фазового складу колісних сталей.....42

Здійснено порівняльний аналіз фазового складу двох дослідних сталей: марки К та К+ (з додатковим комплексним легуванням алюмінієм, азотом та титаном) та відомої сталі марки 2 для залізничних коліс. Комплексне легування сталі алюмінієм, титаном та азотом призводить до утворення після кристалізації дрібнозернистішої структури зі збільшеною об'ємною часткою перліту. Показано, що за додаткового легування після кристалізації утворюються багаточагові включення, оксиди, нітриди та карбонітриди, які розташовані на межах зерен та в тілі зерна перліту. Гаряча пластична деформація дає змогу зменшити об'ємну частку та розміри оксидів. Відпуск призводить до того, що в структурі залишаються нітриди та карбонітриди титану. Використання комплексного легування сталі марки К+ та К спричиняє підвищення показників пластичності, міцності та твердості порівняно з властивостями сталі марки 2.

**Ключові слова:** колісна сталь, легування, мікроструктура, гаряче пластичне деформування, неметалеві включення.

Шеніда М. В., Кунтий О. І., Сухацький Ю. В., Головчук М. Я. Модифікація поруватого кремнію наночастинками паладію методом соногальванічного заміщення.....48

Наведено результати досліджень модифікації поруватого кремнію наночастинками паладію (PdNPs) соногальванічним заміщенням у флюоридовмісних диметилсульфоксидних розчинах. Встановлено, що впродовж гальванічного заміщення формуються сфероподібні наночастинки металу, рівномірно розподілені на поверхні пор. Виявлено, що з підвищенням тривалості процесу наночастинки паладію агломерують з утворенням тонкої плівки на поруватому кремнію.

**Ключові слова:** поруватий кремній, гальванічне заміщення, ультразвук.

Лавриць С. М., Погрелюк І. М. Залежність поверхневого зміцнення титанового сплаву VT22 від режиму азотування, суміщеного з термічним обробленням.....53

Досліджено вплив часової експозиції під час азотування, суміщеного зі зміцнювальним термічним обробленням (ЗТО), на поверхневе зміцнення двофазного титанового сплаву VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1,5Cr-1Fe). Встановлено, що з тривалістю експозиції на першій, другій чи на обидвох стадіях ЗТО на поверхні формується двофазний нітридний шар (Ti<sub>2</sub>N та TiN), а також одночасно зростають інтенсивність нітридоутворення, поверхнева мікротвердість та глибина зміцненого шару (до 8,5 GPa та 30  $\mu\text{m}$ , відповідно).

**Ключові слова:** двофазний титановий сплав, термічне оброблення, азотування, інженерія поверхні, поверхневе зміцнення.

Максимів О. В., Кирилів В. І., Чайковський Б. П., Білаш Ю. П., Кулик Ю. О.,  
Курнат І. М. Насичення наноструктурованого шару вуглецем  
за поверхневого механоімпульсного оброблення сталей.....59

Вивчено вплив режимів під час формування нанокристалічної структури механоімпульсною обробкою на її насичення вуглецем зі спеціального технологічного середовища. Показано, що зміцнювальний інструмент з титанового сплаву поліпшує умови насичення, а з прискоренням його подачі та зменшенням швидкості переміщення оброблюваної поверхні підвищується концентрація вуглецю у поверхневих шарах сталі. Вуглець розміщується здебільшого на межах зерен, що призводить до підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхневої наноструктури.

**Ключові слова:** *поверхнева наноструктура, режими оброблення, технологічне середовище, вуглець, мікротвердість, зносостійкість.*

Остап О. П., Чепіль Р. В., Аболіхіна О. В., Семенець О. І., Знова В. А.,  
Головатюк Ю. В. Вплив домішок заліза і кремнію на експлуатаційну  
деградацію сплавів систем Al–Cu–Mg і Al–Zn–Mg–Cu.....66

