

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. 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 18.12.2022. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12. Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 091222 від 09.12.2022. 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, № 6, 2022

листопад – грудень

ЗМІСТ

- Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Звягін Н. С.* Акустико-емісійний метод визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії силових навантажень і корозивних середовищ.....5

Побудовано акустико-емісійну модель локального руйнування (поширення тріщини) матеріалу. На підставі цього розроблено метод визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження і корозивного середовища. Розмір тріщини і напруження в її площині запропоновано визначати за допомогою параметрів акустограми, знятої з елемента конструкції під час поширення тріщини. Для демонстрації застосування цього методу виконано числовий експеримент і встановлено залишковий ресурс пластини.

Ключові слова: акустична емісія, корозійно-механічна тріщина, залишковий ресурс, еталонна акустико-кінетична діаграма поширення корозійно-механічної тріщини, схема еталонної аналітичної акустограми за поширення тріщини.

- Куриляк Д. Б., Назарчук З. Т., Войтко М. В., Кулинич Я. П.* Дифракція SH-хвилі на тонкому міжфазному дефекті скінченної ширини у з'єднанні пружного шару з півпростором.....12

Розв'язано задачу дифракції пружної SH-хвилі на скінченному міжфазному дефекті, утвореному на межі жорсткого з'єднання шару з півпростором. Моделлю дефекту є смужка на поверхні з'єднання зі заданою на ній імпедансною граничною умовою. Методом Вінера–Гопфа задачу зведено до розв'язання нескінченної системи лінійних алгебричних рівнянь. Розв'язок використано для дослідження особливостей поведінки поля зміщень на вільній від напружень поверхні пружного шару.

Ключові слова: дифракція, дефект, імпеданс, пружний шар, метод Вінера–Гопфа.

- Саврук М. П., Казберук А., Кравець В. С., Чоренький А. Б.* Напружений стан ортотропної пластини біля отворів з гострими та закругленими вершинами.....19

Методом сингулярних інтегральних рівнянь побудовано розв'язки плоских задач про концентрацію напружень біля криволінійних отворів в ортотропній площині з гладким та кусково-гладким контурами. Числові результати отримано

для ортотропних пластин з отворами різних форм за одновісного симетричного навантаження на нескінченності. Порівняно розподіли контурних нормальних напружень для фізичної щілини та еліптичного отвору в ортотропній та квазіортотропній площинах з однаковим відношенням головних модулів пружності матеріалу. Коефіцієнти концентрації та інтенсивності напружень розраховано для ортотропної пластини з квадратним та ромбічним отворами із закругленими та гострими вершинами.

Ключові слова: ортотропний та квазіортотропний матеріал, гострі та закруглені вирізи, коефіцієнти концентрації та інтенсивності напружень.

Мельник І. В., Стацюк М. Г., Гоголь М. В., Приставський Т. В., Івасик Г. В.,
Партута В. П. Методика розрахунку та експериментальна перевірка
жорсткості залізобетонних конструкцій з однонапрямленими
порожнинами.....26

Подано методику розрахунку жорсткості монолітних залізобетонних конструкцій з порожнинами, розташованими в одному напрямку. За результатами теоретичного (числового) моделювання з використанням теорії оболонок і методу скінченних елементів отримано значення циліндричних жорсткостей порожнистих перекриттів, які є різними в обох напрямках і меншими порівняно зі суцільними плитами. Одержано понижувальні коефіцієнти циліндричних жорсткостей c_x , c_y залежно від геометричних параметрів порожнин. Розраховано прогини порожнистого перекриття значних розмірів у плані, на якому здійснювали експериментальні дослідження, з врахуванням коефіцієнтів c_x , c_y . Отримані теоретичні значення прогинів дають задовільну збіжність з експериментальними.

Ключові слова: залізобетонні плоскі порожнисті плити, розрахунок жорсткості, теоретичні та експериментальні значення прогинів.

Пастернак Я. М., Сулим Г. Т., Василюшин А. В., Ясній О. П. Вплив
міжфазних прошарків високої теплопровідності на розподіл
фізико-механічних полів у двокомпонентних структурах.....34

На основі теорії функції комплексної змінної та формалізму Стро подано математичну модель узагальненого плоского термомагнетоелектронапруженого стану двокомпонентної структури із тонким міжфазним проміжком високої теплопровідності. На базі розвинень комплексних потенціалів Стро у степеневі ряди та подальшого задоволення крайових умов на основі підходу найменших квадратів побудовано напіваналітичний обчислювальний метод аналізу фізико-механічних полів у таких двокомпонентних структурах. Подано приклади розв'язування конкретних задач для скінченних тіл.

Ключові слова: термомагнетоелектропружність, двокомпонентна структура, міжфазний проміжок високої теплопровідності.

