

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, О. П. ОСТАШ, В. В. ПАНАСЮК, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТRENKO, В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. З. СТУДЕНТ, М. С. ХОМА, В. Ф. ЧЕКУРІН, О. Е. ЧИГИРИНЕЦЬ, В. М. ФЕДІРКО, С. О. ФІРСТОВ, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, П. В. ЯСНІЙ

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), Г. БОЛЗОН (Італія), М. ЕЛЬБОВДЖАІНІ (США–Канада), Е. ГДУТУС (Греція), В. КЕЙН (Індія), 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. DURIAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN', R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, 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, V. F. CHEKURIN, O. E. CHYHYRYNETS', V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRUL'NYK, P. V. YASNIY

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), G. BOLZON (Italy), M. ELBOUJDAINI (USA–Canada), E. GDOUTOS (Greece), V. KAIN (India), 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.pcm@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.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. Копчак, Г. М. Кулик*

Підписано до друку 20.04.2021. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 220421 від 22.04.2021. 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", 2021

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

ТОМ 57, № 2, 2021

березень – квітень

ЗМІСТ

Дацущин О. П., Рудавська І. А. Круговий диск з радіальною внутрішньою тріщиною під дією модельного контактного навантаження.....5

Розв'язано плоску задачу теорії пружності для кругового диска з довільно розташованою внутрішньою радіальною тріщиною під дією модельного контактного навантаження, яке враховує сили тертя проковзування між тілами кочення. Рівновагу диска підтримують зосереджені сили і момент, прикладені в його центрі. Задачу зведено до сингулярного інтегрального рівняння, яке розв'язано числово методом механічних квадратур. Визначено коефіцієнти інтенсивності напружень залежно від розташування тріщини та ділянки контакту на контурі диска, а також від сили тертя проковзування між тілами кочення. Результати узгоджуються з відомими в літературі.

Ключові слова: *круговий диск, радіальна тріщина, модельне контактне навантаження, тертя проковзування, коефіцієнти інтенсивності напружень.*

Андрейків О. Є., Долінська І. Я. Визначення періоду докритичного росту малих плоских тріщин високотемпературної повзучості в елементах конструкцій.....16

Сформульовано розрахункову модель (диференціальне рівняння з початковими і кінцевими умовами) для встановлення періоду докритичного росту малих плоских тріщин високотемпературної повзучості в елементах конструкцій. В її основі – перший закон термодинаміки, визначення енергетичних складових деформування зони передруйнування біля контуру тріщини через параметри її розкриття, наближене зведення процесу повзучості матеріалу до періоду усталеної повзучості. Запропоновано формули наближеного розрахунку розкриття зони передруйнування через коефіцієнт інтенсивності напружень і усереднене навантаження елемента конструкції. Під час розв'язку задачі застосовано узагальнений для деформаційних параметрів метод еквівалентних площ. На основі цього, а також відомих у літературі експериментальних даних для конкретних матеріалів знайдено період докритичного росту в півпросторі малої поверхневої півеліптичної тріщини високотемпературної повзучості за довготривалого статичного розтягу.

Ключові слова: *високотемпературна повзучість, розрахункові моделі, малі плоскі тріщини, період докритичного росту малих тріщин, перший закон термодинаміки, усереднене значення навантаження елемента конструкції, коефі-*

цієнт інтенсивності напружень, розкриття зони передруйнування біля контуру тріщини.

Саврук М. П., Кравець В. С., Чорненький А. Б. Оптимізація форм отворів у квазіортотропній пластині за двовісного розтягу.....24

На основі розв'язків плоских задач теорії пружності квазіортотропного тіла з криволінійним отвором побудовано аналітико-числовий алгоритм визначення оптимальної форми отвору (з мінімальною концентрацією напружень) для двовісного розтягу пластини. Прямі задачі теорії пружності для квазіортотропних пластин з гладкими отворами розв'язано методом сингулярних інтегральних рівнянь. Розв'язки обернених задач з невідомими формами отворів зведено до мінімізації багатопараметричного функціонала середньоквадратичних відхилень розтягувальних напружень вздовж контурів отворів від заданих їх значень. Знайдено форми оптимальних отворів у квазіортотропній пластині за різних розтягувальних напружень на нескінченності у напрямках осей ортотропії.

Ключові слова: *квазіортотропний матеріал, плоский напружений стан, оптимальні отвори, концентрації напружень, сингулярні інтегральні рівняння.*

Середницька Х. І., Мартиняк Р. М. Контакт берегів міжфазної теплоізолюваної щілини за термомеханічного навантаження.....32

Досліджено термопружну поведінку різномірного біматеріалу з міжфазною щілиною, береги якої контактують по краях під дією стискальних зусиль і однорідного теплового потоку. Задачу термопружності зведено до системи сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь для стрибків температури та переміщень на її берегах. Систему цих рівнянь розв'язано для термоізолюваної щілини. Проаналізовано зміну ділянки контакту берегів щілини у біматеріалі з нержавної сталі і сплаву нікелю. Визначено розподіл контактного тиску берегів щілини, залежність висоти щілини і довжини ділянки контакту її берегів від стискальних зусиль і теплового потоку.