Досліджено мікро- і наноструктуру та фізико-механічні характеристики алюмінієвих сплавів Д16чТ, В95пчТ1 і В95пчТ2 (закордонних аналогів сплавів 2524-T3, 7475-T6 і 7475-T761, відповідно) у вихідному стані та після модельної деградації, яка імітує вплив їх довготривалої експлуатації. За отриманими характеристиками міцності  $\sigma_{YS}$  і  $\sigma_{UTS}$ , пластичності  $\delta$ , порога втоми  $\Delta K_{th}$ , циклічної в'язкості руйнування  $\Delta K_{fc}$  і питомої електропровідності  $\sigma$  встановлено, що за підвищення чистоти цих сплавів за домішками кремнію (до 0,08...0,18 wt.%) і заліза (до 0,2...0,23 wt.%) відсутня їх деградація за тривалої дії температурно-силових чинників, які імітують вплив експлуатаційних.

**Ключові слова:** *алюмінієві сплави, деградація, мікроструктура, фізико-механічні властивості.*

Звірко О. І., Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т., Волошин В. А., Венгринюк О. І.  
Експлуатаційна деградація конструкційних сталей  
за їх циклічного навантаження.....73

Проаналізовано особливості оцінювання експлуатаційної деградації конструкційних сталей в умовах їх циклічного навантаження. Взято до уваги двостадійність цього процесу, яка полягає у домінуванні спочатку деформаційного циклічного зміцнення з подальшим інтенсивним розвитком розсіяної в об'ємі металу мікропошкоженості. Розмежовано вплив експлуатаційного циклічного навантаження сталей на комплекс важливих для їх роботоздатності базових механічних властивостей та на широкий спектр характеристик втомної міцності. У першому випадку це характеристики опору крихкому руйнуванню, зокрема, ударна в'язкість та тріщиностійкість, у другому – втомному руйнуванню, визначені на гладких зразках та зразках з тріщинами. Розглянуто вплив корозивно-наводнювальних середовищ на інтенсивність експлуатаційної деградації сталей за їх циклічного навантаження.

**Ключові слова:** *сталь, експлуатаційна деградація, циклічне навантаження, механічні властивості, корозійно-втомний ріст тріщини, водневе розтріскування.*

Скальський В. Р., Макєєв В. Ф., Станкевич О. М., Гуньовський Я. Р.,  
Гуньовська Р. П., Кирманов О. С. Оцінювання стійкості  
до руйнування матеріалів базисів знімних протезів.....79

Оцінено міцність на розрив різних типів матеріалів базисів знімних протезів з використанням акустичної емісії (АЕ). Вивчено особливості руйнування полі-

мерів за дії навантаження розтягу. На основі енергетичного критерію ідентифікування типів руйнування за сигналами АЕ встановлено частку крихкого руйнування в кожному матеріалі. Показано вплив різних матеріалів для фінішної обробки на якість поверхні базисних полімерів. За аналізом результатів досліджень зроблено рекомендації щодо використання нових еластичних полімерів стоматологічного призначення.

**Ключові слова:** знімний протез, базисний полімер, міцність, акустична емісія, вейвлет-перетворення, обробка поверхні.

Адамчук М. П., Бородій М. В., Стрижало В. О., Ясковець З. С., Скакун С. А.

Циклічна повзучість труб за блочного навантаження внутрішнім тиском.....87

Експериментально досліджено особливості деформування прямолінійного сегмента трубопроводу Ду 200 зі сталі 20 за циклічного навантаження внутрішнім тиском. Випробування виконано на пневмогідролічному стенді за наближених до плоско-напруженого стану умов, з реєстрацією колових та осьових пружно-пластичних деформацій. Програмою досліджень передбачено блочне циклічне навантаження труби зі змінною амплітудою, але з постійним у циклі середнім напруженням. Отримано діаграми деформування, спричиненого циклічною повзучістю (ратчетингом) труби в коловому і осьовому напрямках після 100 cycles у кожному з трьох блоків навантаження. Встановлено, що зі збільшенням амплітуди навантаження (порівняно зі застосованим у попередньому блоці) посилюється ефект циклічної повзучості, а внаслідок повернення до нижчого рівня навантаження цей ефект нівелюється.

