

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, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТРЕНКО, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, А. М. СИРОТЮК, О. З. СТУДЕНТ, Г. Т. СУЛИМ, 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. 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. DURAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN, R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, L. M. LOBANOV, P. O. MARUSCHAK, O. P. OSTASH, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, A. M. SYROTYUK, O. Z. STUDENT, H. T. SULYM, M. S. KHOMA, O. E. CHYHYRYNETS, V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRULNYK

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)

Ідентифікатор друкованого медіа в Реєстрі – R30-03732

Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. Г. М. Никифорчин

Responsible for issue Dr. (Eng.), Prof. H. M. Nykyforchyn

Прийняття до друку статей та коротких викладів здійснюється
на підставі незалежного анонімного рецензування

Передплатний індекс 22574

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. Тел.: (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. Колчак, Г. М. Кулик

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,
“ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ”, 2024

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

ТОМ 60, № 2, 2024

березень – квітень

ЗМІСТ

Корній С. А., Зінь І. М., Хлопик О. П., Соболюш Н. Й. Інгибування корозії алюмінієвого сплаву Д16Т композицією натрію альгінату та цинку ацетату в нейтральному хлоридовмісному середовищі.....5

Вивчали вплив екологічно безпечної інгібувальної композиції на основі полісахариду (натрію альгінату) та солі ацетатної кислоти (цинку ацетату) на корозію алюмінієвого сплаву у нейтральному хлоридовмісному середовищі. На підставі електрохімічних досліджень встановлено протикорозійну ефективність композиції та особливості механізму її захисної дії. Ступінь захисту металу альгінат-ацетатною композицією, розрахований за поляризаційними залежностями, становив 89...98%. Протикорозійний ефект композиції пояснено утворенням захисної плівки на поверхні сплаву внаслідок адсорбції альгінату, осадженням цинку на катодних ділянках металу та, ймовірно, утворенням малорозчинних Al^{3+} - Zn^{2+} -альгінатних комплексів. Формування захисної плівки на поверхні сплаву в інгібованих розчинах підтверджено результатами електрохімічної імпедансної спектроскопії, сканівної електронної мікроскопії та енергодисперсійного рентгенівського аналізу.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, корозія, хлоридовмісне середовище, інгібувальна композиція, натрій альгінат, цинк ацетат, протикорозійна ефективність.

Винар В. А., Чучман М. Р., Хома М. С., Івашиків В. Р., Василів Х. Б., Гураль Т. О., Буклів Р. Л., Рудковський Є. М. Причини пришвидшеної корозії колтюбінгових труб за кислотного промивання свердловини газового родовища.....14

Досліджено причини аномально високої швидкості корозії колтюбінгової сталі НТ-95 за кислотного промивання газової свердловини Полтавського басейну. Зазвичай корозійні втрати колтюбінгової сталі не перевищують 3,6 mm/year завдяки інгібітору корозії у складі промивного розчину. Виявлено, що після кислотної обробки газової свердловини швидкість корозії сталі збільшилася на три порядки. Показано, що корозія сталі пришвидшується внаслідок нейтралізації дії інгібітора та зміни характеру корозії металу, зумовленої високою концентрацією окиснювачів типу оксидів заліза (III) Fe_2O_3 у свердловині. За взаємодії Fe_2O_3 з хлоридною кислотою промивного розчину утворюється хлорид

заліза $FeCl_3$, який частково нейтралізує дію інгібітора, що пришвидшує корозію сталі.

Ключові слова: колтюбінгові труби, корозія, сталь, кислотне промивання свердловини, інгібітор.

Шендрік Т. Г., Дунаєвська Н. І., Фатеев А. І. Високотемпературна корозія металу під час спалювання вугілля з підвищеним вмістом солей.....20

Проаналізовано сучасні механізми розвитку корозійних процесів під час спалювання вуглецевої сировини (відходи біомаси, вугілля різного метаморфізму) з високим вмістом (у золі $\geq 2\%$ Na_2O) легкоплавких солей та сірки. Визначено морфологічні особливості налипань на поверхні металу під впливом газів високотемпературного спалювання солоного вугілля (СВ) до та після знесолення, а також склад продуктів корозії феритної сталі під час озолення СВ та його суміші з енергетичним газовим вугіллям. Експериментально виявлено, що екстракція водорозчинних сполук з СВ (на прикладі родовищ Північного Донбасу) та його суміш з вугіллям низької солоності суттєво знижують корозію поверхонь нагріву під час спалювання.

Ключові слова: солоне вугілля, спалювання, шлакування, корозія, вугільна суміш.

Костін О. М., Мартиненко В. О. Особливості високотемпературної сольової корозії сплаву $Ni(L)-Hf-Cr_3C_2$29

Розроблення зносотривких матеріалів із високим опором високотемпературній сольовій корозії – актуальна проблема суднового газотурбобудування. Тут перспективний сплав $Ni(L)-Hf-Cr_3C_2$, який додатково містить 16,5...17,5 wt% гафнію. Легування гафнієм забезпечує структуру, максимально наближену до евтектичної, з температурою плавлення $1200 + 10^\circ C$, яка має стабільну твердість у межах 649...665 HV_{10} та середню швидкість корозії 0,18 $mg/(cm^2 \cdot h)$ у середовищі 75% $Na_2SO_4 + 25\% NaCl$ при $900^\circ C$. Тому цей сплав рекомендують як основу для зміцнення контактних поверхонь деталей суднових газотурбінних двигунів.