Ключові слова: *міжфазна щілина, різномісний біматеріал, контакт берегів, термомеханічне навантаження.*

Бліхарський Я. З. Моделювання напружено-деформованого стану термозміцненої арматури та її зварного з'єднання за мікротвердістю.....38

Досліджено зміну фізико-механічних характеристик термозміцненої арматури методом вальцювання з розділенням. Встановлено значення істинних напружень та деформацій для різних зон арматури. Досліджено зміну мікротвердості в поперечному перерізі термозміцненої арматури та зварного з'єднання. Показано, що зварювання змінює структуру термозміцненого шару та послаблює механічні характеристики в локальному об'ємі. Побудовано істинні діаграми руйнування для різних зон термозміцненої арматури. Показано кореляцію між мікротвердістю та напруженнями плинності для середньої зони.

Ключові слова: *термозміцнена арматура, мікротвердість за Вікерсом, зварне з'єднання, напруження плинності, істинна деформація, істинні напруження, метод цифрових кореляцій зображень.*

Скальський В. Р., Станкевич О. М., Кухта В. С., Клим Б. П., Кирманов О. С. Особливості руйнування стоматологічних полімерних композитів за дії локального навантаження.....42

Порівняно клініко-технологічні та фізико-механічні властивості гібридних композитів світлової полімеризації вітчизняного та імпортного виробництва. Досліджено особливості руйнування матеріалів за дії локального навантаження мето-

дом Герца з використанням акустичної емісії (АЕ). Полімери ранжували за ступенем водопоглинання та навантаженням руйнування. На основі енергетичного критерію ідентифікування типів руйнування за сигналами АЕ оцінено частку крихкого руйнування в кожному матеріалі. За комплексним аналізом результатів досліджень рекомендовано ефективні у стоматологічній практиці композити.

Ключові слова: *стоматологічні композити, гібридні композити, метод Герца, акустична емісія, вейвлет-перетворення.*

*Лавриненко О. М., Загорний М. М., Тищенко Н. І., Корнієнко О. А.,
Євтушенко А. І. Синтез та властивості нанокompозитів на основі
оксидів феруму і титану, модифікованих аргентумом.....51*

Методами ротаційно-корозійного диспергування та хімічного осадження отримано структури нанорозмірних композитів на основі оксидів феруму і титану, що модифіковані аргентумом і аурумом. Виявлено, що морфологія частинок композита залежить від природи оксиду, а елементний склад – від вихідних концентрацій благородних металів. Спектральними методами дослідження (ІЧ, РФА, ЕДС) встановлено наявність срібла, золота в інтервалі концентрацій 0,5...10 mg/dm³ як на поверхні, так і в решітці оксидів TiO₂, Fe₃O₄, що сприяло ефективним електронним переходам під час утворення бар'єра Шотткі.

Ключові слова: *нанокompозити на основі оксидів феруму і титану, модифікація частинок оксидів аргентумом і аурумом, фізико-хімічна характеристика нанокompозитів.*

*Барановська О. В., Биков О. І., Баглюк Г. А., Кирилюк С. Ф. Вплив
механічної активації шихти на структуру та фазовий склад спечених
багатокомпонентних композитів на основі титану.....57*

Наведено результати досліджень особливостей фазо- та структуроутворення після механоактивації із порошкової шихти композита TiH₂-FeSiMn-B₄C за термічного синтезу. Механоактивували в планетарному млині в спирті 5; 9; 12 та 18 min. Для порівняння впливу механоактивації на фазо- та структуроутворення таку ж саму суміш розмелювали у кульовому млині типу "п'яна бочка". Термічний синтез виконували у вакуумі двома послідовними стадіями: нагрівання до 600°C і до 1250°C. Встановили, що основними фазами після низькоенергетичного розмелювання в кульовому млині є карбід титану TiC та силіцидні фази Ti₅Si₃ та Ti₅Si₄. Виявили, що під час механоактивації суміші зменшується вміст карбиду титану і з'являється боридна фаза TiB, яка стає основною. Збільшувати час розмелювання під час подрібнення порошкової шихти більше 12 min недоцільно, оскільки це призводить до підвищеного вмісту кисневих сполук. Механоактивація також впливає і на усадку матеріалу.

Ключові слова: *механоактивація, гідрид титану, карбід титану, борид титану, рентгенофазовий аналіз, усадка.*

*Сизоненко О. М., Присташ М. С., Тафтай Е. І., Торпаков А. С., Липян Є. В.
Моделювання електророзрядних процесів під час оброблення титану
у вуглеводневій рідині.....64*

Фізично змодельовано електророзрядні процеси в шарі порошку Ti у гасі та етиловому спирті. Проаналізовано залежності розподілу плазмових утворень в об'ємі розрядної камери зі збільшенням кількості розрядів. Підтверджено можливість синтезу частинок субмікронного та ультрадисперсного діапазону за висковольтного електророзрядного оброблення порошку титану у вуглеводневій рідині (спирт або гас) внаслідок електротеплового впливу плазми розрядів на частинки порошку.