**Ключові слова:** циклічна повзучість (ратчетинг), деформування труб внутрішнім тиском, колові і осьові деформації, блочна схема циклічних навантажень.

Стацюк М. Г. Мікротріщина на продовженні ядра дислокації.....95

За розв'язком задачі теорії пружності для крайової дислокації з порожниною на її продовженні визначено напружено-деформований стан у твердому кристалічному тілі. Порожнину змодельовано мікротріщиною. Одержано співвідношення для розрахунку енергії тіла з такою мікротріщиною під тиском. Наведено геометричні параметри тріщиноподібної дислокаційної порожнини та довжини рівноважної й нерівноважної тріщини. Вказано критичний тиск, за якого стартує тріщина на продовженні дислокаційного дефекту. Також для такої тріщини розраховано коефіцієнти інтенсивності напружень.

**Ключові слова:** механіка руйнування, мікротріщина, внутрішній тиск, енергія деформування, поверхнева енергія, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Шахбазов Я. О., Широков В. В., Яцюк Р. А., Олянищен Т. В., Мельников О. В.

Оцінювання напружень під час правки шліфувального круга алмазним інструментом.....103

На основі моделювання напружень розглянуто технологічні умови забезпечення різальних властивостей шліфувальних кругів за чорнового і чистового шліфування під час їх правки алмазним інструментом методом точіння. Теоретично проаналізовано силову взаємодію кристала алмаза з абразивним зерном зі встановленням напружень у контактній системі абразивне зерно–кристал алмаза. Створено моделі еквівалентних напружень за теорією максимальних нормальних напружень. Розглянуто теоретичні аспекти моделювання напружень в ударній системі абразивне зерно–кристал алмаза із врахуванням контактної міцності матеріалу зерна.

**Ключові слова:** моделювання, шліфування, шліфувальний круг, кристал алмаза, правка круга, напруження.

<i>Корній С. А., Зінь І. М., Даниляк М.-О. М., Хлопик О. П., Дацко Б. М.</i> Інгібування корозії низьколегованої сталі композиційним пігментом на основі цеоліту та монокальцій фосфату.....	109
--	-----

Досліджено захисні властивості композиційного протикорозійного пігменту на основі синтетичного цеоліту та монокальцій фосфату, одержаного механохімічним синтезом, на поверхні низьколегованої вуглецевої сталі 09Г2С. Встановлено, що після механічного диспергування пігменту в кульовому млині впродовж 1 h за швидкості обертання помольного циліндра 200 грт зберігається кристалічна структура цеоліту з частковим утворенням у ньому аморфної фази. На основі рентгеноструктурних досліджень зроблено припущення, що під час синтезу фосфати інтеркалюють у нанопори цеоліту. Методами потенціодинамічної поляризації та імпедансної спектроскопії вивчено корозійну тривкість сталі у 0,1% розчині NaCl та у витяжках синтезованих цеолітів різного складу. Виявлено, що синтезований пігмент проявляє інгібувальну дію до корозії сталі, а його ефективність максимальна за масового співвідношення цеолітного та фосфатного компонентів 1:3. Методом електронної мікроскопії зафіксовано формування захисної плівки на поверхні сталі після витримки в інгібованих середовищах, морфологія та склад якої залежать від співвідношення компонентів пігменту і яка складається зі слаботорозчинних фосфатів кальцію та заліза.

**Ключові слова:** *корозія, сталь, протикорозійний пігмент, цеоліт, монокальцій фосфат, потенціодинамічна поляризація, електрохімічна імпедансна спектроскопія, сканівна електронна мікроскопія, рентгеноструктурні дослідження.*

<i>Лецак Р. Л., Бабій А. В., Барна Р. А., Бабій М. В., Гіряк Р. С., Сиротюк А. М.</i> Корозійна тривкість покриття каркаса штанги сільськогосподарського обприскувача.....	116
--	-----

Наведено результати імпедансних випробувань захисного покриття каркаса штанги сільськогосподарського обприскувача термопластичними порошковими фарбами в умовах виробництва, які підтверджують його високу якість та довговічність. Проте внаслідок механічних пошкоджень, проникнення рідких робочих середовищ чи хімічної деструкції в покритті можуть утворюватись наскрізні дефекти, через що доступ води, кисню та корозійно-активних йонів до металевої поверхні суттєво полегшується. У місці пошкодження розвиватиметься локальна корозія, а бар'єрні властивості покриття погіршуються.

