

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 04.11.2022. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 041122 від 04.11.2022. 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, № 5, 2022

вересень – жовтень

ЗМІСТ

Корній С. А., Зінь І. М., Даниляк М.-О. М., Різун Ю. Я. Екологічно безпечні інгібітори корозії металів на основі природних полімерів (Огляд).....5

Проаналізовано перспективні екологічно безпечні інгібітори корозії на основі природних полімерів. Порівняно протикорозійну ефективність широкоживаних у промисловості біополімерів, зокрема хітину, крохмалю та інуліну, у різних корозивних середовищах. Описано основні методи досліджень інгібувальної дії природних полімерів на поверхні металів та сплавів, зокрема, гравіметрії, циклічної вольтамперометрії, електрохімічної імпедансної спектроскопії, ізо-терм адсорбції, а також квантово-хімічні. Встановлено, що на ефективність інгібування корозії суттєво впливають концентрація полімерів, їх молекулярна маса та структура, а механізм захисту визначає адсорбція, спричинена полярними функціональними групами, через що блокується доступ корозивного середовища до поверхні металу. Порівняно захисні властивості натуральних камедей різного складу та основні механізми інгібування ними корозії вуглецевих сталей та алюмінієвих сплавів. Наведено результати протикорозійної дії інгібувальних синергічних композицій на основі природних полімерів, які характеризуються нададитивністю дії компонентів. Створення синергічних композицій – найдодільніший спосіб поліпшити захисну дію полімерів, зменшити їх концентрацію та урізноманітнити застосування в корозивних середовищах.

Ключові слова: *корозія, екологічно безпечні інгібітори корозії, природні полімери, полісахариди, синергічні композиції, адсорбція, ефективність інгібування.*

Абдуліна Д. Р., Вортман М. Я., Іутинська Г. О., Пуріш Л. М., Коптєва Ж. П., Коптєва Г. Є., Лемешко В. М., Шевченко В. В. Гуанідинійвмісний алкілзамісний олігомер як інгібітор корозії сталі.....17

Гуанідинійвмісний олігомер на основі аліфатичного олігоепоксиду – новосинтезована речовина з бактерицидною дією, тому перспективна як інгібітор мікробної корозії. Синтезовано олігомерний алкілзамісний гуанідинійбромід та досліджено його протикорозійні властивості до сталі за наявності корозійно-агресивних сульфатвідновлювальних бактерій (СВБ). Порівняно ефективність нової сполуки з раніше дослідженими інгібіторами – ДПХ (четвертинна амонійна сполука на основі N-децилпіридиній хлориду) (КПІ, Україна) та Argonib CI-28 на основі діаміну етоксилату–Diamine Ethoxylate) (Akzonobel, Holland). Виявлено, що гуанідинійвмісний олігомер володіє біоцидними властивостями. З його внесенням

значно пригнічується розвиток бактерій, а після закінчення терміну експозиції в середовищі виявлено лише десятки їх клітин. Швидкість корозії сталі за наявності СВБ без інгібіторів становила 0,15... 0,35 mg/(cm²·h). З додаванням до культурального середовища ДПХ вона знижується до 0,032...0,047 mg/(cm²·h) (у 6,5–10,6 разів), а за наявності інгібітора Atmohib CI-28 – до 0,027...0,039 mg/(cm²·h) (у 4,2–12,7 разів). Після додавання до середовища з бактеріями гуанідинвмісного олігомера зменшується до 0,075...0,079 mg/(cm²·h) (у 2,5–2,7 разів). За результатами втрати маси сталевих зразків ступінь захисту металу від мікробної корозії за наявності гуанідинієвого олігомера становить 60,15...63,17%. Отже, ця сполука на основі аліфатичного олігоепоксида має біоцидні та протикорозійні властивості і перспективна для боротьби із мікробно індукованою корозією.

Ключові слова: *інгібітори мікробної корозії, гуанідинієвий алкілзамісний олігомер, сульфатвідновлювальні бактерії.*

Лавриць С. М., Погрелюк І. М., Шляхетка Х. С. Корозійна тривкість адитивно виготовлених титанових сплавів у хлоридній кислоті.....23

Виконано порівняльну оцінку корозійної тривкості α - та псевдо- α -титанових сплавів марки VT1-0 та VT20 (Ti–Al–Mo–V–Zr), виготовлених за традиційною (ТТ) та адитивною (АТ) технологіями, відповідно. За АТ досліджували титанові сплави виготовили електронно-променевим плавленням (ЕПП). Показано, що титанові сплави, отримані за АТ, мають нижчу корозійну тривкість у 20%-му розчині хлоридної кислоти, ніж сплави, одержані за ТТ. Встановлено взаємозв'язки між корозійною тривкістю та мікроструктурою сплавів, виготовлених за різними технологіями, а саме, погіршення першої через формування під час ЕПП структури Відманштетта та метастабільного мартенситу.