Ключові слова: *гас, спирт етиловий, електричний розряд, нановуглець, електророзрядне диспергування, титан, плазма, плазмові технології.*

*Осташ О. П., Пріхна Т. О., Подгурська В. Я., Купрін О. С., Карпець М. В.,
Свердун В. Б., Василів Б. Д., Сербенюк Т. Б.* Легкі інтерконекти
для середньотемпературних (550...650°C) твердооксидних
паливних комірок.....70

Досліджено жаростійкість і електропровідність зразків зі сталі Crofer 22 APU, яку традиційно використовують для виготовлення інтерконектів твердооксидних паливних комірок (ТОПК), та композита на основі MAX фази Ti_2AlC , а також вакуумно-дугового покриття системи $Ti-Al-C$, нанесеного на тонкий (0,5 mm) лист титану марки VT1-0, у вихідному стані та після тривалої (1000 h) витримки у повітрі при 600°C. Вивчено еволюцію фазового складу композита і покриття за тривалої експозиції в окиснювальному середовищі і пов'язану з нею зміну їх жаростійкості й електропровідності. Констатовано, що тонкі (0,5 mm) титанові інтерконекти з таким покриттям є ефективною альтернативою виготовленим зі сталі типу Crofer, що дає можливість уникнути негативного впливу хрому на роботоздатність ТОПК і суттєво (~ 50%) знизити вагу їх батарей.

Ключові слова: *Ti-Al-C матеріали, вакуумно-дугове покриття, фазовий склад, жаростійкість, електропровідність.*

Юсубов Ф. Ф., Гурей І. В. Вплив температури на трибологічні властивості
композитів для гальмівних колодок.....76

Вивчено трибологічні властивості композиційних матеріалів гальмівних колодок, які експлуатують у важких умовах. Досліджено матеріал, який складається з фенолформальдегіду, бариту, оксиду алюмінію, синтетичного воластоніту, свинцю, олова, міді, графіту, оксиду кремнію і невеликої кількості оксиду магнію та дисульфиду молібдену. Показано, що найкращими фрикційними властивостями за коефіцієнтом тертя і термічною стабільністю володіє матеріал з вмістом 25 mass% фенолформальдегіду.

Ключові слова: *гальмівні колодки, порошкова металургія, композити, температура, коефіцієнт тертя, зношування, деградація.*

Кречковська Г. В. Структурно-фрактографічні особливості тривало
експлуатованих конструкційних сталей.....82

Проаналізовано металографічні та фрактографічні особливості конструкційних сталей, тривало експлуатованих у кліматичних умовах (коливання температури, пориви вітру, кислотні дощі тощо). Встановлено, що спільною структурною ознакою деградації вуглецевих сталей є неметалеві включення, що втратили зв'язок з матрицею під час тривалої експлуатації, а фрактографічною – елементи окрихчення у вигляді кризьзерних відколів та розшарувань, виявлені на зламах ударних зразків. Встановлено, що фрактографічний показник (площа елементів окрихчення) виявився чутливішим до деградації сталей. Адже руйнування, як правило, відбувається по траєкторії найнижчого опору з максимальною густиною елементів окрихчення, а шліф для металографічних досліджень перетинає зразок уздовж довільно обраної площини, на якій густина неметалевих включень не обов'язково максимальна.

Ключові слова: *конструкційні сталі, структура, фрактографія, експлуатаційна деградація, пошкодженість.*

Груш В. С., Федірко В. М., Воєводін В. М., Лук'яненко О. Г., Стоєв П. І.,
Панов В. А. Вплив функціонального шару на експлуатаційні
властивості сплаву Zr-1% Nb за температури 380°C.....87

Вивчено вплив термічної обробки ТВЕЛЬних трубок у різних газових середовищах на короточасну та тривалу міцність за температури експлуатації (380°C). Хіміко-термічна обробка (ХТО) в азотовмісному середовищі підвищує короточасну міцність зразків-кілець на ~ 30 МПа за випробувань на повітрі при 380°C, а у кисневмісних середовищах дещо знижує (~ на 15 МПа). Найвищу тривалу міцність на базі 100 h показали зразки-кілець після ХТО в азоті. ХТО у кисневмісних середовищах забезпечує довготривалу міцність на рівні стандартної термічної обробки ТВЕЛЬних трубок з цирконієвого сплаву Zr-1% Nb. Показано характер руйнування зразків-кілець з цирконієвого сплаву Zr-1% Nb залежно від середовища та режиму термічної обробки.

Ключові слова: цирконієвий сплав, хіміко-термічна обробка, кисень-азотовмісне середовище, приповерхневий шар, механічні властивості.

Студент М. М., Погрелюк І. М., Гвоздецький В. М., Веселівська Г. Г.,
Задорожна Х. Р., Мардаревич Р. С., Дзьоба Ю. В. Вплив складу
електроліту для твердого анодування алюмінію на характеристики
оксидного шару.....92

Тверде анодування виконано за температури -4...0°C упродовж 60 min. Як базовий електроліт використано 20%-й водний розчин H₂SO₄. Під час анодування густина струму становила 5 A/dm². Щоб з'ясувати вплив сильних окиснювачів на характеристики анодних шарів (оксидних), в електроліт додавали 30; 50; 70 та 100 g/l перекису водню (H₂O₂). В деяких випадках його продували озono-повітряною сумішшю з розрахунку 5 mg·min/l озону. Встановлено, що оксидний шар (Al₂O₃·H₂O) під час твердого анодування на алюмінієвих сплавах формують не лише йони кисню, які утворюються внаслідок розкладу води, а також його нейтральні атоми, які формуються через розкладання перекису водню та озону. Виявлено, що перекис водню, а також продування електроліту збільшують товщину та мікротвердість анодного шару на 50% внаслідок зниження вдвічі кількості молекул води в оксиді алюмінію. Перекис водню та озон, очевидно, зменшують і товщину бар'єрного шару покриття, крізь який проникають йони кисню та алюмінію, які, з'єднуючись, формують оксидний шар. Встановлено, що максимальної мікротвердості анодного шару можна досягнути термічним обробленням – нагріванням анодованих зразків до 300°C.