Ключові слова: нікелевий сплав, мікроструктура, мікротвердість, зносотривкість, високотемпературна сольова корозія.

Веселівська Г. Г., Проскурняк Р. В., Курпрін О. С., Машовець Н. С. Електрохімічна поведінка поверхнево-модифікованого технічно чистого титану у розчині Рінгера.....35

Досліджено покриття TiN , отримане вакуумно-дуговим напиленням на поверхню технічно чистого титану VT1-0 та термодифузійним насиченням в атмосфері азоту. Покриття оцінювали за їх корозійною тривкістю у фізіологічному розчині Рінгера електрохімічними методами. Виявлено, що покриття TiN має вдвічі нижчу густину струму корозії, ніж необроблений титан, водночас азотована поверхня без та з покриттям TiN меншу лише на 6 та 20%, відповідно. Найвищу корозійну тривкість має покриття TiN , осаджене на необроблений титан, а найнижчу – азотована поверхня. Незважаючи на таке ранжування, корозійна тривкість всіх досліджених покриттів є вищою, ніж необробленого титану VT1-0. Тому, з огляду на високу електрохімічну стабільність у розчині Рінгера, який містить Cl^- -іони, простоту технології модифікування поверхні та її нетоксичність, нітридні покриття перспективні для застосування в медицині.

Ключові слова: титан VT1-0, вакуумно-дугове напилення, термодифузійне насичення, покриття TiN , корозійна тривкість, розчин Рінгера.

<i>Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Цирульник О. Т.</i> Вплив електрохімічного наводнювання на пластичність та об'ємну мікропошкодженість сталі 60С2А.....	43
---	----

Показано, що середньовуглецева сталь 60С2А є чутливою до електрохімічного наводнювання у водних розчинах за кімнатної температури, що призводить до суттєвої втрати її пластичних характеристик. За результатами механічних випробувань циліндричних зразків одноісним розтягом, встановлено, що за зміни концентрації водню у сталі у діапазоні 0,3...5,0 ppm відносні видовження та звуження знижуються приблизно у три рази. Виявлено, що за ударного навантаження об'ємна мікропошкодженість сталі 60С2А розвивається лише за її наводнювання у розчинах з рН=1 і нижче. Критеріальним параметром стану матеріалу тут слугує енергія ударного навантаження E триточковим згином гладких балкових зразків, зниження якої свідчить про зростання інтенсивності пошкоджень, спричинених воднем. Показано кореляційну залежність між параметром E та концентрацією залишкового (пасткованого) водню C_H у металі. Одержані результати можна використовувати для розроблення технологічних процесів, які підвищать рівень фрагментації конструкційних середньовуглецевих сталей.

Ключові слова: *середньовуглецева сталь, електрохімічне наводнювання, концентрація водню, статичне навантаження, характеристики пластичності, динамічне навантаження, енергія руйнування, об'ємна пошкодженість.*

<i>Звірко О. І., Никифорчин Г. М., Кречковська Г. В., Венгринюк О. І.</i> Оцінювання напружень від електролітичного наводнювання трубної вуглецевої сталі.....	50
--	----

Встановлено, що внутрішня корозія сталей газопроводів може супроводжуватися електрохімічним наводнюванням, а транспортування ними водню посилювати цей процес. Розроблено методику дослідження напружень у сталі, спричинених воднем, яка полягає у попередньому жорсткому навантаженні зразків у пружній чи пластичній областях, електролітичному наводнюванні та реєстрації напружень. У трубній сталі 17Г1С (аналог АРІ 5L X52) виявлено внутрішні розтягувальні напруження під дією водню, амплітуда та оборотність яких залежали як від інтенсивності наводнювання, так і характеру попереднього навантаження. Отримані результати проаналізовано з урахуванням різного стану водню в сталі – дифузійно рухливого та пасткованого в дефектах мікроструктури.

Ключові слова: *трубна сталь, режими електролітичного наводнювання, напруження, механізм водневого окрихчення.*

<i>Макаренко В. Д., Чигиринець О. Е., Винников Ю. Л., Гоц В. І., Максимов С. Ю., Піпа В. В., Макаренко Ю. В.</i> Дослідження впливу кінетики наводнювання на сульфідне корозійне розтріскування сталей суднобудівного призначення.....	57
--	----

Оцінено кінетику наводнювання і механізми сульфідного корозійного розтріскування тривало експлуатованих трубних суднобудівних сталей 15ХСНД і D32. Виявлено, що з тривалістю експлуатації вони інтенсивно наводнюються від внутрішньої поверхні труби, концентрація водню переважає першопочаткові значення в 2–2,5 рази. Така ж тенденція зміни мікротвердості в перерізі стінки металу труб з різними термінами експлуатування. Її значення в приповерхневих шарах від зовнішнього боку труби зростають у 1,5–2 рази. З підвищенням напружень за випроб на корозійне сульфідне розтріскування в середовищі НАСЕ різко збільшується наводнювання зразків (приблизно в 2–3 рази), що спричиняє сильне окрихчення (підвищення мікротвердості металу) і зменшення опору розтріскуванню.

Ключові слова: *суднобудівна сталь, деградація, наводнювання, мікротвердість, тріщиностійкість.*

Кирилів В. І., Максимів О. В., Гурей І. В., Ціж Б. Р., Гурей В. І., Кулик Ю. О.