Губенко С. І., Парусов Е. В. Вплив включень евтектичного типу
на червоноламкість сталей.....39

Досліджено роль гетерофазних включень евтектичного типу (ВЕТ) у перебігу пластичної деформації сталей. Встановлено, що метал поблизу них руйнується на мікроструктурному рівні з утворенням тріщин та деформаційних порожнин, спричинених їх плавленням. Визначено температуру плавлення різних ВЕТ та температурні інтервали виникнення мікроруйнувань під час їх деформації. Встановлено, що оплавлення ВЕТ вже на початкових етапах деформації зумовлює ріст у сталях тріщин і порожнин, що сприяє їх червоноламкості.

Ключові слова: сталь, деформація, неметалеві включення, тріщини, порожнини, міжфазні межі включення-матриця, червоноламкість.

<i>Гусарова І. О., Солодкий Є. В., Манько Т. А., Лобода П. І.</i> Кераміка на основі реакційно-зв'язаного карбїду бору для теплозахисних покриттів космічних літаків.....	48
---	----

Розроблено метод активованого спікання реакційно-зв'язаного карбїду бору за дифузійного легування частинок порошку аморфним бором. За активованого спікання в присутності бору та кремнію з допомогою рентгенофазового аналізу показано утворення потрійної фази $B_{12}(B,C,Si)_3$. За результатами мікроструктурних досліджень матеріалу доведено, що на поверхні полікристалів формується дифузійний шар, насичений бором і кремнієм, який оточує кожен частинку. Встановлено, що структура кераміки на основі карбїду бору, отримана в результаті легування бором та кремнієм, це зерна карбїду бору, пронизані голчастими кристалами вторинного карбїду кремнію. Експериментально доведено, що така структура призводить до підвищення в'язкості руйнування матеріалу в 2–3 рази порівняно зі спеченим реакційно-зв'язаним карбїдом бору. Це дає можливість застосовувати матеріал для створення теплозахисних покриттів гіперзвукових космічних літаків.

Ключові слова: *активоване реакційне спікання, карбїд бору, карбїд кремнію, теплозахист.*

<i>Нарівський О. Е., Субботін С. О., Пуліна Т. В., Леоценко С. Д., Хома М. С., Рацька Н. Б.</i> Моделювання пітингування теплообмінників зі сталей типу 18/10 в оборотних водах.....	56
--	----

Розроблено математичні моделі, які описують залежності критичних температур пітингування сталей 12X18H10T, 08X18H10, AISI304 і AISI321 в модельних оборотних водах з рН 4...8 і концентрацією хлоридів 350...600 mg/l від хімічного складу і структури. Вони ґрунтуються на багатомірних регресіях першого порядку та на нейронних мережах прямого розповсюдження сигналу. З аналізу математичних моделей встановлено, що критичні температури пітингування цих сталей ростуть зі збільшенням рН оборотних вод та зменшенням концентрації хлоридів, середньої відстані між оксидами і нітридами титану та кількості найдрібніших (до 1,98 μm) оксидів. При цьому виявлено, що вплив концентрації хлоридів в оборотних водах та структурної гетерогенності сталей найсуттєвіший, а їх хімічного вмісту в межах стандарту – відсутній. Запропоновано розроблені математичні моделі застосовувати для вибору оптимальних за пітинготривкістю плавок сталей типу 18/10 та її прогнозування під час експлуатації теплообмінників в оборотних водах.

Ключові слова: *пітинготривкість, корозійнотривкі сталі, модельні оборотні води, хлориди, структурна гетерогенність, теплообмінник.*

<i>Martínez-Galván Y., Dzib-Pérez L., García-Rentería M., Bilyy O., López-Morelos V., Gonzalez-Sanchez J.</i> Вплив температури на опір зварних з'єднань дуплексної нержавної сталі 2205 пітинговій корозії.....	63
--	----

Електрохімічну поведінку зварних з'єднань (ЗЗ) дуплексної нержавної сталі AISI 2205 та її тривкість до пітингової корозії у природній морській воді за різних температур досліджено методом потенціодинамічної поляризації. З'єднання виготовлено дуговим зварюванням у середовищі захисних газів (GMAW) за та без дії зовнішнього низькочастотного магнетного поля (ЗНМП). Електрохімічну поведінку та тривкість до пітингової корозії оцінено як функцію температури електроду. Виявлено, що ЗЗ, утворене за дії ЗНМП 3 mT, має таку ж електрохімічну поведінку, як і зразки базового металу (БМ), тоді як з'єднання, сформовані без його дії, продемонстрували найнижчу тривкість до пітингової корозії. Поведінка зразка ЗЗ, утвореного за дії ЗНМП, стабільно пасивна у природній морській воді до 45°C, а БМ – до 65°C. Поведінка зразків, зварених без ЗНМП, нестійка пасивна від 25°C. Трив-

ка до пітингової корозії ЗЗ, виконаних із застосуванням ЗНМП, поліпшено внаслідок посилення регенерації аустеніту під час термічного циклу та обмеження росту зерен фериту. Це також перешкоджає осадженню збагачених хромом вторинних фаз із подальшим зменшенням зон, збіднених ним, що сприяє виникненню стабільної та стійкої пасивувальної плівки. Пробій цієї плівки за та без дії ЗНМП відбувався переважно у зоні термічного впливу.