Ключові слова: тверде анодування, алюміній, базовий електроліт – 20%-й водний розчин H₂SO₄, озono-повітряна суміш, перекис водню, оксидний та бар'єрний шари, пори, мікротвердість.

Штефан В. В., Кануннікова Н. О., Гончаренко Т. Є. Аналіз структури
та протикорозійних властивостей оксидних покриттів
на сталі AISI 304.....99

Методом імпедансної спектроскопії досліджено електричну провідність та дефектність на нержавній сталі покриттів, одержаних електрохімічним оксидуванням. Проаналізовано морфологію та рентгенофазовий склад оксидних покриттів, сформованих у Mo-, Al-, Ti-вмісних електролітах. Встановлено, що з додаванням до них оксидів вентильних металів швидкість корозії оксидованої сталі у хлоридних середовищах зменшується. Результати імпедансної спектроскопії корелюють з даними корозійних випробувань.

Ключові слова: *нержавна сталь, морфологія, молібден, алюміній, титан, оксидне покриття, поляризаційний опір, імпеданс.*

Білий Л. М., Посувайло В. М., Івашків В. Р., Ковальчук І. В. Корозійні властивості оксидокерамічних покриттів на основі сплавів систем Al–Cu–Mg та Al–Mg.....106

Методами електрохімічної імпедансної спектроскопії та потенціодинамічними оцінено корозійну тривкість оксидокерамічних покриттів, отриманих на сплавах систем Al–Cu–Mg та Al–Mg під час барботування озоном. Одержані результати порівняно з відомими для матеріалів, виготовлених за стандартною методикою. Ємність всіх оксидокерамічних покриттів через 90 days стабілізується і становить 1...4 pF/cm². Їх корозійна тривкість на сплаві Д16 вдвічі вища, ніж на сплаві АМг5. Усі покриття володіють поліпшеними захисними властивостями, а їх опір у 3%-му водному розчині натрію хлориду становить 1...4 GΩ·cm².

Ключові слова: *корозія, плазмо-електролітне оксидування, оксиди алюмінію, оксидокерамічні покриття, рентгеноструктурний аналіз, сплав.*

Flamini D., Tuckart W. R., Prieto G. Вплив кріогенного оброблення на електрохімічні властивості мартенситних нержавних сталей.....113

Кріогенне оброблення використовують для підвищення механічних і трибологічних характеристик багатьох матеріалів, зокрема сталей. Однак його вплив на корозійну тривкість мартенситних нержавних сталей вивчено недостатньо. Більше уваги приділяли мартенситним нержавним сталям AISI 420 та AISI 440. Їх мікроструктуру проаналізовано з допомогою сканівної електронної мікроскопії та методу рентгенівської спектроскопії. Електрохімічні властивості вивчено за вільного потенціалу корозії та циклічної анодної потенціодинамічної поляризації. Виявлено, що кріогенне оброблення не змінює тривкості до пітингоутворення сталі AISI 420, але значно знижує здатність до пасивації сталі AISI 440.

Ключові слова: *кріогенне оброблення, електрохімічна корозія, карбіди, залишковий аустеніт.*

Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Лецак Р. Л. Особливості електрохімічного наводнювання низьколегованої сталі трубопроводу у модельному розчині ґрунтової води.....124

Досліджено особливості адсорбції електрохімічного дифузійно-рухливого водню на поверхні низьколегованої феритно-перлітної трубної сталі, а також його абсорбції об'ємом матеріалу залежно від часу та фізико-хімічних умов наводнювання у модельному розчині ґрунтової води. Встановлено залежність об'ємної концентрації водню у матеріалі від тривалості наводнювання та запропоновано аналітичну залежність для прогнозних оцінок.