Ключові слова: *титанові сплави, адитивне виготовлення, електропроменеве плавлення, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.*

Клименко А. В., Коваленко С. Ю., Полішко Г. О., Тунік А. Ю., Бик М. В., Букет О. І., Шапіро О. А. Корозійна тривкість нержавної сталі AISI 310s у розплаві свинцю за температури 450°C.....30

Досліджено корозійну тривкість зразків нержавної сталі AISI 310s у розплаві свинцю за температури 450°C з обмеженим доступом кисню. За результатами корозійних випробувань встановлено, що швидкість корозії цієї сталі знижується з 0,474 до 0,045 mm/year зі збільшенням тривалості випроб з 240 до 1440 h, відповідно. Ймовірною причиною такої зміни швидкості є утворення захисних оксидних плівок на поверхні зразків. За допомогою сканувальної та оптичної мікроскопії виявлено зміни структури та складу продуктів корозії, які утворюються на поверхні, зі збільшенням тривалості випробувань. Встановлено, що зі зростанням тривалості випроб до 720 h на поверхні утворюється однорідна та щільна структура шару продуктів корозії. Шар продуктів корозії складу O, Si, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni та Pb, сформований після 240 h випробувань, переходить у двошарову структуру з чітким поділом шарів, які відрізняються за складом. Так, біля поверхні основного металу шар складався з O, Cr, Fe, Ni і Pb, а шар, що контактує з розплавом свинцю – з O, Cr, Fe та Pb. Встановлено коагуляцію карбідів в основному металі та їх осадження на межах зерен і лініях вальцювання після 720 h випробувань. Визначено, що мікротвердість основного металу становить 1650±50, 1855±45 та 1730±60 МПа після 240, 720 та 1440 h випробувань у розплаві свинцю, відповідно, а продуктів корозії – 3710±425 і 3020±615 МПа після 240 і 720 h випробувань.

Ключові слова: *корозійна тривкість, нержавна сталь, розплав свинцю, сканувальна та оптична мікроскопія.*

Стечишин М. С., Стечишина Н. М., Диха О. В., Мартинюк А. В.,
Люховець В. В., Лук'янюк М. В. Корозійно-механічне
зношування азотованих сталей у кислому середовищі.....36

Проаналізовано фізико-хімічні і трибологічні характеристики азотованих у безводневому середовищі конструкційних сталей під час корозійно-механічного руйнування у кислому модельному середовищі. "Гнучкість" пристосування азотованих шарів до зміни умов зовнішнього навантаження пояснено досягненням мінімального відношення $\Delta E/A$. При цьому механізм мінімізації може бути різним. Встановлено, що за пружно-пластичного контакту процеси під час руйнування азотованих конструкційних сталей стабілізуються внаслідок утворення на поверхні щільних захисних плівок, а під час пластичного – через підвищення ефективності дії бар'єрного ефекту "debris-шару". Вияснено вплив температури та цукрози на інтенсивність руйнування поверхонь.

Ключові слова: корозійно-механічне руйнування, безводнєве азотування в тліючому розряді, робота сил навантаження, внутрішня енергія.

Цибайло І. О., Свірська Л. М., Соловей П. Р., Кречковська С. Р., Дацко Б. М.,
Студент О. З. Використання електролітичного наводнювання
для візуалізації пошкодженості тривало експлуатованої теплотривкої
сталі парогонів ТЕС.....41

Встановлено, що ефект деградації теплотривкої сталі парогонів ТЕС чіткіше проявляється за додаткового наводнювання. На зразках осьової орієнтації її негативний вплив слабший в околі зовнішньої поверхні труби та посилюється поблизу внутрішньої. Зростання видовження зразків пов'язали із розкриттям експлуатаційних дефектів під дією водню. На зразках тангенціальної орієнтації його фіксували лише біля внутрішньої поверхні труби. За розтягу радіальних зразків розкривалися експлуатаційні дефекти, зумовлені розшаруваннями вздовж текстури вальцювання. Фрактографічний аналіз наводнених зразків металу засвідчив велику кількість відшарованих від матриці неметалевих включень з лінзоподібними плитками ямками навколо них, перетинки між якими руйнувалися за механізмом зсуву. Крім того, в металі труб з більшою кількістю зупинок були ділянки кризьзеренного відколу, які вважали фрактографічною ознакою окрихчувальної дії внутрішнього водню, сукупно абсорбованого сталлю і під час експлуатації на парогонях, і під час електролітичного наводнювання.