Вплив моди деформації та наводнювання на механічні властивості сталі 40Х з поверхневою наноструктурою.....63

Вивчено вплив одно- та різнонапрявленої мод інтенсивної пластичної деформації, генерованої механоімпульсною обробкою, на формування поверхневої нанокристалічної структури сталі 40Х та її фізико-механічні властивості без та після електролітичного наводнювання. Така обробка підвищує границю плинності отриманого матеріалу майже вдвічі, характеристики пластичності змінюються неоднозначно: відносне видовження знижується порівняно з вихідним станом, а відносне звуження за різнонапрявленої деформації збільшується. Взято до уваги зростання модуля пружності та формування рівновісної нанокристалічної структури, яка уможливує перехід інтенсивної пластичної деформації на стадію розвинутої, коли пригнічуються пластичні зсуви і є тільки пластичні розвороти. Встановлено, що після наводнювання різнонапрявлена деформація загалом забезпечує зростання характеристик міцності та зберігає відносне звуження на рівні вихідного матеріалу.

Ключові слова: *поверхнева наноструктура, інтенсивна пластична деформація, фізико-механічні властивості, водень.*

Греділь М. І., Крижанівський Є. І., Демянчук Д. О., Штойко І. П.,

Бартошевський Д. П. Механо-хімічний метод гальмування росту втомної тріщини у металах штучним її закриттям.....70

Досліджено механо-хімічний метод гальмування втомної тріщини, який ґрунтується на подаванні у неї спеціального рідкого технологічного середовища на основі танінів, яке за умов фретингу призводить до інтенсивного формування в її порожнині нерозчинних танатів. Заповнюючи порожнину тріщини, ці сполуки створюють у сталях істотний ефект закриття тріщини аж до її повного гальмування в широкому діапазоні коефіцієнта інтенсивності напружень. Досліджено сплави з різною корозійною тривкістю: вуглецеву сталь 20, нержавну сталь 12Х18Н10Т та технічний титан ВТ1-0. Ефективність методу оцінювали за кінетичними діаграмами втомного росту тріщини. Підтверджено ключову роль закриття тріщини у її гальмуванні. Показано неоднакову ефективність методу для різних металевих матеріалів, що пояснено конкурентним формуванням оксидних плівок, які запобігають утворенню осадів танатів у тріщині.

Ключові слова: *втома, гальмування тріщини, штучне закриття тріщини, танін.*

Чепіль О. Я. Вплив водню на довговічність тонкостінного зразка

за високотемпературної повзучості.....76

Методом скінченних елементів визначено довговічність тонкостінного плоского зразка, виготовленого зі сталі 22К, за впливу водню і повзучості. Порівняно результати, одержані за класичними рівняннями теорії повзучості та енергетичним підходом. Встановлено задовільну їх збіжність. Однак за енергетичним критерієм можна точніше спрогнозувати час до руйнування, ніж за класичними рівняннями.

Ключові слова: *концентрація водню, повзучість, енергія деформування, пошкоджуваність, довготривала міцність.*

Гвоздецький В. М., Студент О. З., Студент М. М., Погрелюк І. М.,
Задорожна Х. Р., Лук'яненко О. Г. Фізико-механічні властивості
електродугового покриття, напиленого в надзвуковому режимі.....81

Встановлено, що механічні властивості та механізм руйнування електродугових покриттів з порошкового дроту (ПД) 90Х17Р2ГС залежать від тиску розпилювального повітря (0,6 та 1,2 МПа). Виявлено, що залишкові напруження розтягу в покритті, отриманому за надзвукової швидкості повітряного потоку (600 м/с), знизилися на 10%, а їх мікротвердість та когезивна міцність зросли на 30 та 200%, відповідно, порівняно з такими для покриття, сформованого за дозвукової швидкості (300 м/с). Поліпшення властивостей покриття за використання для напилування надзвукового повітряного потоку пояснено зменшенням розміру краплин розплаву ПД і, відповідно, товщини закристалізованих на підкладці ламелей, а також товщини оксидів між ними через менш тривалий політ краплин під час напилування та їх слабше високотемпературне окиснення; дисперсійним зміцненням ламелей нанорозмірними часточками боридів (Fe, Cr)₂B; збільшенням частки кризьламельярного руйнування порівняно з міжламельярними розшаруваннями під час випробувань на когезивну міцність.

Ключові слова: дугове напилування, над- і дозвукова швидкість повітряного потоку, порошковий дріт, покриття, мікротвердість, залишкові напруження, когезивна міцність, механізм руйнування.

Труш В. С., Почапський Є. П., Клим Б. П., Кравчишин Т. М., Тихоновський М. А.,
Стоєв П. І., Бутринський І. З., Стецько А. Є., Корендій В. М., Сірак Я. Я.
Акустична емісія сплаву Zr-1% Nb з модифікованим поверхневим шаром
під час розтягу.....90

Досліджено вплив модифікованих шарів, сформованих під час хіміко-термічного оброблення і насичених воднем, на фізико-механічні властивості та акустичну емісію (АЕ) кільцевих зразків, вирізаних з цирконієвої трубки зі сплаву Zr-1% Nb. Встановлено, що активність низькоамплітудних сигналів АЕ окисдованого сплаву втричі більша, ніж необробленого, а високоамплітудних – менша. Після насичення воднем отримано аналогічні результати. Характер амплітудного розподілу сигналів АЕ для окисдованого зразка спадальний, а для обробленого у вакуумі змінюється, зокрема, значно збільшується кількість сигналів у високоамплітудній області.

Ключові слова: цирконій, поверхневий шар, хіміко-термічне оброблення, акустична емісія.