Ключові слова: *дуплексна нержавна сталь, пітингова корозія, зварювання плавленням, магнетне поле.*

Кусков Ю. М., Студент М. М., Богайчук І. Л., Кайда Т. В., Задорожна Х. Р., Веселівська Г. Г. Корозійно-активні неметалеві включення у наплавленому металі із порошкового дроту 30Х20МН під флюсом АН-26.....70

Вивчено хімічний склад неметалевих включень та їх вплив на корозійну тривалість нержавної сталі аустенітно-мартенситного класу, наплавленого в один шар порошковим дротом ПП-Нд-30Х20МН під флюсом АН-26. Встановлено, що у наплавленому металі неметалеві включення складного складу та будови, зокрема містять кальцій та його сполуки з іншими елементами, які належать до корозійно-активних і прискорюють корозію.

Ключові слова: *дугове наплавлення, нержавна сталь, неметалеві включення, корозійна тривалість.*

Копей Б. В., Кречковська Г. В., Копей І. Б., Бакун Б. М. Особливості корозійно-втомного руйнування сталевих та гібридних насосних штанг.....76

Виконано порівняльні експериментальні дослідження сталевих та гібридних насосних штанг на втомну витривалість за умов, максимально наближених до натурних. Встановлено закономірності зміни їх використаного ресурсу (за інкубаційним періодом до появи в них тріщин довжиною до 2 mm) від прикладених напружень та виявлено його зростання від 0,25 до 0,85 за їх збільшення від 110 до 175 МПа. У сталевих штангах частка ресурсу до зародження таких тріщин менша та змінювалася в діапазоні 0,18...0,4 зі зростанням навантажень від 100 до 150 МПа. З підвищенням навантажень, прикладених до гібридних штанг, біля сталевих головок з'являлося дедалі більше тріщин. Швидкість їх росту і в сталевих, і в композитних штангах на етапі їх докритичного росту змінювалася в діапазоні 10^{-9} ... 10^{-8} m/cycle.

Ключові слова: *насосні штанги, ріст втомної тріщини, сталь, композити.*

Костін В. А., Лаухін Д. В., Ниркова Л. І. Розтріскування бетонної матриці від тиску продуктів корозії арматури в залізобетоні82

Вивчено окиснення металевої арматури в залізобетонних конструкціях після тривалої експлуатації методами математичного моделювання. У розрахунках використано бетон марки В25 (М350), з якого виготовляють монолітні фундаменти, плити перекриття, колони, балки, монолітні стіни тощо. Виявлено, що корозія обумовлена відновленням кисню із формуванням оксидного шару, що викликає корозію сталевих арматур у бетоні, його розширення та подальше поступове руйнування, що враховано за допомогою скалярної моделі ушкодження. Встановлено вплив товщини оксидного шару на тиск, нормальні та дотичні напруження на межі арматура-бетон. Визначено умови, за яких критичне корозійне руйнування арматури у бетонній конструкції не досягається. Ступінь пошкодження конструкції знижується зі збільшенням діаметра арматури, зменшенням товщини оксидного шару та загального вмісту в ній кисню.

Ключові слова: *корозія, залізобетон, руйнування, моделювання, лінійно-пружний матеріал, оксидний шар, діаграма ушкодження.*

Погрелюк І. М., Ткачук О. В., Проскурняк Р. В., Кузнєцов О. В.,
Гнілицький Я. М. Морфологія та корозійні властивості гідрокси-
апатитного покриття, сформованого на титановому сплаві VT6.....89

Досліджено формування гідроксиапатитного покриття на титановому сплаві VT6 під час комбінованого оброблення: азотування та плазмо-електролітного оксидування у лужному електроліті (гідроксиапатит + 1М гідроксиду калію). Встановлено, що таке оброблення сприяє росту гідроксиапатитної фази $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, що можна пояснити збільшенням центрів кристалізації гідроксиапатиту на задалегідь азотованій поверхні. Виявлено, що гідроксиапатитний покрив на такій поверхні підвищує гідрофільність та поліпшує корозійну тривкість у розчині Рінгера при 37°C.

Ключові слова: титановий сплав VT6, азотування, плазмо-електролітне оксидування, гідроксиапатит, розчин Рінгера.