Ключові слова: теплотривка сталь, руйнування, деградація, наводнювання.

Ozouaki S. and Berthod P. Жаротривкість та повзучість (Ti, C)-вмісних
литих суперсплавів на основі нікелю при 1200°C.....48

Шість сплавів (25 wt% Cr; 0,4 C; 1,6 Ti; решта – Co і Ni) виготовлено литтям для оцінки їхнього опору окисненню та повзучості при 1200°C. Мікроструктура сплавів складається з дендритної матриці з евтектичними карбідами у міждендритних проміжках. Карбіди TiC утворюються у сплавах з більшим вмістом Co, а карбіди хрому – з більшим вмістом Ni. Диференціальний термічний аналіз показує, що всі сплави починають плавитися за температури вище 1250°C. Окиснення на повітрі при 1200°C дає змогу спостерігати захисні властивості хрому на сплавах, збагачених нікелем, сильніші, ніж кобальтом. І, навпаки, випробування на повзучість при 1200°C демонструють беззаперечну перевагу багатших на кобальт сплавів. Хорошим компромісом для обох типів поведінки за високих температур є сплав на основі кобальту з нікелем як другорядним елементом, але з великою часткою (15...30 wt% Ni).

Ключові слова: сплави Co та Ni, карбіди TiC, карбіди хрому, опір повзучості, високотемпературне окиснення.

Размишляев О. Д., Максимов С. Ю., Берднікова О. М., Прилипко О. О.,
Кушнар'ова О. С., Алексеєнко І. І. Структура з'єднань низьколегованої
сталі за зварювання під дією зовнішнього електромагнетного поля.....55

Вивчено параметри зони термічного впливу (ЗТВ), мікроструктуру, фазовий склад та мікротвердість металу зварних з'єднань (ЗЗ) сталі 09Г2С, отриманих без та зі застосуванням поздовжнього або поперечного електромагнетних полів. Проаналізовано зміни структурних параметрів металу швів і ЗТВ на ділянках перегріву, нормалізації тощо. Встановлено умови одержання якісних ЗЗ під впливом зовнішнього електромагнетного поля, які забезпечують тріщиностійкість металу.

Ключові слова: *низьколегована сталь, зварні з'єднання, магнетне поле, зона термічного впливу, мікроструктура, фазовий склад, мікротвердість.*

Луценко В. А., Парусов Е. В., Парусов О. В., Луценко О. В., Чуйко І. М.,
Голубенко Т. М. Особливості формування структури
високовуглецевої сталі під час вальцювання.....60

Встановлено особливості формування та розподілу ступеня дисперсності перліту у сталевій заготовці зі сталі С82D (EN ISO 16120-2:2017), а також після її гарячого пластичного деформування на різних стадіях вальцювання. Показано, що структура – пластинчастий перліт з різним ступенем дисперсності незалежно від технологічної зони відбору зразків. З наближенням до осьової зони прокату міжпластинкова відстань у перліті збільшується і досягає найбільших значень у центрі. Встановлено, що гаряче пластичне деформування слід здійснювати за контрольованої температури виходу металу на останній стадії вальцювання, при цьому необхідно вилучити етап водяного охолодження, що зменшить градієнт температури між поверхнею та центром прокату.

Ключові слова: *високовуглецева сталь, вальцювання, температура, рекристалізація, структура, перліт, дисперсність.*

Brezinová J., Hašul' J., Brezina J., Maruschak P. O., Viňáš J. Визначення
трибологічних властивостей багатошарових покриттів
на основі нітридів.....68

Подано результати оцінювання коефіцієнтів тертя, об'єму видаленого матеріалу та питомого зношування для багатошарових покриттів на основі нітридів AlTiCrN і AlTiN за різних радіусів траєкторій тертя. Виявлено неоднакові механізми тертя поверхні зношування за різних умов навантаження при 400°C. Виявлено, що покриття AlTiN можна використовувати у високотемпературних середовищах, тобто на вставках пресформ за високотемпературного литва алюмінію та його сплавів.

