

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.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 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 РМ-22-2/22 від 04.07.2022. 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, № 3, 2022

травень – червень

ЗМІСТ

*Хома М. С., Винар В. А., Рацька Н. Б., Пацай І. О., Похмурський В. І.,
Юркевич Р. М.* Корозія та трибокорозія сталі 07X16H6
у сірководневих середовищах.....5

Досліджено вплив концентрації сірководню ($0 \dots 1500 \text{ mg/dm}^3$) у хлоридно-ацетатних розчинах на корозійні процеси, наводнювання та корозійно-механічне зношування сталі 07X16H6. Встановлено, що незалежно від його вмісту корозійна тривкість сталі у цих розчинах значно нижча, ніж у середовищі без сірководню, де вона пасивується. На її поверхні формуються продукти корозії з оксидно-сульфідних сполук, товщина яких зростає з підвищенням концентрації сірководню. Їх верхній шар втрачає суцільність за його вмісту 1500 mg/dm^3 . Трибокорозіяні характеристики сталі за концентрацій 100 і 500 mg/dm^3 змінюються несуттєво, а за 1000 і 1500 mg/dm^3 знижуються на $\sim 30\%$. Корозійні процеси визначають корозійно-механічне зношування сталі у середовищі із різним вмістом сірководню, що пов'язано із наводнюванням поверхневих шарів та інтенсивним відновленням однорідних оксидно-сульфідних плівок на поверхні доріжок тертя під час фрикційного контакту.

Ключові слова: *сталь 07X16H6, корозія, наводнювання, трибокорозія, хлоридно-ацетатний розчин, сірководень, концентрація.*

Василів Х. Б., Чучман М. Р., Івашків В. Р., Дацко Б. М., Різун Ю. Я. Корозія
трубної сталі групи міцності Q125 у модельній пластовій воді
за різних температур та тиску сірководню і вуглекислого газу.....13

Показано, що у модельній пластовій воді (МПВ), насиченій вуглекислим газом, швидкість корозії сталі Q125 зростає з часом, що свідчить про відсутність захисного ефекту під час утворення карбонатних плівок. За $t = 60^\circ\text{C}$ та $P_{\text{CO}_2} = 6 \text{ MPa}$ корозія пришвидшується і переходить з рівномірної у виразкову. Швидкість корозії сталі за короткотривалих випробувань у $\text{МПВ} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ пропорційна до концентрації H_2S у розчині і визначається швидкістю катодного процесу. Механізм корозії не залежить від концентрації сірководню в розчині. За тривалих досліджень у $\text{МПВ} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ швидкість корозії сталі Q125 проти вуглекислотної зменшується у ~ 2 рази за нормальних умов і у 10–15 разів за $t = 60^\circ\text{C}$ та $P_{\text{CO}_2} = 6 \text{ MPa}$ внаслідок формування на поверхні плівок з суміші макінавіту, троїліту і домішок оксидів та гідроксидів заліза. Адгезія сульфідів більша, ніж карбона-

тів, що сприяє зниженню швидкості корозії. Однак внаслідок пористості захисні властивості сульфідів недостатньо ефективні.

Ключові слова: *трубна сталь, сірководень, вуглекислий газ, модельна пластикова вода, корозія, мікроструктура.*

*Герцик О. М., Ковбуз М. О., Гула Т. Г., Єзерська О. А., Корній С. А.,
Пандяк Н. Л.* Електрохімічні характеристики аморфного сплаву
 $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{14,0}B_{6,0}$ за різної природи агресивного середовища.....20

Різними електрохімічними методами досліджено вплив природи агресивного середовища на корозійну тривкість стрічкового аморфного металевго сплаву $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{14,0}B_{6,0}$. Визначено електрохімічні характеристики сплаву у 0,5 М водних розчинах NaCl, HCl, KOH та H_2SO_4 при $T = (293 \pm 1)$ К. Показано, що корозійна тривкість аморфного матеріалу суттєво залежить від компонентного складу агресивного середовища. Встановлено формування щільних пасиваційних шарів на поверхні $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{14,0}B_{6,0}$ у лужному розчині.

Ключові слова: *аморфні сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики, циклічна поляризація, електрохімічна імпедансна спектроскопія.*

Максимова С. В., Зволінський І. В., Ниркова Л. І., Осадчук С. О. Порівняння
корозійної стійкості зварних і паяних з'єднань із оцинкованої сталі 08Ю.....26

Досліджено корозійну стійкість нероз'ємних з'єднань зі сталі 08Ю, отриманих різними методами: MAG (Metal Active Gas) зварюванням, TIG (Tungsten Inert Gas) паянням, плазмовим паянням та зі застосуванням СМТ (Cold Metal Transfer) процесу. Встановлено, що паяння зі застосуванням СМТ-процесу забезпечує найвищі електрохімічну однорідність нероз'ємного з'єднання та корозійну стійкість паяного з'єднання в досліджуваних умовах.