Влад Х. І., Вербовицький Ю. В., Богатирьов В. М., Завалій І. Ю. Структура
та електрохімічні зарядно-розрядні властивості
нанокомпозитів Ni-Co-C.....96

Композити на основі нікелю, кобальту та вуглецю досліджували як сполучні матеріали для виготовлення негативних електродів нікель-металогідридних (Ni-MГ) хімічних джерел струму. Вивчено структуру та електрохімічні властивості наноккомпозитів Ni-C, Co-C та NiCo-C, які синтезовані методом піролізу з полістиролу та солей металів. Методом рентгенівської порошкової дифракції встановлено їхню кристалічну структуру, а методом сканівної електронної мікроскопії показано залежність морфології від хімічного складу композитів. Електрохімічні властивості продемонстрували, що наноккомпозит Ni-C має хорошу циклічну стабільність (92% у 40-му циклі), а Co-C – високу розрядну ємність (330 mA·h/g). Методом лінійної розгортки потенціалу підтверджено, що основним реакціям заряду-розряду відповідають гідрування та дегідрування.

Ключові слова: метал-вуглецеві наноккомпозити, нікель, кобальт, матеріал негативного електрода, електрохімічні властивості.

Кирилів В. І., Закієв В. І., Максимів О. В. Зміна модуля пружності
поверхневого наноструктурованого шару на сталі У8.....103

Досліджено зміну модуля пружності поверхневої нанокристалічної структури, сформованої механоімпульсною обробкою сталі У8, методом Олівера-Фара. Показано його підвищення на 17% порівняно з матричною структурою. Таке збільшення пояснено зміною електронної конфігурації заліза, зокрема зростанням внеску *d*-орбіталей у металевий зв'язок завдяки дії високих тисків під час обробки, що підтверджує відомий висновок про підвищений взаємозв'язок між атомами всередині металу та його послаблення на поверхні. Показано обернену залежність між модулями пружності та коефіцієнтами тертя для різних металів.

Ключові слова: поверхнева нанокристалічна структура, механоімпульсна обробка, модуль пружності, метод Олівера-Фара, електронна конфігурація наноструктури.

Любименко О. М. Особливості зміни форми пластини за утворення
градієнтних сплавів паладію з воднем.....108

Вперше досліджено утворення тимчасового градієнтного сплаву $\alpha\text{-PdH}_n$ за температури 320°C під час його насичення воднем за зміни вмісту водню в паладії від 0,01543 до 0,06172 H/Pd з кроком $\Delta n = 0,01543$. Експериментально показано, що вигини пластини повністю оборотні, максимальний вигин зменшувався у сплаві з більшим вмістом водню з досягненням плато, яке тривало в кожному

експерименті по 5 s. Отримані результати свідчать про прояв прогресуючої термобаропружно-дифузійної рівноваги з гальмуванням проникнення водню в пластину і, відповідно, прогресуюче зменшення швидкості росту градієнтного шару (α -PdH_n), відповідального за вигин. Звідси слідує, що синергетичний характер трьох взаємопов'язаних і взаємообумовлених кінетичних процесів зміни форми пластини з градієнтних сплавів α -PdH_{0,01543}, α -PdH_{0,03086}, α -PdH_{0,04629}, α -PdH_{0,06172} зумовлений дифузійним транспортом водню, перерозподілом внутрішніх напружень у пластині за її вигину (випрямлення) та відповідною перебудовою концентраційного поля водню, що змінює внутрішні умови дифузійного транспорту водню в шари сплаву α -PdH_n.

Ключові слова: водень, паладій, градієнтний сплав, насичення, концентрація, термобаропружно-дифузійна рівновага.

Голубець В. М., Гвоздецький В. М., Пашечко М. І., Шуляр Ю. С. Вплив електроіскрових покриттів інструментів на силові показники фрезерування деревинних матеріалів..... 115

Досліджено момент опору різанню під час фрезерування дуба і сосни вздовж та поперек волокон залежно від сухого або вологого стану дисковою фасонною фрезою зі сталі 9ХС з нанесеними на зубці електроіскровими покриттями. Проаналізовано вплив електроіскрових покриттів різного структурно-фазового стану, отриманих електродами з твердого сплаву Т15К6 і порошкових дрітків системи Fe–Mn–C–B та Fe–Cr–C–B, на силові показники фрезерування деревинних матеріалів.

Ключові слова: електроіскрове покриття, електроіскрове легування, електрод, дріт порошковий, момент опору різанню, фреза дискова.