Ключові слова: *низьколегована сталь, водневовмісне середовище, наводнюваність металу, концентрація водню.*

Корній С. А., Зінь І. М., Хлопик О. П., Тимусь М. Б., Головчук М. Я. Вплив фосфатно-нітратної композиції на корозію механічно активованої поверхні алюмінієвого сплаву.....131

Досліджено захисні властивості фосфатно-нітратної інгібіторної композиції на алюмінієвому сплаві у синтетичному кислому дощі. Композиція має високу протикорозійну ефективність, забезпечуючи за умов відсутності механічного навантаження ступінь захисту металу 96%. Під час механічної активації на поверхні алюмінієвого сплаву в інгібованому корозивному розчині формується захисна плівка з підвищеними захисними властивостями. Композиція є перс-

пективною для захисту від трибокорозійного руйнування конструкцій з алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: *алюмінієвий сплав, трибокорозія, інгібіторна композиція, фосфат, нітрат.*

Нарівський О. Е., Беліков С. Б., Субботін С. О., Пуліна Т. В. Вплив хлоридовмісного середовища на пітинготривкість сталі AISI 321.....138

Розроблено математичні моделі, які описують залежності критичних температур пітингування сталі AISI 321 в модельних оборотних водах з рН 4...8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 mg/l від хімічного складу та структури. Вони ґрунтуються на багатомірних лінійних регресіях першого порядку та на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу. Застосовуючи розроблені математичні моделі, встановили, що критичні температури пітингування сталі AISI 321 ростуть зі збільшенням рН оборотної води, середньої відстані між оксидами в сталі, вмісту в ній марганцю і хрому та зменшенням середнього діаметра зерна аустеніту та вмісту хлоридів у середовищі. Водночас виявлено, що вплив середовища найсуттєвіший, але гетерогенність сталі, яка залежить від вмісту в ній Cr, Si, Mn і N, також сильно впливає на її пітинготривкість. Запропоновано розроблені математичні моделі застосовувати для вибору оптимальних плавок сталі AISI 321, найтривкіших до пітингування в модельних оборотних водах.

Ключові слова: *пітинготривкість, теплообмінник, оборотна вода, структурна гетерогенність, хімічний склад, прогнозування пітинготривкості.*

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

H. V. KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE

PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

International Scientific-Technical Journal

Founded in January 1965

Published bimonthly

VOLUME 57, № 2, 2021

March – April

CONTENTS

- Datsyshyn O. P. and Rudavska I. A.* A circular disk with a radial internal crack under the action of model contact loading.....5

The plane problem of elasticity theory for a circular disk with an arbitrarily located internal radial crack under model contact load that considers the forces of sliding friction between rolling bodies is solved. Equilibrium of the disk is supported by concentrated forces and a moment applied to the disk center. The problem is reduced to a singular integral equation which is solved numerically by the method of mechanical quadratures. The stress intensity factors are determined depending on the crack location and the contact zone on the disk contour as well as on the force of sliding friction between rolling bodies. The results agree well with known in the literature.

Keywords: *circular disk, radial crack, model contact load, sliding friction, stress intensity factors.*

- Andreikiv O. Ye. and Dolinska I. Ya.* Determination of the period of subcritical growth of small plane cracks of high-temperature creep in structural elements.....16

A calculation model (differential equation with initial and final conditions) for determining the period of subcritical growth of small high-temperature creep plane cracks in the elements of a construction is formulated. The model is based on the first law of thermodynamics, determination of energy components of deformation of the pre-fracture zone near the crack contour through the parameters of its opening, approximation of the creep process of the material to the period of steady creep. In this case, the formulas for the approximate determination of the opening of the pre-fracture zone through the stress intensity factor and the average value of the load of the structural element are proposed. The method of equivalent areas generalized for deformation parameters is used for the approximate solution of the problem. Based on this, as well as on experimental data known in the literature for specific materials, the period of subcritical growth in the half-space of a small surface half-elliptic crack of high-temperature creep at and long-term static tension is determined.

Keywords: *high-temperature creep, calculation models, small plane cracks, period of subcritical growth of small cracks, first law of thermodynamics, average value of structural element loading, stress intensity factor, opening of pre-fracture zone near crack contour.*

<i>Savruk M. P., Kravets V. S., and Chornenkyi A. B.</i> Optimization of the hole shapes in a quasi-orthotropic plate under biaxial tension.....	24
--	----

Based on the solutions of the plane problems of the theory of elasticity for a quasi-orthotropic body with a curvilinear hole, an analytical-numerical algorithm for determining the optimal shape of the hole (with a minimum stress concentration) for biaxial plate tension is constructed. The direct problems of the theory of elasticity for quasi-orthotropic plates with smooth holes are solved by the method of singular integral equations. The solutions of the inverse problems with unknown shapes of the holes are reduced to minimizing the multiparametric functional of the standard deviations of tensile stresses along the contours of the holes from their given values. The shapes of optimal holes in a quasi-orthotropic plate for different tensile stresses at infinity in the directions of orthotropy axes are found.

Keywords: *quasi-orthotropic material, plane stress state, optimal holes, stress concentration, singular integral equations.*

<i>Serednytska Kh. I. and Martynyak R. M.</i> Contact of the faces of an interface thermally insulated crack under thermomechanical loading.....	32
--	----

The thermoelastic behavior of heterogeneous bimaterial with an interface crack, the edges of which are in contact under the action of compressive forces and homogeneous heat flow, is investigated. The problem of thermoelasticity is reduced to a system of singular integro-differential equations for temperature jumps and displacements on the cracks faces. The system of singular integro-differential equations is solved for the case of a thermally insulated crack. The change of the contact zone of crack faces is analyzed for the bi-material consisting of a stainless steel and a nickel alloy. The dependence of the crack height and the length of the contact zone of crack faces on the compressive force and the heat flow is determined.