**Ключові слова:** *порошкове покриття, рідкі робочі середовища, імпедансні випробування, ємність покриття, корозійна тривкість, штангові обприскувачі.*

<i>Стечишин М. С., Скиба М. Є., Стечишина Н. М., Мартинюк А. В.</i> Корозійно-механічне зношування азотованих сталей у кислих середовищах.....	121
--	-----

Наведено результати дослідження корозійно-механічного зношування (КМЗ) зміцнених азотуванням у безводневому середовищі і незміцнених сталей 20; 45; 40Х; 38Х2МЮА та сірого чавуну СЧ20 у кислому модельному середовищі. Побудовано залежності інтенсивності зношування, коефіцієнта тертя від тиску під час фрикційного контакту та швидкості ковзання. Отримано результати про зміну співвідношення корозійного і механічного чинників руйнування під час КМЗ залежно від цих параметрів. Результати випробувань пояснено у межах фізико-хімічної механіки матеріалів.

**Ключові слова:** *корозійно-механічне зношування, безводнє азотування в тліючому розряді, швидкість ковзання, тиск.*

**Зіновій Теодорович Назарчук (до 70-річчя від дня народження)..... 127**



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 58, № 2, 2022**

March – April

---

---

## CONTENTS

- Lobanov L. M., Pashchin, N. A., Mikhodui O. L., Shlonskyi P. S., Chopyk V. V., and Karlov O. M.* Increasing fatigue fracture resistance of welded joints by controlled synchronization of electrodynamic actions.....5

The use of modern welded transport structures made of aluminum – based alloys requires the development of promising methods for extending their life, one of which is electrodynamic treatment (EDT). EDT helps to increase the durability of welded joints by optimizing the stress-strain state in the area of the expected fatigue failure. The use of microprocessor control in two-channel EDT allows us to increase the processing efficiency due to the controlled synchronization of the components of electrodynamic actions in comparison with a single-channel EDT. During fatigue tests of experimental welded samples of AMg6 aluminum alloy for the amplitude values of the cycle  $2\sigma_a = 80...160$  MPa single-channel and two-channel EDT provide an increase in their durability  $N$ , respectively, in 2.0...2.4 and 2.2...2.7 times despite the fact that two-channel EDT was realized at three times lower energy costs in comparison with a single-channel one. The consequence of the exclusion of the pulsed current passage through the prototype in the two-channel EDT is a decrease of the parameter in  $N$  1.5 times compared to EDT with the passage of current, which is associated with the exclusion of the electropulse component, which intensifies the relaxation of residual welding stresses due to electroplasticity. The two-channel EDT of the weld and fusion line doubles the value of  $N$  compared to the treatment of the weld alone, which is due to the propagation of the compression stress zone on the fusion line, which provides a smaller range cyclic stresses compared to the resulting EDT weld.

**Keywords:** *electrodynamic treatment, electrode device, one- and two-channel circuit, residual welding stresses, aluminum alloy, durability, electric current pulse, cycle amplitude, eddy currents, electroplastic effect, plastic deformations, pulsed electromagnetic field.*

- Zhernosekov A. M., Fedorchuk V. Ye., Kysla H. P., Koval V. A., and Falchenko Iu. V.* The influence of welding current pulses shape on aluminum alloy joints properties.....12

The influence of the parameters of pulsed-arc power sources in fusible electrode welding on the specific features of formation of the structure and properties of welded joints of various aluminium alloys is studied. Comparative tests of selected power

sources were carried out and welded joints of aluminium alloys were produced using optimum welding modes. Metallographic investigations were performed and peculiarities of aluminium alloy softening in the heat-affected zone under the impact of welding arc heat were studied. Advantages of application of power sources with a controlled current shape for a weld formation, its structure and mechanical properties of welded joints, are shown.