Rawandeep Kaur, Jaspal Singh. Властивості будівельного вапняного розчину на основі метаксаоліну із багатостінними вуглецевими нанотрубками..... 121

Для розвитку будівельної галузі запропоновано альтернативні матеріали. Досліджено геополімерний будівельний розчин на основі метаксаоліну разом із золою качанів кукурудзи (ССА) і багат шаровими вуглецевими нанотрубками (NMCNT). Вивчено його властивості за зміною кількості багат шарових вуглецевих нанотрубок (0%; 0,25; 0,5; 0,75 та 1%), а також ступінь заміни метаксаоліну кукурудзяною золою (0...10% та 2,5% приросту). За результатами сканувального електронного мікроаналізу встановлено, що NMCNT рівномірно розподілені в геополімерній матриці за вмісту концентрації 50%, тоді як за вмісту 1% – слабо розподілені та агломеровані всередині матриці. Зафіксовано значне збільшення міцності на стиск геополімерного розчину на основі метаксаоліну за поєднання 5% ССА та 5% MWCNTs.

Ключові слова: вуглецеві нанотрубки, міцність на стиск, метаксаолін, сканувальний електронний мікроскоп.

Перелік статей, опублікованих у журналі “ФХММ” за 2022 р...... 127
Авторський покажчик..... 133

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, № 6, 2022

November – December

CONTENTS

- Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., and Zviagin N. S.* Acoustic-emission method of determining residual life of thin-walled structural elements under the action of force loads and corrosive environments.....5

An acoustic-emission model of local fracture (crack propagation) of the material is constructed. Based on this, a method of determining the residual lifetime of thin-walled structural elements under the action of long-term static load and corrosive environment has been developed. It is proposed to determine the size of the crack and the stress in its plane by using the parameters of the acoustogram taken from the structural element during the crack propagation. To demonstrate the application of this method, a numerical experiment is conducted and the residual lifetime of the plate is determined.

Keywords: *acoustic emission, corrosion-mechanical crack, residual resource, reference acoustic-kinetic diagram of corrosion-mechanical crack propagation, scheme of reference analytical acoustogram during crack propagation.*

- Kuryliak D. B., Nazarchuk Z. T., Voytko M. V., and Kulynych Ya. P.* SH-wave diffraction on a thin interface finite defect in the joint of an elastic layer and a half-space12

The elastic SH-wave diffraction from the finite defect that is formed on the boundary of the rigid joint between a layer and a half-space is considered. The model of the defect is an impedance strip on the surface of the joint. Using the Wiener–Hopf technique, the problem is reduced to an infinite system of linear algebraic equations. Its solution is used to clarify the features of the displaced field on the surface of an elastic layer which is free from the stress.

Keywords: *diffraction, defect, impedance, elastic layer, Wiener–Hopf technique.*

- Savruk M. P., Kazberuk A., Kravets V. S., and Chornenkyi A. B.* Stress state of an orthotropic plate at the holes with sharp and rounded tips.....19

Using the method of singular integral equations, the solutions of the plane problems about stress concentration near curvilinear holes in an orthotropic plane with smooth and piece-smooth contours are constructed. Numerical results for orthotropic plates with holes of various shapes under uniaxial symmetric loading at infinity have been obtained. The distributions of contour normal stresses for a narrow slot and an ellip-

tical hole in orthotropic and quasi-orthotropic planes with the same ratio of the main elastic module of the material are compared. The stress concentration and intensity factors for an orthotropic plate with square and rhombic holes with rounded and sharp tips are calculated.

Keywords: *orthotropic and quasi-orthotropic material, sharp and rounded notches, stress concentration and intensity factors.*

Melnyk I. V., Stashchuk M. H., Hohol M. V., Prystavskyi T. V., Ivasyk H. V.,
and Partuta V. P. Methodology of calculation and experimental verification
of rigidity of reinforced concrete structures with unidirectional cavities.....26

The methodology for calculating the rigidity of monolithic reinforced concrete structures with cavities, located in one direction, is presented. According to the results of theoretical (numerical) modeling using the theory of shells and the finite element method, the values of cylindrical rigidity of hollow floors were obtained, which are different in both directions and smaller compared to solid slabs. The decreasing coefficients of cylindrical rigidity c_x , c_y depending on the geometric parameters of the cavities were determined. Deflections of the hollow floor of significant dimensions, in the plan on which the experimental studies were carried out, were calculated, taking into account the c_x , c_y coefficients. The obtained theoretical values of the deflections give a more satisfactory convergence with the experimental values of the deflections.

Keywords: *reinforced concrete flat hollow slabs, rigidity calculation, theoretical and experimental values of deflections.*

Pasternak Ia. M., Sulym H. T., Vasylyshyn A. V., and Iasnyy O. P. The influence
of interfacial layers of high thermal conductivity on the distribution
of physical and mechanical fields in two-component structures.....34

Based on the complex variable calculus and the Stroh formalism, a mathematical model of the generalized plane thermomagnetoelasticity of a two-component structure with a thin interfacial layer of high thermal conductivity is presented. Using the expansion of the Stroh complex potentials in power series and further satisfaction of boundary conditions on the basis of the least squares approach, a semi-analytical computational method of analysis of physico-mechanical fields in such two-component structures is developed. Numerical examples of solving specific problems for finite solids are presented.