Ключові слова: *інженерія поверхні, покриття, тертя, нітриди, трибологія.*

Тітов А. В., Балушок К. Б., Остап О. П., Тітов В. А., Корева В. О.,
Поливода С. Л., Чепіль Р. В. Пресування напівфабрикатів
зі сплавів системи Al–Mg–Sc в ізотермічних умовах.....74

Подано результати моделювання та експериментального дослідження гарячого ізотермічного пресування смуг різної товщини з литих циліндричних заготовок зі сплавів системи Al–Mg–Sc типу 1570 і 1545. Встановлено температурно-силові параметри процесу та геометрію пресованої смуги для отримання її мінімальної пошкодженості. Виявлено, що за пресування при 360°C заготовки (\varnothing 30 mm) розрахункова пошкодженість ω смуги з поперечним перерізом 30×12 mm становить 0,35...0,45 за відсутності візуально спостережуваного по-

верхнього тріщиноутворення. У смузї з поперечним перерізом 30×6 mm при $\omega = 0,50 \dots 0,55$ зафіксовано макротріщини.

Ключові слова: алюмінієві сплави, гаряче пресування, моделювання процесу, структура, пошкодженість.

Максимова С. В., Воронов В. В., Ковальчук П. В., Зволінський І. В.

Вплив легувальних елементів на жаротривкість нікелевих припоїв і паяних з'єднань.....81

Подано результати досліджень впливу адгезійно-активних елементів на жаротривкість експериментальних припоїв системи Ni–Cr–Co–Al–(Ti, Nb, W, Mo, Zr) та паяних з'єднань з жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У. Визначено, що легування цирконієм (>2 wt%) суттєво погіршує жаротривкість як припою, так і галтельних ділянок паяного з'єднання. Показано, що частково компенсувати його негативний вплив можна завдяки додатковому легуванню хромом. Встановлено, що таке легування (до 15 wt%) дає можливість підвищити жаротривкість нікелевого припою майже на 30%. Також результатами досліджень доведено, що додаткове легування експериментальних припоїв титаном та ніобієм замість цирконію дозволяє отримати жаротривкість як припою, так і паяного з'єднання, близькою до показників для основного металу – жароміцного нікелевого сплаву ЖС6У.

Ключові слова: високотемпературне вакуумне паяння, припій, жароміцний нікелевий сплав, жаротривкість, глибина окиснення, адгезійно-активні елементи.

Рябцев І. О., Переплотночков Є. Ф., Бабінець А. А., Рябцев І. І., Лентюгов І. П.,

Богайчук І. Л. Плазмово-порошкове наплавлення на мідь сплавів на основі нікелю і кобальту.....87

Подано результати досліджень формування наплавленого металу та його з'єднання з основним за плазмового наплавлення на мідь порошками на основі нікелю або кобальту. Встановлено, що найкращі результати з огляду на зварювальні-технологічні властивості забезпечує порошок ПГ-СР4 на основі нікелю. За використання порошку ПН-АН34 виявлено окремі дефекти в наплавленому металі у вигляді прошарків та окремих включень міді у шарі наплавленого металу на основі кобальту.

Ключові слова: наплавлення на мідь, плазмово-порошкове наплавлення, сплави на основі нікелю та кобальту, зона сплавлення.