**Keywords:** pulse-arc welding, fusible electrode, current pulse shape, aluminum alloys, welded joints, thermal impact zone, microstructure, hardness distribution, mechanical properties.

Syzonenko O. M., Tashev P., Torpakov A. S., Lypian Ye. V., Prystash M. S., Kandeva M., and Dyakova V. The influence of high-voltage electric discharge treatment of powders on the properties of metal-matrix Ti–TiC composites.....20

The impact of the regime of high voltage electric discharge treatment of the initial powder mixture in kerosene and ethanol on the structure, phase composition, hardness, microhardness, wear resistance and corrosion resistance of Ti–TiC metal matrix composites, consolidated using the method of spark plasma sintering, is investigated. It is shown, that the increase of specific treatment energy to 20 MJ/kg while using the “point–plane” type electrode system in the medium of kerosene or ethanol leads to the accumulation of free carbon, which causes negative impact on the process of spark plasma sintering as well as on the properties of obtained metal matrix composite.

**Keywords:** spark plasma sintering, metal matrix composite, high voltage electric discharge, nanocarbon, electric discharge dispersion, titanium, plasma, plasma technology.

Matviichuk O. O., Andreiev I. V., Hnatenko I. O., Ievdokymova O. V., Davydenko S. A., and Tsysar M. O. Technology of mesostructure formation in sintered WC–Co and WC–Ni hard alloys.....29

It is demonstrated for the first time that the mesostructural WC–Co or WC–Ni hard alloy can be obtained by ordinary liquid-phase sintering at temperatures from 1290°C to 1370°C and isothermal holding time of 10...20 min. The hardness of the alloys with a mesostructure with a decreasing cobalt content from 28 to 20 mass%, increases from 77.5 to 81 HRA, while the microhardness of mesoelements can change from 4.76 to 6.3 GPa. The mesostructural WC–Co alloys are effective in upsetting and stamping tool and mining tool where high wear and impact resistance and load variability are required, and WC–Ni are effective when used in heavy friction pairs.

**Keywords:** sintered WC–Co, WC–Ni hard alloys, tungsten carbide, granule, mesostructure, friction pairs.

Shevchenko O. M., Kulak L. D., Kuzmenko M. M., Kotko A. V., and Firstov S. O. The influence of silicon on the structure and hardness of biomedical Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys in as-cast state and after quenching.....33

The biomedical Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys with a silicon content of 0.5...1.5 wt.% were investigated. Quenching in water was carried out in the temperature range of 900...1200°C with a holding time of 5 min and 1 h. Heating the as-cast alloys to quench temperatures leads to the disintegration of non-equilibrium phases; the silicon content is distributed between phases in the solid solution and silicides. Since almost all silicon binds to zirconium and titanium in silicides, the hardness of Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys depends mainly on the quantity of silicides formed. The hardness of as-cast Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys is 26...28 HRC and reaches the maximum values for the eutectoid composition of 0.8...1.2 wt.% Si, where the largest separation of disperse silicides takes place. The increase of silicon content in the hypereutectoid alloys leads to an increase in silicide sizes, as well to the formation of a greater amount of  $\beta$ -phase in the as-cast Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys, and as a result, the hardness significantly decreases.

At low quenching temperatures of 900...1000°C the complete eutectoid decomposition with the formation of relatively large, stable (Ti,Zr)<sub>3</sub>Si silicides results in a reduction of hardness < 25 HRC. Quenching of the as-cast Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys at the temperatures ≥ 1100°C causes the formation of dispersed silicides, which increases the hardness to 38...39 HRC in the alloys of eutectoid composition. Changes in the α''-phase parameters indicate that as a result of dissolution of a part of silicides on quenching at 1200°C silicon passes into a solid solution, while large silicides further increase at the boundaries of grains, and so the hardness of the quenched Ti–18Nb–4Zr–xSi alloys decreases.