Keywords: *thermomagnetoelasticity, biomaterial solid, high temperature conducting interface.*

Gubenko S. I. and Parusov E. V. The influence of eutectic-type inclusions
on the red brittleness of steels.....39

The behavior of heterophase inclusions of the eutectic type (IET) is studied under different conditions of plastic deformation of industrial steels. It has been established that near inclusions of eutectics, having various types of microdamages, the cracks and cavities of deformation origin and cavities associated with their melting are formed. The melting temperatures of inclusions of different IET, as well as the temperature intervals for the formation of microdamages of various types during the deformation process, have been established. It is shown that the melting of eutectic inclusions causes a sharp growth of cracks and cavities at the initial stages of deformation, which contributes to the manifestation of red brittleness of steels.

Keywords: *steel, deformation, non-metallic inclusions, cracks, cavities, inclusion–matrix interphase boundaries, red brittleness.*

<i>Husarova I. O., Solodkyi Ye. V., Manko T. A., and Loboda P. I. Ceramics based on reaction-bonded boron carbide for heat protection coatings of space aircraft.....</i>	<i>48</i>
---	-----------

The method for activated sintering of reaction-bonded boron carbide by diffusion doping of boron carbide powder particles with amorphous boron was developed. On the basis of X-ray phase analysis it is shown that under the conditions of activated sintering in the presence of boron the formation of the $B_{12}(B,C,Si)_3$ phase occurred. According to the results of microstructural studies of the material, it is proved that on the surface of polycrystals there is a diffusion layer saturated with boron and silicon, which surrounds each particle. It is found that the structure of obtained ceramics based on boron carbide by doping with boron and silicon, represents the boron carbide grains penetrated by needle crystals of secondary silicon carbide. It has been experimentally proved that this nature of the structure leads to an increase in the fracture toughness of the material in 2–3 times compared to the existing sintered reaction-bonded boron carbide. This allows us to use the material for creating heat-proof coatings for hypersonic spacecraft.

Keywords: *activated reaction sintering, boron carbide, silicon carbide, heat protection.*

<i>Narivskiy O. E., Subbotin S. O., Pulina T. V., Leoshchenko S. D., Khoma M. S., and Ratska N. B. Modeling of pitting of heat exchangers made of 18/10 type steels in circulating water.....</i>	<i>56</i>
---	-----------

Mathematical models have been developed that describe the dependences of critical pitting temperatures of 12X18H10T, 08X18H10, AISI304 and AISI321 steels in model circulating waters with pH 4...8 and chloride concentration 350...600 mg/l on chemical composition and structure. They are based on multidimensional regressions of the first order and on neural networks of direct signal propagation. The analysis of mathematical models shows that the critical pitting temperatures of these steels increase with increasing pH of circulating waters and decreasing chloride concentration, the average distance between oxides and nitrides of titanium and the number of the smallest (up to 1.98 μm) oxides. It is found that the influence of chloride concentration in circulating waters and the above-mentioned indicators of steel structure is the most significant, and of their chemical composition within the standard is absent. It is proposed to use the developed mathematical models to select the optimal melting of steels of type 18/10 according to their pitting resistance and its prediction during the operation of heat exchangers in circulating waters.

Keywords: *pitting resistance, corrosion-resistant steels, model circulating waters, chlorides, structural heterogeneity, heat exchanger.*

<i>Martínez-Galván Y., Dzib-Pérez L., García-Rentería M., Bilyy O., López-Morelos V., and Gonzalez-Sanchez J. Effect of temperature on resistance to pitting corrosion in duplex stainless steel 2205 welds.....</i>	<i>63</i>
--	-----------

Potentiodynamic polarization was applied to study the electrochemical behaviour of AISI 2205 duplex stainless steel welds and their resistance to pitting corrosion in natural seawater for different temperatures. The gas metal arc welding method (GMAW) was used to manufacture joints with and without the simultaneous application of an external magnetic field of low intensity. The improvement of electrochemical behaviour and resistance to pitting corrosion was evaluated as a function of the electrolyte temperature. The welded joints formed under an external magnetic field of 3 mT presented electrochemical behaviour similar to that for base metal samples, whereas joints welded without a magnetic field (0 mT) showed the lowest resistance to pitting corrosion. The joints welded under the external magnetic field presented stable passive behaviour in natural seawater up to the temperature of 45°C, whereas the base metal up to 65°C. The

samples welded without a magnetic field showed unstable passive behaviour at a temperature of 25°C. The improvement in the resistance to pitting corrosion of the welds with the application of a magnetic field occurred due to the intensification of austenite phase regeneration during the thermal cycle and the limitation of ferrite phase grains growth. It also limits the precipitation of Cr-rich secondary phases with the consequent reduction of Cr-depleted zones, which ensures the formation of a stable and resistant passive film. The breakdown of this passive film, both in welds with and without a magnetic field, mainly occurs in the heat-affected zone.