Ключові слова: *оцинкована сталь 08Ю, СМТ-паяння, плазмове, MAG-зварювання, корозійна стійкість, електрохімічна гетерогенність, потенціал корозії, присадний дріт, цинковий припій.*

Губенко С. І. Вплив оброблення поверхні сталей лазером на зародження
корозійних пошкоджень біля неметалевих включень.....33

Досліджено вплив лазерної дії на зародження та розвиток корозійних пошкоджень у сталях поблизу неметалевих включень. Встановлено, що лазерна обробка сприяє підвищенню корозійної стійкості за малоциклової втоми сталей, які містять різні включення. Показано, що вплив лазерної обробки на утворення корозійних пошкоджень пов'язаний зі зміною стану міжфазних меж включення–матриця, що знижує їхню проникність для корозійно-активних елементів та підвищує когезійну міцність цих меж в активних середовищах.

Ключові слова: *сталь, неметалеві включення, лазерна обробка, корозія, межі включення–матриця, малоциклова довговічність.*

Муравський Л. І., Зінь І. М., Білий Л. М., Гаськевич Г. І., Сурядова О. Д.
Моніторинг стану лакофарбового покриття методом цифрової
спекл-інтерферометрії.....38

Методом цифрової спекл-інтерферометрії досліджено вплив рідкого агресивного середовища на поліуретанове лакофарбове покриття (ЛФП). Створено експериментальну установку на базі інтерферометра Тваймана–Гріна для його корозійного моніторингу шляхом реєстрації та подальшого оброблення різницевиx картин спекл-інтерферограм (СІ) поверхні покриття під дією 3%-го розчину NaCl упродовж 7; 14 і 21 days. Виявлено, що за різницевиx картинами СІ мож-

на оцінювати часові зміни деформованої поверхні ЛФП та швидкість росту корозійних дефектів і відшарувань.

Ключові слова: поліуретанове лакофарбове покриття, корозійний моніторинг, цифрова спекл-інтерферометрія, рідке агресивне середовище, спекл-інтерферограма, корозійні дефекти та відшарування.

Гембара О. В., Чепіль О. Я., Гембара Н. Т., Сиротюк А. М. Оцінювання впливу наводнювання металу на довговічність теплообмінних труб парогенераторів.....44

Числово проаналізовано напружено-деформований стан гину теплообмінних труб парогенераторів, виготовлених із нержавної жароміцної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T, за умов, що моделюють експлуатаційні, з урахуванням наводнювання металу труби. Встановлено, що через попереднє деформування металу в гині довговічність труби зменшується на 19% порівняно з прямолінійною ділянкою, а за впливу водневмісного середовища – ще додатково на 12%.

Ключові слова: наводнювання металу, повзучість, енергія деформування, пошкодження, довговічність, водневмісне середовище.

Ориняк І. В., Мазурик Р. В., Марченко В. В., Ориняк А. І. Цільовий метод статистичного оброблення експериментальних результатів випробувань на розрив дефектних труб.....49

Розроблено статистичні методи порівняльного аналізу точності формул для визначення залишкової міцності пластичних труб з поверхневими прямокутними дефектами. В існуючих підходах точність формул встановлено для всього масиву експериментів як одне узагальнене значення, а в цьому дослідженні – окремо для кожного фіксованого набору розмірів дефектів (точки інтересу). Для кожного експерименту розраховано його вагу, що не більше одиниці, на кожну точку інтересу. Статистичний аналіз точності виконано окремо для кожної точки інтересу, що дало можливість згладити експериментальні похибки і точніше визначити похибку самої формули.

Ключові слова: корозійний дефект, залишкова міцність, труба, внутрішній тиск, похибка моделі.

Василів Б. Д., Подгурська В. Я., Остап О. П., Даніленко І. А., Шило А. В. Підвищення міцності матеріалу анода-підкладки водневих і вуглеводневих твердооксидних паливних комірок.....59

Досліджено мікроструктуру, міцність і мікромеханізм руйнування кераміки 50% (ZrO_2 -4 mol% Y_2O_3 -2 mol% CeO_2 -2 wt.% Al_2O_3)-50% (NiO -5 wt.% CuO) у вихідному стані та після одноразового відновлення і запропонованої циклічної redox-обробки при 600°C у сумішах газів Ar -5 vol.% H_2 і N_2 -10 vol.% H_2 -5 vol.% CO_2 . Виявлено, що підвищена міцність кермету цієї системи обумовлена зменшенням вмісту оксиду Y_2O_3 від традиційних 8 до 4mol%, а також подрібненням у двічі зерен вихідної нікелевої фази після redox-обробки. Підтверджена її ефективність для поліпшення властивостей анода-підкладки водневих та вуглеводневих твердооксидних паливних комірок.

Ключові слова: кераміка системи ZrO_2 - Y_2O_3 - CeO_2 - Al_2O_3 - NiO - CuO , redox-обробка, воденьвмісне середовище, діоксид вуглецю, міцність.

Березовець В. В., Киця А. Р., Засадний Т. М., Завалій І. Ю., Яртись В. А. Отримання водню гідролізом сумішей гідриду магнію з цитратною кислотою.....66

Методом механічного помелу в аргоні отримано композитний матеріал на основі гідриду магнію та цитратної кислоти для генерування водню в лабораторних умовах. Гідрид магнію синтезовано методом реактивного помелу Mg в атмосфері водню. В реакції гідролізу отриманий композитний матеріал характеризується швидшим генеруванням водню порівняно з чистим MgH₂. Реакція виділення водню зі зразка MgH₂ · 5C₆H₈O₇ відбувається повністю за 1 min, а його кількість становить ~300 ml/g. Досліджено вплив складу композита на швидкість і ступінь гідролізу MgH₂ та оптимізовано його склад для використання в пристроях генерування водню. Проаналізовано вплив цитратної кислоти на гідроліз гідриду магнію.