Keywords: *interphase gap, heterogeneous bimaterial, contact of faces, thermomechanical loading.*

<i>Blikharskyy Ya. Z.</i> Modelling of the stress-strain state of heat-strengthened reinforcement and a welded joint by microhardness.....	38
--	----

The change of physical and mechanical characteristics of thermally strengthened rebar by the method of rolling with separation is investigated. The values of true stresses and strains for different rebar zones are established. The change in microhardness in the cross-section of the thermally strengthened rebar and a welded joint is investigated. It is shown that welding changes the structure of the thermally-strengthened layer and weakens the mechanical characteristics in the local volume. True failure diagrams are constructed for different zones of thermally-strengthened rebars. The correlation between microhardness and yield strengths for the middle zone is shown.

Keywords: *thermally-strengthened rebar, microhardness according to Vickers method, welded joint, yield strength, true strain, true stresses, digital image correlation method.*

<i>Skalskyi V. R., Stankevych O. M., Kukhta V. S., Klym B. P., and Kyrmanov O. S.</i> Features of dental polymer composites fracture under the action of local loading.....	42
---	----

The clinical-technological and physicommechanical properties of hybrid composites of light polymerization of domestic and imported production are compared. The peculiarities of materials fracture under the action of local loading by the Hertzian indentation test using the phenomenon of acoustic emission (AE) are studied. Polymers are ranked according to the degree of water absorption and fracture load. Based on the

energy criterion for fracture types identification by the AE signals, the share of brittle fracture in each material is estimated. According to the complex analysis of research results, the composites that are effectively used in dental practice are recommended.

Keywords: *dental composites, hybrid composites, Hertzian indentation test, acoustic emission, wavelet transform.*

- Lavrynenko O. M., Zahornyi M. M., Tyschenko N. I., Kornienko O. A.,
and Ievtushenko A. I. Synthesis and properties of nanocomposites
based on iron and titanium oxides modified by silver.....51

The structures of nanosized composites based on iron and titanium oxides, modified with silver and gold are obtained by the methods of rotational-corrosion dispersion and chemical deposition. It is shown that the morphology of composite particles is determined by the nature of the oxide, and the elemental composition is determined by the initial concentrations of noble metals. Spectral methods of research (IR, X-ray diffraction, EDS) prove the presence of silver, gold ($0.5...10 \text{ mg/dm}^3$) on the surface and in the lattice of TiO_2 , Fe_3O_4 , which promote effective electronic transitions during the formation of the Schottky barrier.

Keywords: *nanocomposites based on iron and titanium oxides, modification of oxide particles by argentum and aurum, physicochemical characteristics of nanocomposites.*

- Baranovska O. V., Bykov O. I., Bagliuk G. A., and Kyryliuk S. F. The influence
of mechanical activation modes of charge on the structure and phase
composition of sintered multi-component titanium-based composites.....57

The results of investigation of the formation of phases and structure after mechanical activation of powder mixture $\text{TiH}_2\text{-FeSiMn-B}_4\text{C}$ produced by thermal synthesis are presented. Mechanical activation is performed in a planetary mill in alcohol for 5; 9; 12 and 18 min. To compare the effect of mechanical activation on phase and structure formation, the same mixture is ground in a ball mill type "drunken barrel". The alloys are thermally synthesized in vacuum in two successive stages: heating to 600°C and further heating to 1250°C . It is established that titanium carbide TiC and silicide Ti_5Si_3 and Ti_3Si_4 phases are the major phase in the alloy after low-energy grinding. It is found that during activation the titanium carbide content decreases and a TiB boride phase appears in the alloy, which is a main one. An increase in the grinding time during mechanical activation of powder mixture more than 12 min leads to an increased content of oxygen compounds, which is inappropriate. It is shown that mechanical activation also affects the shrinkage of the material.

Keywords: *mechanical activation, titanium hydride, titanium carbide, titanium boride, X-ray diffraction analysis, shrinkage.*

- Sizonenko O. M., Prystash M. S., Taftai E. I., Torpakov A. S., and Lypian Ye. V.
Modelling of electric discharge processes under titanium treatment
in hydrocarbon liquid64

Physical modeling of electric discharge processes in a Ti powder layer in kerosene and alcohol is carried out. Dependences of the distribution of plasma formations in the volume of the discharge chamber with the increase of a number of discharges are analyzed. The possibility to synthesize the particles of submicron and ultradispersive range under high-voltage electric-spark treatment of titanium powder in hydrocarbon liquid (alcohol or kerosene) due to electric heat influence of the discharge plasma on powder particles is proposed.

Keywords: *kerosene, ethylene alcohol, electric discharge, electric discharge dispersion, titanium, plasma, plasma technology.*

- Ostash O. P., Prikhna T. O., Podhurska V. Ya., Kuprin O. S., Karpets M. V., Sverdun V. B., Vasylyv B. D., and Serbenyuk T. B.* Light interconnects for medium-temperature (550...650°C) solid oxide fuel cells.....70

The oxidation resistance and electrical conductivity of Crofer 22 APU steel traditionally used for the production of solid oxide fuel cell (SOFC) interconnects, and a bulk composite based on MAX phase Ti_2AlC , and Ti–Al–C vacuum arc-plasma coating on a thin (0.5 mm) BT1-0 titanium sheet in the initial state and after a long-term (1000 h) exposure in air at 600°C have been studied. The evolution of the phase composition of the composite and Ti–Al–C coating under long-term exposure in an oxidizing environment and related with it oxidation resistance and electrical conductivity has been studied. It is stated that thin (0.5 mm) titanium interconnects with Ti–Al–C coating are an effective alternative to those made of Crofer steel, which allows us to avoid the negative chromium effect on the SOFC efficiency and also significantly (by ~ 50%) reduce the weight of the SOFC batteries.