Keywords: duplex stainless steel, pitting corrosion, fusion welding, magnetic field.

Kuskov Yu. M., Student M. M., Bohaichuk I. L., Kaida T. V., Zadorozhna Kh. R., and Veselivska H. H. Corrosion-active non-metallic inclusions in deposited metal from powder-coated 30X20MH wire under AN-26 flux.....70

The influence of non-metallic inclusions on the corrosion resistance of austenitic-martensitic stainless steel deposited in one layer with ПП-НД-30X20MH flux-cored wire under AN-26 flux has been studied. It has been established that in the deposited metal there are non-metallic inclusions of complex composition and structure, including those containing calcium and its compounds with other elements, which are classified as corrosive, accelerating the course of corrosion phenomena.

Keywords: arc surfacing, stainless steel, non-metallic inclusions, corrosion resistance.

Kopei B. V., Krechkovska H. V., Kopei I. B., and Bakun B. N. Specific features of corrosion-fatigue fracture of steel and hybrid pump rods.....76

Comparative experimental studies of steel and hybrid sucker rods were carried out for fatigue life in the conditions maximum close to natural ones. The regularity of the change in their used life (for to the incubation period before the detection of cracks up to 2 mm long) due to the applied stresses was established and it was shown that it increased from 0.25 to 0.85 with their increase from 110 to 175 MPa. In steel sucker rods, the percent of life before the crack appearance is smaller and can be in the range of 0.18...0.4 with increasing load from 100 to 150 MPa. As the loads applied to the hybrid rods increased, more and more cracks appeared on the steel heads. The crack growth rates in both steel and composite rods at the stage of subcritical growth changes in the range of 10^{-9} ... 10^{-8} m/cycle.

Keywords: sucker rods, crack fatigue growth, steel, composites.

Kostin V. A., Laukhin D. V., and Nyrkova L. I. Cracking of the concrete matrix in reinforced concrete due to the pressure of corrosion products of the reinforcement.....82

The processes of oxidation of metal fittings in reinforced concrete structures after a long period of operation were studied using mathematical modeling methods. B25 (M350) concrete is used in the calculations, which is widely used for the manufacture of monolithic foundations, floor slabs, columns, beams, monolithic walls and other responsible structures. It is found that the corrosion process is caused by the recovery of oxygen with the formation of an oxide layer, which causes gradual fracture of concrete, which is taken into account using a scalar damage model. The effect of the thickness of the oxide layer on the pressure, normal and tangential stresses at the reinforcement-concrete boundary is determined. The conditions under which the critical state of corrosion fracture of the concrete structure cannot be reached have been determined. It is established that the degree of damage to the structure decreases with an increase in the diameter of the reinforcement, a decrease in the thickness of the oxide layer and the total oxygen content in the concrete structure.

Keywords: corrosion, reinforced concrete, fracture, modeling, linear elastic material, oxide layer, damage diagram.

- Pohrelyuk I. M., Tkachuk O. V., Proskurnyak R. V., Kuznetsov O. V., and Gnilitzki Ya. M. Morphology and corrosion properties of hydroxyapatite coatings formed on BT6 pre-nitrided titanium alloy.....89

The formation of hydroxyapatite coating on BT6 titanium alloy under combined treatment: nitriding and plasma-electrolytic oxidation in an alkaline electrolyte (hydroxyapatite + 1M potassium hydroxide) was investigated. It was determined that such treatment promotes the growth of the $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ hydroxyapatite phase, that can be attributed to an increase of the centers of hydroxyapatite crystallization on the pre-nitrided surface. It was shown that the hydroxyapatite coating on pre-nitrided surface provided higher hydrophilicity and better corrosion resistance in Ringer's solution at a temperature of 37°C.

Keywords: BT6 titanium alloy, nitriding, plasma-electrolytic oxidation, hydroxyapatite, Ringer's solution.

- Vlad Kh. I., Verbovytskyy Yu. V., Bogatyrov V. M., and Zavalij I. Yu. Structure and electrochemical charge-discharge properties of Ni-Co-C nanocomposites.....96

Composites based on nickel, cobalt and carbon were investigated as bonding materials for the production of negative electrodes of nickel-metal hydride (Ni-MH) batteries. The structure and electrochemical properties of Ni-C, Co-C and NiCo-C nanocomposites synthesized by the pyrolysis method from polystyrene and metal salts were studied. Its crystal structure was established by X-ray powder diffraction, and the dependence of morphology on the chemical composition of the composite was shown by scanning electron microscopy. Electrochemical properties demonstrated that the Ni-C nanocomposite had good cyclic stability (92% in the 40th cycle), and Co-C had a high discharge capacity (330 mA·h/g). The hydrogenation and dehydrogenation processes which corresponded to the main charge-discharge reactions were confirmed by the linear potential sweep method.