Ключові слова: гідрид магнію, цитратна кислота, механохімічний помел, гідроліз.

Вербовицький Ю. В. Взаємодія компонентів і кристалічна структура сполук у системі Eu–Zn–Ga.....72

Встановлено фазові рівноваги у потрійній системі Eu–Zn–Ga в діапазоні концентрацій Європію 0...33,3 at.% при 400°C. Рентгенівську порошкову дифракцію, сканувальну електронну мікроскопію та енергодисперсійну рентгенівську спектроскопію використано для ідентифікації фаз та дослідження їхніх складу і кристалічної структури. Фазові рівноваги системи Eu–Zn–Ga при 400°C характеризуються утворенням чотирьох твердих розчинів, розчинністю галію в EuZn₁₃, EuZn₁₁ і EuZn₅ та цинку в EuGa₄, а також одного неперервного твердого розчину EuZn₂–EuGa₂. В системі виявлено потрійну інтерметалічну сполуку EuZn_xGa_{3-x}, x = 0,15. Ця нова сполука кристалізується у структурному типі CeNiSi₂ (просторова група *Стст*) з параметрами ґратки $a = 4,2900(6) \text{ \AA}$, $b = 18,405(2) \text{ \AA}$, $c = 4,3836(7) \text{ \AA}$. Досліджений частковий ізотермічний розріз має вісім потрійних фазових полів при 400°C.

Ключові слова: сполуки Європію, сполуки цинку, сполуки галію, інтерметаліди, спікання, потрійна система, фазові рівноваги, кристалічна структура.

Ростова Г. Ю., Толстолуцька Г. Д., Василенко Р. Л., Колодій І. В., Коваленко В. І., Марінін В. Г., Тихоновський М. А., Купрін О. С.
Кавітаційне зношування феритно-мартенситної сталі Т91.....79

Досліджено мікроструктуру, твердість та кавітаційне зношування феритно-мартенситної сталі Т91, яку порівняно з іншими реакторними сталями марок Eurofer 97 і Cr18Ni10Ti. Виявлено, що кавітаційна стійкість сталі Т91 у 34 рази вища, ніж сталі Eurofer 97 та в 11 разів вища, ніж традиційно використовуваної аустенітної сталі Cr18Ni10Ti. Сталь Т91, легована молібденом і ніобієм, на відміну від феритно-мартенситної сталі Eurofer 97, легованої вольфрамом і танталом, має більші розмір наслідкового аустенітного зерна (20 проти 6 μm), довжину і ширину мартенситних пакетів (30...40 і 3...10 проти 10...20 і 2...4 μm, відповідно) та мікротвердість (2,47 проти 2,07 GPa).

Ключові слова: феритно-мартенситна сталь, структура, твердість, кавітаційна ерозія, зношування.

Максименко О. П., Семенець О. І., Гвоздюк М. М., Знова В. А., Іваницький Я. Л.
Розподіл напружень змінання у багаторядних заклепкових з'єднаннях.....84

На основі безконтактних оптичних методів визначення деформацій запропоновано експериментальну методику оцінювання напружень змінання у багаторядних заклепкових з'єднаннях дюралюмінієвих пластин. За результатами випробувань зразків з однією заклепкою побудовано діаграму руйнування локального об'єму в координатах напруження–деформація і встановлено допустиме напруження змінання, що відповідає залишковій овалізації отвору на 2%. За дефор-

мацією в локальному об'ємі одиничного заклепкового з'єднання із цієї діаграми розраховано напруження змінання в околі окремих заклепок багаторядного з'єднання. Методика придатна для встановлення розподілу напружень змінання та ступеня пошкодження у заклепкових з'єднаннях обшивки фюзеляжу літака.

Ключові слова: овалізація отвору, цифрова кореляція зображень, допустиме напруження змінання, заклепкове з'єднання.

Станкевич В. З., Бойко В. М., Терещак Ю. В. Усталені коливання пружного біматеріалу з тонким податливим прошарком та круговою тріщиною.....90

Розв'язано задачу про усталені в часі коливання пружного біматеріалу з двох півпросторів, спряжених тонким податливим прошарком, та з круговою тріщиною закруту. Пружний прошарок змодельовано інтерфейсною фізичною площиною зі заданими на ній пружинними крайовими умовами. Для розв'язування задачі використано метод граничних інтегральних рівнянь. У низькочастотній області коливань встановлено вплив фізичних, геометричних параметрів біматеріалу та прошарку на динамічні коефіцієнти інтенсивності напружень в околі контуру тріщини.

Ключові слова: біматеріал, тонкий податливий прошарок, тріщина, усталені коливання, метод граничних інтегральних рівнянь.

Гарматій Г. Ю., Калиняк Б. М. Вплив термочутливості матеріалів на термонапружений стан тришарового порожнистого циліндра за конвективного теплообміну.....97

Розв'язано незв'язану квазістатичну осесиметричну задачу термопружності для нескінченного тришарового порожнистого циліндра з урахуванням залежності від температури термомеханічних характеристик ізотропних матеріалів кожного шару. Враховано складний теплообмін середовищ зі змінною в часі температурою. Використано числові та наближені аналітичні методи для розв'язування задачі. Досліджено вплив температурної залежності термомеханічних характеристик вибраних матеріалів шарів на термонапружений стан тришарового циліндра.