Сухацький Ю. В., Шепіда М. В., Головчук М. Я. Синтез нанорозмірної
шпінелі MgMn₂O₄ співосадженням в ультразвуковому полі.....96

Частинки нанорозмірної шпінелі MgMn₂O₄ синтезовано співосадженням в ультразвуковому полі. Виявлено, що піки Брегга на дифрактограмі синтезованого продукту добре узгоджуються з еталонною моделлю шпінелі MgMn₂O₄ з тетрагональною структурою. За рівнянням Дебая-Шеррера розраховано середній розмір кристаліта MgMn₂O₄, який становив ~24 nm. Частинки нанорозмірної шпінелі апробовано як активатори натрію перкарбонату під час окиснювальної деградації ксантенового барвника родаміну Б (передове окиснення – ультразвук/MgMn₂O₄/Na₂CO₃·1,5 H₂O₂). Встановлено, що за концентрації натрію перкарбонату 5 mM, вмісту каталізатора в реакційному середовищі 1 g/l і тривалості оброблення 3600 s ступінь деградації родаміну Б сягає 98%, а константа швидкості – 4,1·10⁻³ s⁻¹.

Ключові слова: синтез, ультразвук, поле, співосадження, нанорозмірна шпінель, MgMn₂O₄, каталізатор, активація.

Цибайло І. О. Обґрунтування режимів відновного термічного оброблення теплотривкої сталі гину парогону ТЕС.....	103
--	-----

Апробовано режими відновного термічного оброблення для поліпшення мікроструктури експлуатованої теплотривкої сталі розтягнутої зони гину головного парогону ТЕС. Досліджено зміну кількості зерен різних розмірів по товщині стінки труби після тривалої експлуатації та додаткового термічного оброблення. Обґрунтовано режим відновлення структури сталі 12Х1МФ, який полягав у подвійній нормалізації від 1100 та 960°C з подальшим відпуском при 740°C. Встановлено, що після такого оброблення частка дрібних зерен зросла до 55%, а крупних зменшилась до 10% по всій товщині стінки труби.

Ключові слова: *теплотривка сталь, головні парогони ТЕС, відновна термічна обробка.*

Горбань В. Ф., Кратівка М. О., Мисливченко О. М. Властивості еквіатомних високоентропійних фаз Лавеса типу С14.....	108
---	-----

Досліджено низку високоентропійних сплавів (ВЕС) і встановлено умови отримання фази Лавеса типу С14. Оцінено вплив електронної концентрації хімічних елементів на її вміст, а також твердість і модуль пружності твердорозчинних ВЕС з ОЦК та ГЦК ґратками. Виявлено, що зниження параметрів кристалічної ґратки отриманої фази призводить до підвищення твердості і модуля пружності сплавів.

Ключові слова: *високоентропійні сплави, фаза Лавеса типу С14, ентальпія змішування, твердість, модуль пружності, дисторсія.*

<u>Скальський В. Р.</u> , Рудаєвський Д. В., Канюк Ю. І. Оцінювання залишкового ресурсу залізничної рейки із поверхневими тріщинами.....	114
--	-----

Запропоновано новий метод розрахунку залишкового ресурсу рейок, який базується на кінетичному рівнянні росту втомної тріщини, отриманому за енергетичним підходом механіки руйнування матеріалів. Метод придатний для опрацювання методики оцінювання періодичності огляду рейок.

Ключові слова: *головка і підшви́ва рейки, втомна тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, згинний момент.*

Звізло І. С., Станкевич Н. В. Тріщина закруту в кусково-однорідному тілі з тонким прошарком на інтерфейсі.....	120
--	-----

Методом граничних інтегральних рівнянь досліджено вплив тонкого прошарку у кусково-однорідному тілі з двох півпросторів на інтенсивність напружень в околі кругової тріщини закруту. Розглянуто два підходи моделювання тонкого прошарку: точне з урахуванням його геометричних розмірів та наближене з використанням ефективних крайових умов у вигляді пружинного контакту на інтерфейсі. Встановлено межі придатності пружинних умов контакту для моделювання інтерфейсного прошарку.

Ключові слова: *кусово-однорідне тіло, кругова тріщина закруту, тонкий прошарок, пружинні умови контакту, метод граничних інтегральних рівнянь.*

Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Дементьєва Ж. А., Дьоміна К. Г., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Дослідження впливу хімічної та структурної неоднорідності сталі на в'язкість руйнування залізничних коліс.....	128
--	-----

Вивчено вплив структурної і хімічної неоднорідності сталі на в'язкість руйнування залізничного колеса. Показано, що формування неоднорідної мікросрук-

тури пов'язане з дендритною ліквідацією елементів у структурі металу. Встановлено, що метал зразків з низькою в'язкістю руйнування, крім сорбітоподібного перліту з виділеннями надлишкового фериту на межах "колишніх" аустенітних зерен, має структури з голчастою морфологією (бейнітні). Вони зосереджені, здебільшого, в мікрооб'ємах, збагачених марганцем. У зразках з високою в'язкістю руйнування структур голчастої морфології не спостерігали. Досліджено хімічний склад структурних складників зразків. Встановлено, що ділянки з голчастою структурою мали підвищений вміст марганцю порівняно з розташованими неподалік перлітом і феритом. Доведено, що ліквідаційні явища в металі ободу залізничного колеса з підвищеним вмістом легувальних елементів (вуглецю, кремнію і марганцю) є причиною формування неоднорідної мікроструктури металу після термічного зміцнення виробів, а ділянки з бейнітними структурами негативно впливають на в'язкість руйнування такого металу.

Ключові слова: залізничні колеса, механічні властивості, мікроструктура, ліквідація.