Keywords: metal-carbon nanocomposites, nickel, cobalt, negative electrode material, electrochemical properties.

- Kyryliv V. I., Zakiev V. I., and Maksymiv O. V. Change in the modulus of elasticity of the surface nanostructured layer on V8 steel.....103

The change of elasticity modulus of surface nanocrystalline structure, formed by mechanical-pulse treatment on V8 steel has been studied by Oliver-Pharr indentation method. Its increment by 17% compared with matrix structure is shown. This is explained by the change of electron configuration of iron, namely by increase in the contribution of *d*-orbitals into metallic bond due to the influence of high pressure under treatment, thus confirming the theory about higher interaction between atoms inside the metal and its weakening on the surface. The inverse relationship between module of elasticity and friction coefficients for different metals is shown.

Keywords: surface nanocrystalline structure, mechanical pulse treatment, modulus of elasticity, Oliver-Pharr indentation method, electron configuration of the nanostructure.

- Lyubymenko O. M. Specific features of change of the plate shape in the formation of gradient alloys of palladium with hydrogen.....108

The formation of temporary gradient α -PdH_{*n*} alloy at 320°C during the saturation of the α -PdH_{*n*} alloy with hydrogen at $\Delta n = 0.01543$ to 0.06172 H/Pd for the change in

the hydrogen content of palladium has been studied for the first time. It is shown experimentally that plate bending is completely reversible, the value of the maximum plate bending decreases when the alloy with a high hydrogen content in the plate is formed with reaching a plateau, lasting for 5 s in each experiment. It is shown that the results obtained indicate the manifestation of a progressive thermo-baro-elastic-diffusive equilibrium with inhibition of hydrogen penetration into the plate and a corresponding progressive decrease in the growth rate of the gradient layer (α -PdH_n) responsible for bending. Hence, the synergistic nature of the three interrelated and interdependent kinetic processes of the change of the plate shape from gradient alloys α -PdH_{0.01543}, α -PdH_{0.03086}, α -PdH_{0.04629}, α -PdH_{0.06172} is caused by diffusion hydrogen transport, redistribution of internal stresses in the plate during its bending (straightening) and corresponding restructuring of hydrogen concentration field, which changes internal conditions of hydrogen diffusion transport into the α -PdH_n alloy layers.

Keywords: *hydrogen, palladium, gradient alloy, saturation, concentration, thermo-baro-elastic-diffusion equilibrium.*

Holubets V. M., Hvozdetzkyi V. M., Pashechko M. I., and Shpuliar Yu. S.

The influence of electrospark coatings of tool on the strength indicators of milling of wooden materials.....115

The moment of resistance to cutting during milling of pine and oak along and across the fibers, depending on the dry or wet state, with a disc-shaped milling cutter made of 9XC steel with an electric-spark coating applied to the teeth, was investigated. The influence of electric-spark coatings of different structural and phase composition, obtained by electrodes from T15K6 hard alloy and the Fe–Mn–C–B and Fe–Cr–C–B powder wires, on the strength indicators of the milling process of wooden materials was analyzed.

Keywords: *electric-spark coating, electric-spark alloying, electrode, powder wire, moment of resistance to cutting, disk milling cutter.*

Pawandeep Kaur and Jaspal Singh. Properties of metakaolin-based

geopolymer mortar incorporated with multi-walled carbon nanotubes.....121

The use of alternative materials, predominantly with high levels of supplementary cementitious materials and geopolymer composites for the development of the construction industry is proposed. Metakaolin-based geopolymer mortar along with corn cob ash (CCA) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were characterized and tested. In this paper, the properties of geopolymer mortar was studied by varying the concentrations of multi-walled carbon nanotubes (0%; 0.25%; 0.5%; 0.75% and 1%) along with the replacement levels of metakaolin with corn cob ash (0...10% about 2.5% increment). From the scanning electron microscope analysis, it was depicted that the MWCNTs were distributed uniformly within the geopolymer matrix at 0.50%, while at 1% these were poorly distributed and agglomerated within the matrix. Experimental investigation revealed that there was a significant increase in compressive strength of metakaolin-based geopolymer mortar when CCA and MWCNTs were combined at 5% of CCA and 0.5% of MWCNTs, but beyond this combination, there was a reduction in strength.

Keywords: *carbon nanotubes, compressive strength, metakaolin, scanning electron microscope.*

List of papers published in “Physicochemical Mechanics of Materials” in 2022.....127

Authors’ index.....133