Ключові слова: термочутливість, теплопровідність, термопружність, шаруваті тіла, конвективний теплообмін.

Шопа Т. В., Тужеляк О. І. Поперечні коливання ортотропної пластини з абсолютно жорсткими включеннями за врахування розподіленого навантаження на її поверхні..... 105

Побудовано розв'язок задачі про усталені поперечні коливання ортотропної пластини складної форми з множиною абсолютно жорстких включень різної конфігурації за врахування гармонічного в часі довільного розподіленого навантаження на поверхні пластини на основі непрямого методу граничних елементів з використанням послідовнісного подання функцій Гріна. Застосовано уточнену теорію пластин, яка враховує поперечні зсуви та інерційні компоненти. Розглянуто різні типи з'єднань включень з пластиною та мішані гармонічні в часі крайові умови на зовнішній межі пластини. Вважаємо, що включення здійснюють переважно поступальний рух у нормальному напрямку до серединної поверхні пластини. Наведено тестові числові результати для часткових випадків задачі.

Ключові слова: коливання, ортотропна пластинка, включення, розподілене навантаження, непрямий метод граничних елементів.

Журавель І. М., Мичуда Л. З. Моделювання мікроструктури сталі 12Х1МФ з урахуванням її різнозернистості.....112

Розроблено метод моделювання меж зерен мікроструктури сталі 12Х1МФ на основі усередненого діаметра зерен металу та врахування його різнозернистості. Для візуалізації запропонованої моделі зеренної структури сталі 12Х1МФ застосовано діаграми Вороного. Метод перевірено із використанням фрактальних розмірностей. Встановлено, що фрактальні розмірності зображень меж зерен реального та модельованого зображень відрізняються на 1,12%.

Ключові слова: металографічне зображення, усереднений діаметр зерна металу, різнозернистість матеріалу.

Труш В. С., Погрелюк І. М., Кравчишин Т. М., Лук'яненко О. Г., Стоєв П. І., Федірко В. М., Ковальчук І. В. Кінетичні особливості азотування сплаву Zr-1% Nb.....117

Досліджено кінетику азотування ($P_{N_2} = 10^5$ Pa) тонколистових зразків (~ 1 mm) зі сплаву Zr-1% Nb у широкому температурному ($T = 550; 650; 750; 850$ і 950°C) та часовому ($\tau = 1; 5$ і 10 h) діапазонах. Виявлено, що азотування відбувається за законом, наближеним до параболічного ($n \approx 2$). Встановлено, що енергія активації азотування сплаву в інтервалі $550\text{...}950^\circ\text{C}$ становить $131,8$ kJ/mol. Оцінено мікроструктуру приповерхневого шару сплаву після азотування, а також розподіл його приповерхневої твердості. Побудовано діаграму інтенсивності рефлексів фаз $\alpha\text{-Zr}$ і ZrN на поверхні сплаву після азотування.

Ключові слова: сплав Zr-1%Nb, азотування, приповерхневий шар, мікроструктура, кінетика зміни маси, мікротвердість, параметри кристалічної ґратки.

Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Тараненко А. О. Структура та опір руйнуванню сталей у різних зонах залізничних осей.....124

Досліджено втомну довговічність та мікроструктуру залізничних осей з особливостями макроструктури, виявленими за допомогою ультразвукового контролю (вісь № 178), та без таких особливостей (вісь № 143) марки EA1N, виготовлених за стандартом EN 13261:2020. Порівняльно оцінено відповідні зразки, відібрані поблизу поверхні, на відстані $1/2$ радіуса та у центрі осей. Встановлено, що втомна довговічність металу поверхневого шару вища, ніж на глибині та у центральній частині. При цьому перепад значень за перерізом осі з дефектами склав до 10%, у той час як для осі без дефектів втомна довговічність металу поблизу поверхні майже в п'ять разів більша, ніж зразків, вирізаних з центра. За результатами мікроструктурного та фрактографічного аналізів встановлено пряму залежність виникнення втомних тріщин від розміру та кількості неметалевих включень, мікропор у сталі та структурної неоднорідності.

Ключові слова: залізнична вісь, втомна довговічність, мікроструктура, мікропора, фрактографія.

Мисливченко О. М., Горбань В. Ф., Самелюк А. В., Крапівка М. О. Вплив бору на структуру та фізико-механічні властивості високоентропійного сплаву $\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{25}\text{Hf}_{15}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}$129

Використано метод дугового переплаву для отримання високоентропійного бориду за додавання порошку бору до сплаву $\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{25}\text{Hf}_{15}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}$. За допомогою рентгеноструктурного аналізу визначено, що сплав $\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{25}\text{Hf}_{15}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}$ є одно-

фазним (з об'ємноцентрованою кубічною структурою (ОЦК)), а основною фазою сплаву $Ti_{15,8}Zr_{13,4}Hf_{7,8}Nb_{10,5}Ta_{5,3}V_{47,2}$ є борид типу MeB та незначна кількість двох твердих розчинів з ОЦК та гексагональною щільноупакованою структурами. Проаналізовано мікроструктуру отриманих сплавів та показано, що введення бору призводить до ліквідації компонентів сплаву, а також зростання твердості з 3,5 до 33,5 GPa, модуля пружності з 75 до 290 GPa, границі плинності з 1,06 до 10,28%.