**Keywords:** *biomedical Ti–Nb–Zr–Si alloys, structure, silicides, quenching, hardness.*

*Filonenko N. Yu., Babachenko O. I., Kononenko H. A., and Safronova O. A.*

The influence of chemical elements content and deformation and thermal treatment on the formation of wheel steel phase composition .....42

The phase composition of two test steels: grades K and K+ (with additional complex alloying with aluminum, nitrogen and titanium) and known steel of grade 2 for railway wheels are compared. Complex alloying of steel with aluminum, titanium and nitrogen leads to the formation after crystallization of a structure that has a finer grain structure and an increased volume fraction of pearlite. It is shown that during additional alloying after crystallization the multilayer inclusions, oxides, nitrides and carbonitrides, which are located at the grain boundaries and in the body of the pearlite grain are formed. Hot plastic deformation reduces the volume fraction and oxides size. Tempering leads to the fact that titanium nitrides and carbonitrides remain in the structure. The use of complex alloying of steel grades K+ and K leads to increased plasticity, strength and hardness compared to the properties of the known grade 2 steel.

**Keywords:** *wheel steel, alloying, microstructure, hot plastic deformation, non-metallic inclusions.*

*Shepida M. V., Kuntiyi O. I., Sukhatskyi Yu. V., and Holovchuk M. Ya.*

Modification of porous silicon with palladium nanoparticles by sonogalvanic substitution method.....48

The results of studies of the modification of porous silicon by palladium nanoparticles (PdNPs) by sonogalvanic replacement in fluoride-containing dimethylsulfoxide solutions are presented. It is established that spherical nanoparticles of metal are formed during galvanic substitution, evenly distributed on the pore surface. It is shown that with increasing duration of the process of sonogalvanic replacement, palladium nanoparticles agglomerate with the formation of a thin film on porous silicon.

**Keywords:** *porous silicon, galvanic replacement, ultrasound.*

*Lavrys S. M. and Pohrelyuk I. M.* Dependence of surface hardening

of BT22 titanium alloy on nitriding regime combined with thermal treatment.....53

The effect of time exposure during nitriding combined with strengthening heat treatment (SHT) on the surface hardening of a two-phase BT22 titanium alloy (Ti–5Al–5Mo–5V–1.5Cr–1Fe) was studied. It was shown that with an increase of time exposure at the first, second or both stages of the SHT a two-phase nitride layer (Ti<sub>2</sub>N and TiN) was formed on the surface. Simultaneously at both STH stages, the intensity of nitride formation, the surface microhardness and the depth of the hardened layer (up to 8.5 GPa and 30 μm, respectively) also increased.

**Keywords:** *two-phase titanium alloy, heat treatment, nitriding, surface engineering, surface hardening.*

<i>Maksymiv O. V., Kyryliv V. I., Chaikovskiy B. P., Bilash Yu. P., Kulyk Yu. O., and Kurnat I. M. Saturation of nanostructured layer with carbon under surface mechanopulse treatment of steels.....</i>	<i>59</i>
---	-----------

The influence of the treatment regimes during formation of nanocrystalline structure by mechanical-pulse treatment on its saturation with carbon from special technological medium was studied. It was shown that strengthening tool made of titanium alloy improved saturating conditions, increment of tool longitudinal feed and decrease of the treated surface movement rate provided higher carbon concentration in the steel surface layer. It leads to the growth of microhardness and wear resistance of surface nanostructure.

**Keywords:** *surface nanostructure, treatment regime, technological medium, carbon, microhardness, wear resistance.*

<i>Ostash O. P., Chepil R. V., Abolikhina O. V., Semenets O. I., Znova V. A., and Holovatyuk Yu. V. The influence of iron and silicon impurities on operational degradation of Al–Cu–Mg and Al–Zn–Mg–Cu alloys.....</i>	<i>66</i>
---	-----------

The micro- and nanostructure and physicommechanical characteristics of Д16ЧТ, В95ПЧТ1 and В95ПЧТ2 aluminum alloys (the foreign analogues of 2524-T3, 7475-T6 and 7475-T761 alloys, respectively) in as-received state and after model degradation, which simulates the influence of long-term exploitation of these alloys, are investigated. It is established, based on the obtained characteristics of strength  $\sigma_{YS}$  and  $\sigma_{UTS}$ , ductility  $\delta_5$ , fatigue threshold  $\Delta K_{th}$ , cyclic fracture toughness  $\Delta K_{fc}$  and specific electrical conductivity  $\sigma$ , that with a decrease of the impurities content (silicon up to 0.08...0.18 wt.% and iron up to 0.2...0.23 wt.%) there is no their degradation under durable effect of temperature and force factors which simulate the operational factors.