Федина Л. О., Федорчук А. О., Федина М. Ф. Взаємодія компонентів

та кристалічна структура сполук системи Pr–Cu–Ge.....95

Методами рентгенофазового, рентгеноструктурного і частково мікроструктурного аналізу досліджено взаємодію компонентів у потрійній системі Pr–Cu–Ge, побудовано ізотермічні перерізи діаграм стану системи при 870 К (0...50 at.% Pr) та 670 К (50...100 at.% Pr). При 870 К встановлено існування семи тернарних сполук: PrCu₂Ge₂, Pr₂CuGe₆, Pr₂Cu₃Ge₃, PrCu_{0,817}Ge₂, Pr₆Cu₈Ge₈, PrCu_{1,25...0,95}Ge_{0,75...1,05}, PrCu_{0,77...0,5}Ge_{1,23...1,5}, при 670 К – однієї ~Pr_{0,6}Cu_{0,22}Ge_{0,18} з невизначеною кристалічною структурою. Всі тернарні германіди утворюються зі сталими складами, крім фаз зі структурою типу AlB₂. Помітної розчинності третього компонента у бінарних сполуках подвійних систем не спостерігали. Вивчено структурні параметри тернарних германідів: Pr₂CuGe₆ (структурний тип (СТ) Ce₂CuGe₆, символ Пірсона (СП) oS18, просторова група (ПГ) Amm2, $a = 4,19300(4)$ Å, $b = 4,05742(4)$ Å, $c = 21,4823(2)$ Å, $R_I = 0,0686$, $R_P = 0,0993$), PrCu_{1,25}Ge_{0,75} (СТ AlB₂, СП hP3, ПГ P6/mmm, $a = 4,2922(2)$ Å, $c = 3,9193(3)$ Å, $R_I = 0,0543$, $R_P = 0,1036$), PrCu_{0,72}Ge_{1,28} (СТ AlB₂, СП hP3, ПГ P6/mmm, $a = 4,19347(6)$ Å, $c = 4,1817(1)$ Å, $R_I = 0,0504$, $R_P = 0,0728$). Проаналізовано спорідненість дослідженої системи Pr–Cu–Ge з

раніше вивченими R–Cu–Ge, особливості структур знайдених тернарних гермідів купруму та празеодиму.

Ключові слова: празеодим, купрум, германій, потрійна система, фазові рівноваги, тернарна сполука, кристалічна структура, структурний тип.

Силованюк В. П., Івантишин Н. А., Філіпов М. В. Заліковування тріщин у транстропному пружному тілі за кручення.....102

Побудовано математичну модель заліковування тріщин у трансверсально-ізо-тропному циліндрі, що підданий деформації кручення. Задачу зведено до розв'язування інтегрального рівняння відносно переміщень поверхонь тріщини. Коли тріщина заповнена в усьому об'ємі, отримано точний аналітичний розв'язок відповідного інтегрального рівняння. Встановлено ефективність зміцнення циліндра залежно від геометричних параметрів тріщини та механічних характеристик ін'єкційного матеріалу після затверднення.

Ключові слова: заліковування тріщин, міцність, анізотропія, кручення.

Максимович М. О., Максимович О. В., Дуткевич М. Розрахунок напружень у композитних смугах із тріщинами на основі модифікованих інтегральних рівнянь з урахуванням контакту їх берегів.....107

Розроблено алгоритм дослідження напружень біля тріщин в анізотропній смузі, який ґрунтується на методі сингулярних інтегральних рівнянь. Ядра рівнянь записано на основі розв'язку типу Гріна, тому граничні умови на прямолінійних межах смуги виконуються тотожно. Розв'язок Гріна подано як суму аналітичних функцій, які мають полюси, та функцій, які визначають через швидкозбіжні інтеграли. Інтегральні рівняння розв'язано числово методом механічних квадратур. Досліджено напруження у композитних смугах з тріщинами, які перебувають під дією розтягу, чистого згину, триточкового згину та зосереджених сил, в тому числі за врахування контакту берегів тріщин.

Ключові слова: анізотропна смуга, тріщини, розв'язок Гріна, контакт берегів тріщин, сингулярні інтегральні рівняння.

Глотка О. А., Ольшанецький В. Ю. Математичне прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів після направленої кристалізації.....115

Вперше запропоновано співвідношення легувальних елементів K_{γ} , яке можна використати для оцінки механічних властивостей, що враховує комплексний вплив основних компонентів сплаву. Наведено регресійні моделі, за допомогою яких можна розрахувати розмірну невідповідність (місфіт), міцність, жароміцність, кількість γ' -фази і густину сплавів з високою точністю. Встановлені закономірності впливу хімічного складу на властивості жароміцних нікелевих сплавів направленої кристалізації. Показано, що для багатокомпонентних нікелевих систем можна з високою вірогідністю визначати місфіт, який істотно впливає на характеристики міцності сплавів цього класу. Показано перспективний напрямок для прогнозування основних характеристик, які впливають на комплекс службових властивостей сплавів, як під час розроблення нових, так і вдосконалення складів відомих промислових марок.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, розмірна невідповідність (γ/γ' -місфіт), міцність, жароміцність.

*Шахбазов Я. О., Широков В. В., Четербух О. Ю., Грінер І. М., Василів Х. Б.,
Мельников О. В. Оцінювання залишкових напружень
під час механічного оброблення деталей машин.....*122

Розглянуто технологічні можливості управління залишковими напруженнями під час механічного оброблення деталей машин виправленням спотвореної структури обробленої поверхні через зміну напрямку вектора швидкості різання на чорнових і чистових операціях. Показано можливість використання ефекту Баушингера під час оброблення металів різанням для впливу на значення і знак залишкових напружень першого роду. На прикладі сталі 45 встановлено, що механічна обробка деталей за запропонованою гіпотезою не лише поліпшує якість поверхневого шару металу, а й збільшує ресурс роботи пар тертя на 25...50%.