Ключові слова: *дуговий переплав, високоентропійний моноборид металу, рентгеноструктурний аналіз, мікроструктура, механічні властивості.*

ЮВІЛЕЇ

Михайло Петрович Саврук (до 80-річчя від дня народження)..... 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, № 3, 2022

May – June

CONTENTS

*Khoma M. S., Vynar V. A., Ratska N. B., Patsai I. O., Pokhmurskii V. I.
and Yurkevych R. M.* Corrosion and tribocorrosion of 07X16H6 steel
in hydrogen sulfide media.....5

The influence of hydrogen sulfide concentration (0...1500 mg/dm³) in chloride-acetate solutions on corrosion processes, hydrogenation and corrosion-mechanical wear of 07X16H6 steel has been studied. It is found that the corrosion resistance of steel in chloride-acetate solutions, regardless of the hydrogen sulfide content, is much lower than in the medium without hydrogen sulfide, in which its passivation is manifested. Corrosion products are formed on the surface of steel, consisting of oxide-sulfide compounds, the thickness of which increases with increasing hydrogen sulfide concentration and at a hydrogen sulfide concentration of 1500 mg/dm³ their upper layer loses continuity. The tribocorrosion characteristics of steel at hydrogen sulfide concentrations of 100 and 500 mg/dm³ do not change significantly, and at 1000 and 1500 mg/dm³ they decrease by ~ 30%. Corrosion processes have a decisive influence on the corrosion and mechanical wear of steel in environments with different hydrogen sulfide content, which is associated with hydrogenation of surface layers and intensive restoration of homogeneous oxide-sulfide films on the surface of friction tracks during frictional contact.

Keywords: *steel 07X16H6, corrosion, hydrogenation, tribocorrosion, chloride-acetate solution, hydrogen sulfide, concentration.*

Vasylyiv Kh. B., Chuchman M. R., Ivashkiv V. R., Datsko B. M., and Rizun Yu. Ya.
The influence of temperature and pressure of hydrogen sulfide
and carbon dioxide gas on corrosion of pipe steel of strength
group Q125 in model stratal water.....13

It is shown, that the corrosion rate of steel Q125 in model brine water (MBW), saturated with CO₂, increases over time, indicating that carbonate films do not protect the steel against corrosion. Corrosion processes are accelerated at $t = 60^{\circ}\text{C}$ and $P_{\text{CO}_2} = 6 \text{ MPa}$ and corrosion changes from uniform to ulcerative one. The corrosion rate of steel in short-term tests in MBW+CO₂+H₂S is proportional to the concentration of H₂S in the solution and is determined by the cathode process rate. The mechanism of corrosion does not depend on the concentration of hydrogen sulfide in solution. Long-term studies in MBW+CO₂+H₂S show, that the corrosion rate of steel Q125 decreases

~ 2 times compared with one in MBW+CO₂ under normal conditions and 10–15 times at

$t = 60^{\circ}\text{C}$ and $P_{\text{CO}_2} = 6 \text{ MPa}$. The surface films of a mixture of maquisite, troilite and impurities of oxides and hydroxides of iron are formed on the steel surface. The sulfide film is more compact, than carbonate film, and the corrosion rate is reduced. However, due to the porosity, the protective properties of sulfides are not effective enough.

Keywords: pipe steel, hydrogen sulfide, carbon dioxide, model brine water, corrosion, microstructure.

Hertsyk O. M., Kovbuz M. O., Hula T. H., Yezerska O. A., Kornii S. A.,
and Pandiak N. L. Electrochemical characteristics of Fe_{78.5}Ni_{10.1}Mo_{0.5}Si_{14.0}B_{6.0}
amorphous alloy for different nature of aggressive environment.....20

The influence of the nature of the aggressive environment on the corrosion resistance of the Fe_{78.5}Ni_{10.1}Mo_{0.5}Si_{14.0}B_{6.0} amorphous metal alloy is investigated by various electrochemical methods. The electrochemical characteristics of the alloy in 0.5 M aqueous solutions of NaCl, HCl, KOH and H₂SO₄ at $T = (293 \pm 1) \text{ K}$ are determined. It is shown that the corrosion resistance of amorphous material significantly depends on the component composition of the aggressive medium. The formation of dense passivation layers on the surface of Fe_{78.5}Ni_{10.1}Mo_{0.5}Si_{14.0}B_{6.0} in alkaline solution is established.

Keywords: amorphous alloys, corrosion resistance, electrochemical characteristics, cyclic polarization, electrochemical impedance spectroscopy.

Maksymova S. V., Zvolinsky I. V., Nyrkova L. I., and Osadchuk S. O. Comparison
of the corrosion resistance of welded and brazed joints
from galvanized 08Ю steel.....26

Corrosion resistance of the permanent joints made of 08Ю steel obtained by different methods: MAG (Metal Active Gas) welding, TIG (Tungsten Inert Gas) brazing, plasma brazing and brazing using the CMT (Cold Metal Transfer) process is studied. It has been established that the brazing using the CMT-process provides the highest electrochemical homogeneity of the permanent joint and high corrosion resistance of the brazed joint in the conditions under study.