Keywords: *Ti–Al–C materials, vacuum arc-plasma coating, phase composition, oxidation resistance, electrical conductivity.*

- Yusubov F. F. and Hurey I. V.* The influence of temperature on the tribological properties of composites for brake pads.....76

The tribological properties of composite materials of brake pads, which operate in complicated conditions, are studied. Materials consisting of phenol-formaldehyde, barite, alumina, synthetic wollastonite, lead, tin, copper, graphite, silicon oxide and a small amount of magnesium oxide and molybdenum disulfide are investigated. In this research, only the amount of phenol-formaldehyde has been changed. It is shown that the material, containing 25 mass% of phenol-formaldehyde has the best frictional properties in terms of friction coefficient and thermal stability.

Keywords: *brake pads, powder metallurgy, composites, temperature, coefficient of friction, wear, degradation.*

- Krechkovska H. V.* Structural-fractographic peculiarities of long-term operated structural steels.....82

Metallographic and fractographic features of structural steels, after long-term operation in climatic conditions (temperature fluctuations, gusts of wind, acid rain, etc.) are analyzed. It is established that a common structural feature of carbon steel degradation is non-metallic inclusions that lost cohesion with the matrix during long-term operation and a fractographic feature are elements of embrittlement in the form the delaminations and transgranular cleavages on the fracture surfaces of the specimens under impact. The fractographic indicator (area of embrittlement elements) is found to be more sensitive to the operational degradation of steels, because fracture usually occurs along a path of the lowest resistance with a maximum density of embrittlement elements, and a surface for metallographic studies intersects the sample along an arbitrarily chosen plane, on which the density of non-metallic inclusions is not necessarily maximum.

Keywords: *structural steels, structure, fractography, operational degradation, damage.*

- Trush V. S., Fedirko V. M., Voyevodin V. M., Lukyanenko A. G., Stoev P. I., and Panov V. A.* The influence of the functional layer on the performance characteristics of Zr–1% Nb alloy at temperature 380°C.....87

The influence of heat treatment of fuel cladding tubes in various gas media on short-term and long-term strength at operating temperature (380°C) is studied. Thermochemical treatment in nitrogen-containing media increases the short-term strength of the

ring-like specimens by ~ 30 MPa in tests in air at 380°C, while in oxygen-containing media slightly reduces it (~ 15 MPa). The highest long-term strength on the basis of 100 h is shown by ring-like specimens after thermochemical treatment in nitrogen. Thermochemical treatment in oxygen-containing environments provides long-term strength at the level of standard heat treatment of fuel tubes made of Zr–1% Nb zirconium alloy. The nature of fracture ring-like specimens made of Zr–1% Nb zirconium alloy, depending on the environment and the regime of heat treatment, is shown.

Keywords: *zirconium alloy, thermochemical treatment, oxygen-nitrogen-containing media, near-surface layer, mechanical properties.*

Student M. M., Pohrelyuk I. M., Hvozdetzkyi V. M., Veselivska H. H., Zadorozhna Kh. R., Mardarevych R. S., and Dzioba Yu. V. The influence of electrolyte composition for hard anodizing of aluminium on oxide layer characteristics.....92

Hard anodizing was performed at a temperature of –4...0°C for 60 min. A 20% aqueous solution of H₂SO₄ was used as the base electrolyte. During anodizing, the current density was 5 A/dm². To determine the effect of strong oxidants on the characteristics of the anode layers (oxide), 30; 50; 70 and 100 g/l of hydrogen peroxide (H₂O₂) were added to the electrolyte. In some cases, it was blown off with an ozone-air mixture at a rate of 5 mg-min/l of ozone. It was found that the oxide layer (Al₂O₃·H₂O) during hard anodizing on aluminium alloys formed not only the oxygen ions, as a result of the water decomposition, but also neutral oxygen atoms, formed because of the decomposition of hydrogen peroxide and ozone. It was found that hydrogen peroxide, as well as blowing off the electrolyte with an air-ozone mixture increased the thickness and microhardness of the anodized layer by 50% due to the two-fold reduction of the number of water molecules in aluminium. Hydrogen peroxide and ozone apparently also reduce the thickness of the barrier layer of the coating, through which the oxygen and aluminium ions penetrate and which, when combined, form an oxide layer. It is established that the maximum microhardness of the anodized layer can be achieved by heat treatment – heating of the anodized samples to 300°C.