**Keywords:** *aluminum alloys, degradation, microstructure, physical and mechanical properties.*

<i>Zvirko O. I., Nykyforchyn H. M., Tsyurulnyk O. T., Voloshyn V. A. and Venhryniuk O. I. Operational degradation of structural steels under their cyclic loading .....</i>	<i>73</i>
---	-----------

The features of assessing the operational degradation of structural steels under their cyclic loading are analyzed. The two-stage process of steel degradation is taken into account. It consists in the dominance of cyclic hardening at first with the subsequent intensive development of microdamages dissipated in the metal bulk. The influence of operational cyclic loading of steels on the complex of basic mechanical properties important for their serviceability and on a wide range of fatigue strength characteristics is distinguished. In the first case, these are the characteristics of resistance to brittle fracture, in particular, impact strength and fracture toughness, in the second one – fatigue resistance, determined using smooth specimens and specimens with cracks. The influence of corrosive environments on the intensity of operational degradation of steels under their cyclic loading is considered.

**Keywords:** *steel, operational degradation, cyclic loading, mechanical properties, corrosion-fatigue crack growth, hydrogen cracking.*

<i>Skalskiy V. R., Makeiev V. F., Stankevych O. M., Huniovskiy Ya. R., Huniovska R. P., and Kyrmanov O. S. Assessment of fracture resistance of the materials of the removable denture bases .....</i>	<i>79</i>
--	-----------

The tensile strength of different types of removable denture base materials was evaluated using the phenomenon of acoustic emission (AE). The peculiarities of materials fracture under the action of tensile loading have been studied. Based on the energy criterion for identification of fracture types by the AE signals, the proportion of brittle

fracture in each material is estimated. The influence of different materials for finishing on the surface quality of base polymers is shown. According to the analysis of research results, recommendations for the use of new elastic polymers in dental practice are given.

**Keywords:** *removable denture, denture base resins, strength, acoustic emission, wavelet transform, surface treatment.*

*Adamchuk M. P., Borodii M. V., Stryzhalo V. O., Yaskovets Z. S., and Skakun S. A.*

Cyclic creep of pipes under block loading by internal pressure.....87

Specific features of deformation of a straight segment of a ДУ 200 pipeline made of steel 20 under internal pressure cyclic loading have been experimentally investigated. The test was carried out on a pneumohydraulic stand under conditions close to the plane-stress state with registration of circumferential and axial elastic-plastic deformations. The investigation program provides a block cyclic load of a pipe with a varying amplitude, but with a constant average stress in the cycle. Strain diagrams are obtained due to cyclic creep (ratcheting) of the pipe in the circumferential and axial directions after 100 cycles in each of the three load blocks. It is shown that an increase in the load amplitude (compared to that applied in the previous block) enhances the effect of cyclic creep, and a return to the lower load level neutralizes this effect.

**Keywords:** *cyclic creep (ratcheting), deformation of pipes by internal pressure, circumferential and axial deformations, block diagram of cyclic loads.*

*Stashchuk M. H.* Microcrack at the extension of dislocation core.....95

The stress-strain state in a solid crystalline body is determined by solving the problem of the theory of elasticity for an edge dislocation with a cavity on its extension. The cavity is modeled by a microcrack. The relation for the calculation of the energy of a body with such a microcrack under pressure is obtained. The geometrical parameters of the crack-like dislocation cavity and the values of the equilibrium and nonequilibrium crack lengths are given. The critical pressure at which the crack starts at the continuation of the dislocation defect is indicated. Stress intensity coefficients are also calculated for such a crack.