Keywords: galvanized steel 08Ю, SMT-brazing, plasma, MAG-welding, corrosion resistance, electrochemical heterogeneity, corrosion potential, filler wire, zinc filler metal.

Gubenko S. I. The influence of laser treatment of steel surface on the initiation
of corrosive damages near the non-metallic inclusions.....33

The effect of laser action on the initiation and propagation of corrosion damages in steels near non-metallic inclusions has been investigated. It has been established that laser treatment enhances the corrosion resistance in low-cycle fatigue of steels containing various inclusions. It is shown that the effect of laser treatment on increasing the resistance of steels against the formation of corrosion damages is associated with a change in the state of the inclusion-matrix interphase boundaries, which contributes to a decrease in their permeability for corrosive elements and an increase in the cohesive strength of these boundaries in active media.

Keywords: steel, non-metallic inclusions, laser treatment, corrosion, boundaries of inclusion–matrix, low-cycle durability.

<i>Muravsky L. I., Zin I. M., Bilyi L. M., Haskevych H. I., and Surjadova O. D.</i>	
Monitoring of paint coating using digital speckle pattern interferometry technique.....	38

The influence of liquid aggressive medium on a polyurethane paint coating (PC) by the electronic speckle pattern interferometry technique was studied. An experimental setup based on the Twiman–Green interferometer for corrosion monitoring of the PC was created. This setup was used for recording and subsequent processing the difference patterns of speckle interferograms (SI) of the coating surface during the action of 3% NaCl solution on it for 7; 14 and 21 days. It was shown that difference patterns of SI can be used to estimate the temporal changes in the deformed state of the PC surface and the growth rate of corrosion defects and delaminations.

Keywords: *polyurethane paint coating, corrosion monitoring, digital speckle pattern interferometry, liquid corrosive medium, speckle interferogram, corrosion defects and delaminations.*

<i>Hembara O. V., Chepil O. Ya., Hembara N. T., and Syrotyuk A. M.</i>	
Assessment of metal hydrogenation effect on life time of heat-exchange pipes of steam generators.....	44

The stress-strain state of bending of heat-exchange tubes of steam generators made of stainless heat-resistant chromium-nickel 08X18H10T steel is analyzed numerically under simulating operating conditions, taking into account the saturation of the tube metal with hydrogen. It has been established that the preliminary deformation of the metal in the heat exchange tube bend reduces the pipe durability by 19% compared to the straight section; when exposed to a hydrogen-containing medium, under the influence of hydrogen-containing environment the durability in the pipe bend decreases by an additional 12%.

Keywords: *hydrogenation of metal, creep, deformation energy, damage, durability, hydrogen-containing medium.*

<i>Orynyak I. V., Mazuryk R. V., Marchenko V. V., and Oryniak A. I.</i>	
Targeted method of statistical processing of experimental results of defected pipes rupture tests.....	49

Statistical methods for a comparative analysis of the accuracy of formulas to assess residual strength of ductile pipes with rectangular surface defects are developed. In the available approaches the accuracy of formulas is established for a whole range of experiments as one common value, while in this study – separately for each given defect size (point of interest). For each experiment its weight is calculated, not larger than unity, for each point of interest. Statistical analysis of formulas accuracy is performed for each point of interest. This allows us to smooth experimental errors and to determine the error of the formula itself more accurately.

Keywords: *corrosion defect, residual strength, pipe, internal pressure, model error.*

<i>Vasylyv B. D., Podhurska V. Ya., Ostash O. P., Danilenko I. A., and Shylo A. V.</i>	
Improvement of strength of anode-substrate material of hydrogen and hydrocarbonic solid oxide fuel cells.....	59

The microstructure, strength and fracture micromechanisms of 50%(ZrO₂–4 mol% Y₂O₃–2 mol% CeO₂–2 wt.% Al₂O₃)–50% (NiO–5 wt.% CuO) ceramics in the as-sintered state, after one-time reduction and after developed cyclic redox treatment at 600°C in Ar–5 vol.% H₂ and N₂–10 vol.% H₂–5 vol.% CO₂ gas mixtures have been studied. It is shown that the increased strength of cermets of this system is due to lowering Y₂O₃ content from traditional 8mol% to 4mol%, as well as about 2 time decrease in grain size of the initial nickel phase after redox cycling. The efficiency of

such treatment to improve the properties of the anode-substrate for hydrogen and hydrocarbon solid oxide fuel cells is confirmed.

Keywords: *ceramics of ZrO_2 - Y_2O_3 - CeO_2 - Al_2O_3 - NiO - CuO system, redox cycling, hydroge-containing environment, carbon dioxide, strength.*

Berezovets V. V., Kytsya A. R., Zasadnyy T. M., Zavaliiy I. Yu., and Yartys V. A.