Ревенко В. П. Побудова загальних розв'язків рівнянь рівноваги для ортотропних матеріалів через три гармонічні функції..... 133

Розглянуто лінійну математичну модель теорії пружності для тривимірного ортотропного тіла. Застосовано методику інтегрування рівнянь пружної рівноваги та аналітичного вираження пружних переміщень через дві функції. Одна функція задовольняє однорідне рівняння в частинних похідних другого порядку, а інша – четвертого порядку. Для розв'язання рівняння четвертого порядку і опису ортотропних матеріалів введено модифіковані гармонічні функції, які задовольняють однорідні рівняння в частинних похідних другого порядку. Вперше розроблено методику інтегрування рівнянь пружної рівноваги без зайвих функцій та аналітичного вираження переміщень через три модифіковані гармонічні функції. Досліджено критерії виділення чотирьох нових класів ортотропних матеріалів, які описують трьома функціями. Два класи містять шість незалежних коефіцієнтів ортотропії, а два інших – п'ять. Інші залежні коефіцієнти ортотропії визначаємо із одержаних рівнянь. Записано вираз деформацій і напружень в ортотропному тілі. Встановлено, що не існує єдиного подання загального розв'язку рівнянь рівноваги для ортотропного тіла.

Ключові слова: ортотропні матеріали, розв'язки рівнянь рівноваги, переміщення, напруження, модифіковані гармонічні функції.

НАШІ ВТРАТИ

Валентин Романович Скальський..... 139

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 60, № 2, 2024

March – April

CONTENTS

- Korniy S. A., Zin I. M., Khlopyk O. P., and Sobodosh N. Yo.* Corrosion inhibition of Д16Т aluminium alloy by sodium alginate and zinc acetate composition in neutral chloride-containing environment.....5

The effect of an environmentally safe inhibitory composition based on polysaccharide (sodium alginate) and acetic acid salt (zinc acetate) on the corrosion of aluminum alloy in a neutral chloride-containing environment was studied. Based on electrochemical studies, the anticorrosion efficiency of the composition and the peculiarities of the mechanism of its protective action were established. The degree of metal protection by the alginate-acetate composition, calculated according to polarization dependences, was 89...98%. The anticorrosion effect of the composition is explained by the formation of a protective film on the surface of the alloy due to the adsorption of alginate, the deposition of zinc hydroxides on the cathode areas of the metal and, probably, the formation of poorly soluble Al^{3+} - Zn^{2+} -alginate complexes. The formation of the protective film on the surface of the alloy in inhibited solutions was confirmed by the results of electrochemical impedance spectroscopy, scanning electron microscopy, and Energy-dispersive X-ray analysis.

Keywords: *aluminum alloy, corrosion, chloride-containing environment, inhibitory composition, sodium alginate, zinc acetate, anticorrosion performance.*

- Vynar V. A., Chuchman M. R., Khoma M. S., Ivashkiv V. R., Vasylyv Kh. B., Gural T. O., Bukliv R. L., and Rudkovskii Ye. M.* Causes of accelerated corrosion in coiled tubing during acid washing of a gas field well.....14

The causes of accelerated corrosion of a coiled tubing HT-95 steel after acid washing of a gas field well in the Poltava Basin were investigated. Corrosion losses of steel in the washing solution do not exceed 3.6 mm/year due to the presence of a corrosion inhibitor in its composition. It was found that after acid treatment of a gas well, the corrosion rate of steel increased by three orders of magnitude. It is shown that the accelerated corrosion of steel occurs due to neutralization of the inhibitor effect and the change in the nature of metal corrosion caused by the high concentration of oxidizing agents such as iron (III) Fe_2O_3 oxides in the well. When Fe_2O_3 interacts with the hydrochloric acid of the washing solution, iron chloride $FeCl_3$ is formed, which partially neutralizes the inhibitor effect and accelerates corrosion of steel.

Keywords: *coiled tubing, corrosion, steel, acid washing of the well, inhibitor.*

<i>Shendrik T. G., Dunayevska N. I., and Fateiev A. I.</i> High-temperature corrosion of metal during combustion of coal with high salt content.....	20
--	----

The modern mechanisms of corrosion processes during the burning of carbon raw materials (biomass waste, coal of various metamorphisms) with a high content (Na_2O in ash $\geq 2\%$) of low-melting salts and sulfur are considered. The morphological features of deposits on the surface of the metal exposed to the high-temperature combustion gases of the salty coal (SC) before and after desalination and also composition of corrosion products of ferrite steel during SC ashing and its mixture with power-generating gas coal are determined. It is experimentally shown that extraction of water-soluble compounds from SC (on the example of deposits of Northern Donbass) and its mixture with coal of low salinity lead to a significant reduction in corrosion of heating surfaces during burning.

Keywords: *salty coal, burning, slagging, corrosion, coal blend.*

<i>Kostin O. M. and Martynenko V. O.</i> Peculiarities of high-temperature salt corrosion of Ni(L)-Hf-Cr ₃ C ₂ alloy.....	29
---	----

The development of materials resistant to wear and highly resistant to high-temperature salt corrosion is a pressing issue in ship gas turbine construction. In this case, use of the Ni(L)-Hf-Cr₃C₂ alloy, which contains hafnium 16.5...17.5 wt%, is promising. The addition of hafnium enables the formation of a structure maximum resembling the eutectic phase, with a melting point of $1200 + 10^\circ\text{C}$, maintaining stable hardness within the range of 649...665 HV₁₀ and exhibiting an average corrosion rate of 0.18 mg/(cm²·h) in a 5% Na₂SO₄ + 25% NaCl environment at 900°C. The results obtained allow us to recommend this alloy for use as a base material for reinforcing the contact surfaces of marine gas turbine engine components.