Keywords: *solid anodizing, aluminum, basic electrolyte – 20% aqueous solution of H₂SO₄, ozone-air mixture, hydrogen peroxide, oxide layer, barrier layer, pores, microhardness.*

Shtefan V. V., Kanunnikova N. O., and Goncharenko T. Ye. Analysis of structure and corrosion resistance properties of oxide layers on AISI 304 steel.....99

The electrical conductivity and defectiveness of oxide coatings on stainless steel was investigated by the method of impedance spectroscopy. The morphology and X-ray phase composition of oxide materials formed in Mo-, Al-, Ti-containing electrolytes was studied. It was established that the addition of valve metals to the coating composition reduced the corrosion rate of the oxidized steel in chloride environments. The results of impedance spectroscopy correlated with the results of corrosion tests.

Keywords: *stainless steels, morphology, oxide coatings, molybdenum, aluminum, titanium, polarization resistance, impedance.*

Bilyi L. M., Posuvailo V. M., Ivashkiv V. R., and Kovalchuk I. V. Corrosion properties of oxide ceramic coatings based on Al–Cu–Mg and Al–Mg alloys.....106

The corrosion resistance of oxide ceramic coatings obtained on Al–Cu–Mg and Al–Mg alloys during ozone bubbling is estimated by electrochemical impedance spectroscopy and potentiodynamic methods. The results are compared with the data on corrosion resistance of materials manufactured by standard methods. The capacity of

all obtained oxide ceramic coatings after 90 days is stabilized and is 1...4 pF/cm². Their corrosion resistance on the Д16 alloy is twice as high as for the АМr5 alloy. All developed coatings have almost the same protective properties, and their resistance in 3% aqueous sodium chloride solution is 1...4 GΩ·cm².

Keywords: *corrosion, plasma electrolyte oxidation, aluminum oxides, oxide ceramic coatings, X-ray analysis, alloy.*

Flamini D., Tuckart W. R., and Prieto G. Influence of cryogenic treatments on the electrochemical behavior of two martensitic stainless steels.....113

Cryogenic treatment is a useful method for improving the mechanical and tribological properties of a wide range of materials, especially steels. However, results regarding the effect of this treatment on the corrosion resistance are scarce, particularly in the case of martensitic stainless steels. In this research, the influence of cryogenic treatments on the properties of two different martensitic stainless steels, namely AISI 420 and AISI 440C, is investigated. Their microstructures are studied by scanning electron microscopy and X-ray diffraction and correlated with their corrosion resistance. The electrochemical behavior of the steels is studied by measuring open-circuit potential and under experiments using cyclic anodic potentiodynamic polarization. It is found that the cryogenic treatment does not affect the pitting resistance of AISI 420 steel, but it significantly reduces the ability of AISI 440C to achieve passivation.

Keywords: *cryogenic treatment, electrochemical corrosion, carbides, retained austenite.*

Dmytrakh I. M., Syrotyuk A. M., and Leshchak R. L. Features of electrochemical hydrogen charging of low-alloyed steel of pipeline in model solution of soil water.....124

The peculiarities of the process of adsorption of electrochemical diffusible hydrogen on the surface of low-alloyed ferritic-pearlitic pipe steel, as well as its absorption by the bulk of material depending on the time and physicochemical conditions of hydrogen charging in the model solution of soil water are studied. The dependences of the bulk hydrogen concentration in the material depending on the time of hydrogen charging are established and the analytical dependence for predicting estimates of this value is proposed.

Keywords: *low-alloyed steel; hydrogen-containing environment; hydrogen charging; hydrogen concentration.*

Korniy S. A., Zin I. M., Khlopyk O. P., Tymus M. B., and Holovchuk M. Ya. The effect of phosphate-nitrate composition on corrosion of mechanically activated surface of aluminum alloy.....131

The protective properties of the composition of calcium phosphate and sodium nitrate on aluminium alloy in a synthetic acid rain are studied. It is found that this inhibitory composition has high corrosion-resistant efficiency providing degree of metal protection of 96% with no mechanical loading. During mechanical activation, a protective film with improved protective properties is formed on the surface of the aluminum alloy in the inhibited corrosive solution. The studied composition is promising for protection against the surfaces fracture of aluminum alloys of structures, operating in tribocorrosion conditions.

Keywords: *aluminum alloy, tribocorrosion, inhibitory composition, phosphate, nitrate.*

Narivskiy O. E., Belikov S. B., Subbotin S. A., and Pulina T. V. The influence of chloride-containing medium on pitting resistance AISI 321 steel138

Mathematical models that describe the dependences of the critical temperatures of AISI 321 steel pitting in model circulating waters with a pH of 4...8 and a chloride concentration of 350 to 600 mg/l on its chemical composition and structure have been developed. They are based on multidimensional linear regressions of the first order and on neural networks of direct signal propagation. Using the developed mathematical models, it is found that the critical pitting temperatures of AISI 321 steel increase with increasing pH of the circulating water, the average distance between the oxides in the steel, the content of manganese and chromium in it, and a decrease in the average grain diameter of austenite and the content of chlorides in the medium. At the same time, it is found that the influence of environmental parameters is the greatest, but the heterogeneity of steel, depending on the content of Cr, Si, Mn i N in it, also significantly affects its pitting resistance. It is proposed to use the developed mathematical models to select the optimal melts of AISI 321 steel, the most resistant to pitting in model circulating waters.

Keywords: *pitting resistance, heat exchanger, circulating water, structural heterogeneity, chemical composition, pitting resistance prediction.*