**Keywords:** *fracture mechanics, microcrack, internal pressure, deformation energy, surface energy, stress intensity factor.*

*Shakhbazov Ya. O., Shyrovkov V. V., Yatsiuk R. A., Olyanyshen T. V., and Melnikov A. V.* Assessment of stresses during dressing

of a grinding wheel with a diamond tool.....103

Technological conditions for ensuring cutting properties of grinding wheels in the operations of rough and finishing grinding during their dressing with a diamond tool by turning based on the stress modeling, are considered. Theoretical analysis of the force interaction of a diamond crystal with an abrasive grain was carried out. Models of equivalent stresses values were created according to the theory of maximum normal stresses. Theoretical aspects were considered for stress modeling in the impact system of abrasive grain–diamond crystal taking into account the contact strength of grain material.

**Keywords:** *modeling, grinding, grinding wheel, diamond crystal, dressing of a wheel, stress.*

*Korniy S. A., Zin I. M., Danyliak M.-O. M., Khlopyk O. P., and Datsko B. M.*

Inhibition of low-alloy steel corrosion with a composite pigment based on zeolite and monocalcium phosphate.....109

The protective properties of composite anti-corrosion pigment based on synthetic zeolite and monocalcium phosphate obtained by mechanochemical synthesis on the

surface of low-alloy 09Г2С steel carbon was studied. It was shown that after mechanical dispersion of the pigment in a ball mill for 1 h at a rotation speed of the grinding cylinder 200 rpm, the crystal structure of zeolite was preserved with partial formation of an amorphous component. Based on X-ray diffraction studies, it was suggested that during synthesis phosphates are intercalated into nanopores of zeolite. The corrosion resistance of 09Г2С steel in 0.1% NaCl solution and in extracts of synthesized zeolites of different composition was investigated by the methods of potentiodynamic polarization and impedance spectroscopy. It was shown that the synthesized pigment had an inhibitory effect on the corrosion of this steel, and its anti-corrosion efficiency was maximum at a mass ratio of zeolite and phosphate components 1 to 3. The formation of a protective film on the steel surface after exposure in inhibited media was revealed by electron microscopy. The morphology and composition of the film depended on the ratio of its components and which consisted of insoluble phosphates of calcium and iron.

**Keywords:** *corrosion, steel, anti-corrosion pigment, zeolite, monocalcium phosphate, potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction studies.*

*Leshchak R. L., Babii A. V., Barna R. A., Babii M. V., Hiriak R. S., and Syrotyuk A. M. Corrosion resistance of the agricultural sprayer bar frame coating.....116*

The results of impedance tests of the agricultural sprayer bar frame protective coating by thermoplastic powder paints under production conditions, which confirm high quality and durability of the coating, are given. However, due to mechanical damages, penetration of liquid working environments or chemical fracture, the through defects can be formed in the coating. Thus, the access of water, oxygen and corrosive ions to the metal surface is significantly facilitated. At the place of damage local corrosion develops, and the coating barrier properties deteriorate.

**Keywords:** *powder coating, liquid working environments, impedance testing, coating capacity, corrosion resistance, boom sprayer.*

*Stechyshyn M. S., Skyba M. Ye., Stechyshyna N. M., and Martynyuk A. V. Corrosion-mechanical wear of nitrided steels in acidic environments.....121*

The results of the study of corrosion-mechanical wear (CMW) of reinforced by nitriding in hydrogen-free medium and softened steels 20; 45; 40X; 38X2MIOA and gray cast iron CЧ20 in an acidic model environment are presented. The dependences of wear intensity, friction coefficient on pressure during friction contact and sliding speed are constructed. The data on the change in the ratio of corrosion and mechanical failure factors in the process of CMW depending on the pressure and sliding speed are obtained. Test results are explained from the standpoint of physicochemical mechanics of materials.

**Keywords:** *corrosion-mechanical wear, hydrogen-free nitriding in a glow discharge, sliding speed, pressure.*

## JUBILEES

**Zinovii Teodorovych Nazarchuk (to the 70<sup>th</sup> birthday).....127**