Hydrogen generation by hydrolysis of mixtures of magnesium hydride with citric acid.....66

A composite based on magnesium hydride and citric acid is obtained by mechanical milling and used for hydrogen generation. Magnesium hydride is synthesized by reactive milling of magnesium in hydrogen gas. The resulting composite material is characterized by a more rapid release of hydrogen as compared to a pure MgH_2 . Hydrogen release from a $MgH_2 \cdot 5C_6H_8O_7$ sample is completed in 1 min and yields 300 ml. The influence of the composite composition on the rate and extent of the hydrolysis of MgH_2 is studied and optimized for its use for hydrogen generation. The promoting influence of citric acid on the hydrolysis of magnesium hydride is analyzed.

Keywords: *magnesium hydride, citric acid, mechanochemical ball milling, hydrolysis.*

Verbovytskyy Yu. V. Interaction of the components and crystal structure

of the compounds in the Eu-Zn-Ga system.....72

The phase equilibria in the ternary Eu-Zn-Ga system have been established for the partial isothermal section in the range of europium concentration 0...33.3 at.% at 400°C. X-ray powder diffraction and scanning electron microscopy, complemented with energy dispersive X-ray spectroscopy are used to identify the phases and investigate their crystal structures and compositions. The phase equilibria of this Eu-Zn-Ga partial section at 400°C are characterized by the formation of four extended homogeneity ranges, gallium solubility in $EuZn_{13}$, $EuZn_{11}$ and $EuZn_5$ and of zinc solubility in $EuGa_4$, one continuous $EuZn_2$ - $EuGa_2$ solid solution, and the existence of one ternary intermetallic compound, $EuZn_xGa_{3-x}$, $x = 0.15$. This new compound crystallizes in the $CeNiSi_2$ structure type (space group $Cmcm$), with $a = 4.2900(6)$ Å, $b = 18.405(2)$ Å, $c = 4.3836(7)$ Å. The studied partial isothermal section has eight ternary phase fields at 400°C.

Keywords: *europium compounds, zinc compounds, gallium compounds, intermetallics, sintering, ternary system, phase equilibria, crystal structure.*

Rostova H. Yu., Tolstolutska G. D., Vasilenko R. L., Kolodiy I. V., Kovalenko V. I.,

Marinin V. G., Tikhonovsky M. A., and Kuprin O. S. Cavitation wear

of T91 ferritic-martensitic steel.....79

The microstructure, hardness and cavitation wear of the T91 ferritic-martensitic steel were studied and compared with other reactor steels of the Eurofer 97 and Cr18Ni10Ti grades. It is found that the cavitation resistance of T91 steel is 34 times higher than that of Eurofer 97 steel and 11 times higher than traditionally used Cr18Ni10Ti austenitic steel. The T91 steel alloyed with molybdenum and niobium, in contrast to Eurofer 97 ferritic-martensitic steel alloyed with tungsten and tantalum, has larger prior austenite grain size (20 vs. 6 µm), length and width of martensitic packets (30...40 and 3...10 vs. 10...20 and 2...4 µm, respectively) and microhardness (2.47 vs. 2.07 GPa).

Keywords: *ferritic-martensitic steel, structure, hardness, cavitation erosion, wear.*

<i>Maksymenko O. P., Semenets O. I., Hvozdyuk M. M., Znova V. A., and Ivanytskyi Ya. L. Crumpling stress distribution in multi-row riveted joints.....</i>	84
--	----

An experimental technique for estimating the crumpling stresses in multiple-row riveted joints of duralumin plates based on non-contact optical methods is proposed. According to the results of experimental investigation of samples with one rivet, a fracture diagram of the material local volume is constructed in the stress-strain coordinates and the allowable crumpling stress is determined, which corresponds to a residual elongation of the hole by 2%. According to the determined deformation in the local volume of a single rivet joint, the bearing stress near individual rivets of multiple-row joints is calculated. The technique can be used to establish the bearing stress distribution and the degree of damage in the rivet joints of the aircraft fuselage skin.

Keywords: *hole elongation, digital image correlation, allowable bearing stress, rivet joint.*

<i>Stankevych V. Z., Boiko V. M., and Tereshchak Yu. V. Steady-state oscillations of an elastic bimaterial with a thin compliant layer and a circular crack.....</i>	90
--	----

The problem of the steady-state vibrations of an elastic bimaterial consisting of two half-spaces conjugated by a thin soft layer and with a circular torsion crack is solved. The elastic layer is modeled by an interface physical plane with given spring boundary conditions. To solve the problem, the method of boundary integral equation is used. In the low-frequency region of vibrations, the influence of the physical and geometric parameters of the biomaterial and the interlayer on the values of dynamic stress intensity factors in the vicinity of the crack contour is shown.

Keywords: *bimaterials, thin compliant layer, crack, harmonic oscillations, boundary integral method equations.*

<i>Harmatiy G. Yu. and Kalynyak B. M. The influence of thermal sensitivity of materials on the thermostressed state in a three-layer hollow cylinder with convective heat exchange.....</i>	97
---	----

The quasi-static axisymmetric thermoelasticity problem for an infinite three-layer hollow cylinder is solved, taking into account the temperature dependence of the thermo-mechanical characteristics of the isotropic materials in each layer. The complex heat exchange of media with variable temperature over time is taken into account and numerical. The numerical and approximate analytical methods are used to solve the problem. The influence of temperature dependence of thermomechanical characteristics of selected layer materials on the thermal stress state of a three-layer cylinder is investigated.