Keywords: *nickel alloy, microstructure, microhardness, wear resistance, high-temperature salt corrosion.*

<i>Veselivska H. H., Proskurnyak R. V., Kuprin O. S., and Mashovets N. S.</i> Electrochemical behaviour of surface-modified commercially pure titanium in Ringer solution.....	35
--	----

The TiN coating obtained by vacuum-arc spraying on the surface of commercially pure BT1-0 titanium and thermodiffusion saturation in a nitrogen atmosphere was studied. The coatings were evaluated by electrochemical methods for determining their corrosion resistance in Ringer physiological solution. It was found that the TiN coating deposited on untreated titanium has twice lower corrosion current density of untreated titanium, while the nitrated surface, without and with the TiN coating, has a lower corrosion current density by only 6 and 20% less, respectively. The TiN coating deposited on untreated titanium has the highest corrosion resistance, and the nitrated surface has the lowest corrosion resistance. Despite this ranking, the corrosion resistance of all investigated coatings is higher than that of the untreated BT1-0 titanium. Therefore, owing to the high electrochemical stability in Ringer solution, which contains Cl⁻ ions, the simple surface modification technology, and its non-toxicity, nitride coatings have a promising application in medicine.

Keywords: *BT1-0 titanium, vacuum-arc spraying, thermodiffusion saturation, TiN coating, corrosion resistance, Ringer solution.*

<i>Dmytrakh I. M., Syrotyuk A. M., and Tsyurulnyk O. T.</i> Influence of electrochemical hydrogen charging on loss of plasticity and development of volumetric microdamaging of 60C2A steel.....	43
--	----

Medium-carbon 60C2A steel is sensitive to electrochemical hydrogen charging in aqueous solutions at room temperature, which leads to a significant loss of the

material plastic characteristics. According to the results of uniaxial tensile mechanical tests of cylindrical samples, it was found that when the concentration of hydrogen in steel changed in the range of 0.3...5.0 ppm, the relative elongation and relative area reduction decreased in approximately three times. Under the impact loading, the development of volumetric microdamage of 60C2A steel was observed only when it was hydrogen-charged in the solutions with pH=1 and lower. The critical parameter of the material state is the energy E of the impact load under three-point bending of smooth beam samples, the decrease of which indicates an increase in the intensity of the hydrogen-induced damage. The existence of correlation dependence between the parameter E and the value of the concentration of residual (trapped) hydrogen C_H in the metal is shown. The obtained results can be used in the development of technological processes to increase the level of fragmentation of structural medium-carbon steels.

Keywords: *medium carbon steel; electrochemical hydrogen charging, hydrogen concentration, static load, plasticity characteristics, dynamic load, fracture energy, volumetric damage.*

Zvirko O. I., Nykyforchyn H. M., Krechkovska H. V., and Venhryniuk O. I. Estimation of stresses caused by electrochemical hydrogenation of pipe carbon steel.....50

The internal corrosion of gas steel pipelines can be accompanied by electrochemical hydrogenation, and hydrogen transportation can intensify this process. A method for the study of stresses in steel caused by electrolytic hydrogen charging has been developed. It consists in preliminary rigid loading of specimens in the elastic or plastic regions, electrolytic hydrogen charging and recording of stresses. On the example of 17Г1С pipe steel (an analogue of API 5L X52), the occurrence of internal tensile stresses under the action of hydrogen is established. The amplitude of stresses and their reversibility depended on both the intensity of hydrogen charging and the character of the previous load. The obtained results were analyzed taking into account the different state of hydrogen in the steel – diffusible and trapped in defects of the microstructure.

Keywords: *pipeline steel, hydrogen charging regimes, stress assessment, hydrogen embrittlement mechanism.*

Makarenko V. D., Chyhyrynets O. E., Vynnykov Yu. L., Gots V. I., Maksimov S. Yu., Pipa V. V., and Makarenko Yu. V. Study of the influence of hydrogenation kinetics on sulphide stress corrosion cracking of shipbuilding steels.....57

The kinetics of hydrogenation and the mechanisms of sulphide corrosion cracking of long-term operated pipe shipbuilding 15XCHД and D32 steels were evaluated. It is found that with the increase of the service life these steels are intensively hydrogenated from the inner surface of the pipe, the concentration of hydrogen exceeds the initial values in 2–2.5 times. The same tendency of microhardness changes in the cross-section of the metal wall of pipes with different service life is observed. Its values in the near-surface layers from the outer side of the pipe increase in 1.5–2 times. With the increase of the stresses during tests under corrosion sulphide cracking in the NACE environment hydrogenation of the samples increases dramatically (in approximately 2–3 times), which causes severe embrittlement (increasing the microhardness of the metal) and a decrease in the crack growth resistance.

Keywords: *shipbuilding steels, degradation, hydrogenation, microhardness, crack growth resistance.*

- Kyryliv V. I., Maksymiv O. V., Hurey I. V., Tsizh B. R., Gurey V. I., and Kulyk Yu. O.*
Influence of the mode of deformation and hydrogenation
on mechanical properties of 40X steel with surface nanostructure.....63

The influence of the unidirectional and multidirectional mode of severe plastic deformation generated by mechano-pulse treatment, on the formation of tensile mechanical properties of the 40X steel with surface nanostructure with and without electrolytic hydrogen charging was studied. Due to such treatment the yield strength of the obtained material was improved in almost 2 times. However, the characteristics of plasticity changed ambiguously: the elongation decreased in comparison with as-received state and the reduction in area after the multidirectional deformation – increased. The increment of the modulus of elasticity and formation of the equiaxed nanocrystalline structure, which enables transition of the severe plastic deformation to the advanced stage when plastic shear is suppressed and only plastic rotation occurs, is considered. It was established that after hydrogen charging, the multidirectional deformation generally provided the increase of the strength characteristics and retained the reduction in area as in the as-received steel.

Keywords: *surface nanostructure, severe plastic deformation, physicomechanical properties, hydrogen.*

- Hredil M. I., Kryzhanivskiy Ye. I., Demianchuk D. O., Shtoyko I. P.,
and Bartoshevskiy D. P.* Mechanochemical method of fatigue crack growth
arrest in metals by its artificial closure.....70

A method based on supplying a special liquid technological environment containing tannins into the crack cavity is investigated, which leads to the intensive formation of insoluble tannates in it. Filling the crack cavity, these compounds create an essential crack closure effect in steel up to its complete arrest in a wide range of stress intensity factors. Alloys with different corrosion resistance are studied: carbon steel 20, stainless steel 12X18H10T and titanium VT1-0. The effectiveness of the method is assessed by fatigue crack growth curves. A crucial role of crack closure in its arrest is confirmed. The unequal effectiveness of the method for various metal materials is shown. This is explained by the competitive formation of oxide films which prevent the accumulation of tannate deposits in the crack.

Keywords: *fatigue, crack arrest, artificial crack closure, tannin.*

- Chepil O. Ya.* Hydrogen influence on the durability of a thin-walled sample
under high-temperature creep.....76

The durability of a thin-walled plane specimen made of 22K steel under the influence of hydrogen and creep was determined using the finite element method (FEM). A comparative analysis of The results obtained using the classical equations of creep theory and the energy approach were compared. The satisfactory convergence of the results with experimental data is established. However, the energy criterion allows for a more accurate prediction of the time to failure compared to the classical equation.

Keywords: *hydrogen concentration, creep, strain energy, damage, long-term strength.*

- Hvozdetskyi V. M., Student O. Z., Student M. M., Pohrelyuk I. M., Zadorozhna Kh. R.,
and Lukyanenko A. G.* Physicomechanical properties of electric
arc sprayed coating formed in supersonic mode.....81

It was established that the mechanical properties and the failure mechanism of arc sprayed coatings with cored wire (CW) 90X17P2ГC depend on the pressure of the sprayed air (0.6 and 1.2 MPa). It was found that residual tensile stresses in the coating obtained at a supersonic speed of air flow (600 m/s) decreased by 10%, and their

microhardness and cohesive strength increased by 30 and 200%, respectively, relative to that formed at the subsonic speed (300 m/s). The improvement in the properties of the coating formed by a supersonic air flow was explained by: a decrease in the size of droplets of the CW melt and, accordingly, the thickness of the lamellas crystallizing on the substrate and also by a decrease in the thickness of interlamellar oxides in the coating due to a shorter flight of droplets during spraying and, accordingly, less intense high-temperature oxidation of their surface; dispersion strengthening of lamellas with nano-sized particles of (Fe, Cr)₂B borides; an increase in the proportion of translamellar failures compared to interlamellar delaminations during cohesive strength tests.

Keywords: *arc spraying, super- and subsonic air flow speed, cored wire, coatings, microhardness, residual stresses, cohesive strength, failure mechanism.*

<i>Trush V. S., Pochapskyi Ye. P., Klym B. P., Kravchyshyn T. M., Tikhonovsky M. A., Stoev P. I., Butrynskyi I. Z., Stetsko A. E., Korendiy V. M., and Sirak Ya. Ya.</i>	
Acoustic emission of Zr–1% Nb alloy with modified surface layer under tension.....	90

The influence of modified layers formed during chemical-thermal treatment and subsequent hydrogen saturation on the physico-mechanical properties and acoustic emission (AE) of ring samples cut from a zirconium tube of the Zr–1% Nb alloy was investigated. It was established that the activity of low-amplitude AE signals of the oxidized alloy is on average three times greater than that of the untreated alloy, and while of the high-amplitude signals it was less. After saturation with hydrogen, similar results were obtained. The character of the amplitude distribution of AE signals for an oxidized sample is decreasing, while for a vacuum-treated sample it changes, in particular, the number of signals in the high-amplitude region increases significantly.

Keywords: *zirconium, surface layer, chemical-thermal treatment, acoustic emission.*

<i>Sukhatskiy Yu. V., Shepida M. V., and Holovchuk M. Ya.</i>	
Synthesis of nanosized MgMn ₂ O ₄ spinel by co-precipitation in the ultrasonic field	96

Nanosized MgMn₂O₄ spinel particles were synthesized by co-precipitation in an ultrasonic field. It was found that the Bragg peaks on the diffractogram of the synthesized product were in good agreement with the reference model of MgMn₂O₄ spinel with a tetragonal structure. According to the Debye–Scherrer equation, the average size of the MgMn₂O₄ crystallite was calculated, which was ~24 nm. Nanosized spinel particles were tested as sodium percarbonate activators during the oxidative degradation of the xanthene dye rhodamine B (advanced oxidation – ultrasound/MgMn₂O₄/Na₂CO₃·1.5 H₂O₂). It was established that at the sodium percarbonate concentration of 5 mM, the catalyst content in the reaction medium of 1 g/l, and the treatment time of 3600 s, the degradation degree of rhodamine B was 98%, and the rate constant was – 4.1·10^{–3} s^{–1}.