Keywords: *thermal sensitivity, thermal conductivity, thermal elasticity, layered bodies, convective heat transfer.*

<i>Shopa T. V. and Tuzheliak O. I. Transverse vibrations of orthotropic plate with absolutely rigid inclusions taking into account distributed load on its surface.....</i>	105
---	-----

The solution of the problem of steady-state transverse vibrations of an orthotropic plate of complex shape with a set of absolutely rigid inclusions of different configuration taking into account harmonic in time arbitrary distributed load on the surface of the plate is constructed on the basis of the indirect boundary elements method using sequential representation of the Green's functions. The refined plate theory which takes into account transverse shear deformation and inertial components is used. Different types of connections of inclusions with the plate and mixed harmonic in time

boundary conditions on the outer boundary of the plate are considered. Inclusions are assumed to perform predominantly translational motion along the normal direction to the middle surface of the plate. Test numerical results for partial cases of the problem are presented.

Keywords: *vibrations, orthotropic plate, inclusions, distributed load, indirect boundary elements method.*

Zhuravel I. M. and Michuda L. Z. Modeling of 12X1MΦ steel microstructure with account of its granularity.....112

A method for modeling the microstructure of steel by the average grain diameter of the metal and its different grain size is proposed. Voronoy diagrams are used for visual modeling of the grain structure of 12X1MΦ steel. The developed method provides the same metric characteristics of real and simulated images of the microstructure, namely: the average grain diameter, the number of grains in the image, the distribution histogram and others. The proposed method is verified using fractal dimensions. It is established that the fractal dimensions of the grain boundaries of real and simulated images differ by 1.12%.

Keywords: *metallographic image, the average diameter of the metal grain, different grain size of the material.*

Trush V. S., Pohrelyuk I. M., Kravchyshyn T. M., Luk'yanenko A. G., Stoev P. I., Fedirko V. M., and Kovalchuk I. V. Kinetics peculiarities of Zr–1% Nb alloy nitriding.....117

The kinetic characteristics of thin-sheet (~ 1 mm) samples from the Zr–1% Nb alloy after treatment in a nitrogen medium ($P_{N_2} = 10^5$ Pa) in a wide temperature ($T = 550; 650; 750; 850$ and 950°C) and time ($\tau = 1; 5$ and 10 h) ranges are investigated. It is determined that the nitriding of the alloy under study occurs according to a rule close to parabolic ($n \approx 2$). It has been established that the activation energy of nitriding of the alloy in the temperature range of $550...950^\circ\text{C}$ is 131.8 kJ/mol. The microstructure of the near-surface layer of the alloy after nitriding is given. The distribution of near-surface microhardness on the Zr–1% Nb alloy is proposed. The diagram of the phases reflexes intensity of α -Zr and ZrN on the surface of the alloy after treatment in a nitrogen gaseous medium is presented.

Keywords: *Zr–1% Nb alloy, nitriding, surface layer, microstructure, mass change kinetics, microhardness, crystal lattice parameters.*

Babachenko O. I., Kononenko H. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A., and Taranenko A. O. Structure and fracture resistance of steels in different zones of railway axles.....124

The fatigue life and microstructure of railway axles with macrostructural features detected by ultrasonic testing (axle № 178) and without such features (axle № 143) of EA1N grade, manufactured according to standard EN 13261:2020, have been studied. A comparative analysis of the relevant samples taken near the surface, at a distance of $1/2$ radius and in the center of the studied railway axles has been done. It is shown that the metal of the surface layer of the studied axles has higher values of fatigue life compared to the metal at a depth of $1/2$ of the axles radius, and in its central part. The difference in the values of the cross-section of the axles with defects is up to 10%, while for the axle without defects the value of fatigue life of the metal near the surface is almost 5 times greater than the samples cut out from the center. Based on the results of microstructural and fractographic analyses, the direct dependence of fatigue cracks on the size and number of non-metallic inclusions, micropores in steel and structural inhomogeneity has been established.

Keywords: *railway axle, fatigue life, microstructure, micropore, fractography.*

Myslyvchenko O. M., Gorban' V. F., Samelyuk A. V., and Krapivka M. O.

The Influence of boron on the structure and physicommechanical properties
of high-entropy $\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{25}\text{Hf}_{15}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}$ alloy..... 129

Using the arc melting method, a high-entropy boride is obtained by adding boron powder to the $\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{25}\text{Hf}_{15}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}$ alloy. X-ray diffraction analysis showed that $\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{25}\text{Hf}_{15}\text{Nb}_{20}\text{Ta}_{10}$ alloy is single-phase body-centered cubic (BCC) structure and the main phase of $\text{Ti}_{15.8}\text{Zr}_{13.4}\text{Hf}_{7.8}\text{Nb}_{10.5}\text{Ta}_{5.3}\text{B}_{47.2}$ alloy is MeB boride and a small amount of BCC and hexagonal close-packed (HCP) structures. The microstructure of the obtained alloys is analyzed and it is shown that the addition of boron leads to the segregation of the constituent components of the alloy. The addition of boron increases the hardness from 3.5 to 33.5 GPa, the elastic modulus from 75 to 290 GPa, and the yield point from 1.06 to 10.28%.

Keywords: *arc-melting, high entropy metal monoboride, X-ray crystal analysis, microstructure, mechanical properties.*

JUBILEES

Mykhailo Petrovych Savruk (to the 80th birthday)..... 133