Keywords: *synthesis, ultrasonic field, co-precipitation, nanosized spinel, MgMn₂O₄, catalyst, activation.*

<i>Tsybailo I. O.</i>	
Justification of modes of restorative heat treatment of heat-resistant steel of TPP vapour steam bent.....	103

Restorative heat treatment modes was tested to improve the microstructure of used heat-resistant steel in the stretched bending zone of the main steam pipeline of a thermal power plant. The change in the number of grains of different sizes along the pipe wall thickness after long-term operation and after additional heat treatment was studied. The mode for restoring the structure of 12X1MΦ steel was substantiated, which consisted in double normalization from 1100 and 960°C followed by tempering

at 740°C. It was shown that after restorative heat treatment, the proportion of small grains increased to 55%, and of large grains decreased to 10% throughout the entire thickness of the pipe wall.

Keywords: *head-resisted steel, main steam pipeline TPP, restorative heat treatment.*

Gorban' V. F., Krapivka N. A., and Myslyvchenko O. M. Properties of equiatomic high-entropy Laves phases of C14 type.....108

Based on the results of studies of a number of high-entropy alloys (HEA), the conditions for the formation of Laves phases of type C14 were established. The influence of the electronic concentration of chemical elements on its content, as well as the hardness and modulus of elasticity of hard-soluble HEA with BCC and FCC lattices was estimated. It is found that a decrease in the parameters of the crystal lattice of the obtained phase leads to an increase in hardness and elastic modulus of alloys.

Keywords: *high-entropy alloys, Laves phase of type C14, mixing enthalpy, hardness, elastic modulus, distortion.*

Skalskyi V. R., Rudavskiy D. V., and Kanyuk Yu. I. Evaluation of residual life of a railway rail with surface cracks.....114

A new calculation method of assessing the rail residual lifetime is proposed. The method is based on the kinetic equation of fatigue crack growth obtained on the basis of the energy approach of the materials fracture mechanics. The proposed calculation method can be used when developing the methods for assessing the rails inspection periodicity.

Keywords: *head and foot rail, fatigue crack, stress intensity factor, bending moment.*

Zvizlo I. S. and Stankevych N. V. Torsion crack in a piecewise homogeneous body with a thin layer at the interface.....120

The influence of a thin layer in a piecewise homogeneous body consisting of half-spaces on the stress intensity in the vicinity of a circular torsion crack is studied by the method of the boundary-integral equations. Two approaches to modeling a thin layer are considered – accurate considering its geometric dimensions and approximate using effective boundary conditions in the form of a spring contact at the interface. The limits of applicability of spring contact conditions for modeling the interlayer have been established.

Keywords: *piecewise-homogeneous body, penny-shaped torsion crack, thin interlayer, spring boundary conditions, boundary integral equations method.*

Babachenko O. I., Kononenko G. A., Dement'eva Zh. A., Domina K. G., Podolskyi R. V., and Safronova O. A. Study of the influence of chemical and structural heterogeneity of steel on fracture toughness of railway wheels.....128

The effect of structural and chemical heterogeneity of steel on the fracture toughness of a railway wheel was studied. It is shown that the formation of a heterogeneous microstructure is associated with the presence of dendritic liquation of elements in the metal structure. The metal of the samples, which is characterized by a lower value of fracture toughness, in addition to sorbitol-like pearlite with excess ferrite on the boundaries of the “former” austenite grains, has acicular morphology (bainite structures) of the structure. They are concentrated, mainly, in microvolumes enriched with manganese. In the samples with high values of fracture toughness the acicular structure was not observed. The chemical composition of the structural component samples was studied. It was found that areas with an acicular structure had an increased content of manganese compared to pearlite and ferrite located nearby. It is proved that liquation

phenomena in the metal of the railway wheel rim, characterized by an increased content of alloying elements (carbon, silicon and manganese), are the cause of the formation of a heterogeneous microstructure of the metal after thermal hardening of the products, and the presence of areas with bainite structures negatively affects the fracture toughness of the metal of the railway wheel rim.

Keywords: *railway wheels, mechanical properties, microstructure, liquation.*

Revenko V. P. Construction of general solutions of equilibrium equations of orthotropic materials in terms of three harmonic functions..... 133

A linear mathematical model of the theory of elasticity of a three-dimensional orthotropic body is considered. The technique of integrating elastic equilibrium equations and analytical expression of elastic displacements through two functions is applied. One function satisfies a homogeneous equation in partial derivatives of the second order, and the other one of the fourth order. To solve the fourth-order equation and describe orthotropic materials, modified harmonic functions are introduced which satisfy homogeneous equations in the second-order partial derivatives. For the first time, a method of integrating elastic equilibrium equations without redundant functions and analytical expression of displacements through three modified harmonic functions was developed. The criteria for the selection of four new classes of orthotropic materials, described by three functions, were studied. Two classes contain six independent orthotropic coefficients, and the other two contain five coefficients. The other dependent orthotropic coefficients are determined from the obtained equations. The expression of deformations and stresses in an orthotropic body is recorded. It is established that there is no single representation of the general solution of the equilibrium equations of an orthotropic body.

Keywords: *orthotropic materials, solutions of equilibrium equations, displacements, stresses, modified harmonic functions.*

OUR LOSSES

Valentyn Romanovych Skalskyi..... 139