Ключові слова: *залишкові напруження, пластична деформація, напруження, ефект Баушингера, напрям вектора швидкості різання.*

ЮВІЛЕЇ

Вацлав-Антоні Каспшак (до 90-річчя від дня народження).....128

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, № 5, 2022

September – October

CONTENTS

Korniy S. A., Zin I. M., Danyliak M.-O. M., and Rizun Yu. Ya. Environment-friendly metal corrosion inhibitors based on natural polymers (A review).....5

The promising environmentally safe corrosion inhibitors based on natural polymers are analyzed. The anti-corrosion effectiveness of biopolymers widely used in industry, in particular, chitin, starch and inulin, in various corrosive environments is considered. The main methods of researching the inhibitory efficiency of natural polymers on the surface of metals and alloys are described, including gravimetry, cyclic voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy, adsorption isotherms, and quantum chemical approaches are described. It was established that the effectiveness of corrosion inhibition by polymers is influenced mainly by their concentration, molecular weight and structure, and the protection mechanism is generally caused by the adsorption due to the presence of polar functional groups in them, which causes the blocking of the corrosive medium access to the metal surface. The protective properties of natural gums and the main mechanisms of their inhibition of carbon steels and aluminum alloys corrosion are considered. The data on the anti-corrosion effect of inhibitory synergistic compositions based on natural polymers, which are characterized by the synergism of the components, are given. It is shown that the creation of synergistic compositions is an effective way to improve the protective effect of polymers, reduce their concentration and diversify applications in corrosive environments.

Keywords: *corrosion, environmentally friendly inhibitors, natural polymers, polysaccharides, synergistic compositions, adsorption, inhibition efficiency.*

Abdulina D. R., Vortman M. Ya., Iutynska G. A., Purish L. M., Kopteva Zh. P., Kopteva G. E., Lemeshko V. N., and Shevchenko V. V. Guanidine-containing alkyl-substituting oligomer as a metal corrosion inhibitor.....17

Guanidinium-containing oligomer based on aliphatic oligoepoxide is a newly synthesized substance with known bactericidal action, which is prospective as an inhibitor of microbial corrosion. The aim of this work is to synthesize the oligomeric alkyl-substituted guanidinium bromide and to study its anticorrosive properties for steel in the presence of corrosive aggressive sulfate-reducing bacteria (SRB). The effectiveness of the new compound with previously studied inhibitors – DPH (quarter ammonium compound based on N-decylpyridinium chloride) (KPI, Ukraine) and Armohib CI-28 (based on Diamine Ethoxylate) (Akzonobel, Holland) is studied. The guanidinium oligomer has been shown to have biocidal properties. The introduction

of the oligomer gives a significant inhibition of bacterial growth, after the end of the exposure period in the environment only dozens of cells are found. The corrosion rate of steel in the presence of SRB without the introduction of inhibitors is 0.15...0.35 mg/(cm²·h). The addition of DPH leads to a decrease in the corrosion rate of steel to 0.032...0.047 mg/(cm²·h) (6.5–10.6 times). The addition of Armohib CI-28 reduces the corrosion rate to 0.027... 0.039 mg/cm²·h (4.2–12.7 times), and the addition of the oligomer to the culture medium reduces the corrosion rate to 0.075...0.079 mg/(cm²·h) (2.5–2.7 times). According to the loss of mass of steel samples, the degree of the metal protection from microbial corrosion in the presence of guanidinium oligomer is 60.15...63.17%. So, the guanidine-containing oligomer based on aliphatic oligoepoxide has biocidal and anti-corrosion properties and is promising for use as a means of combating microbial induced corrosion.

Keywords: *microbial corrosion inhibitors, guanidine-containing alkyl-substituted oligomer, sulfate-reducing bacteria.*

Lavrys S. M., Pohrelyuk I. M., and Shliakhetka Kh. S. Corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys in hydrochloric acid.....23

A comparative assessment of the corrosion resistance of α and near α BT1-0 and BT20 (Ti–Al–Mo–V–Zr) titanium alloys, respectively, obtained by traditional technology (TT) and additive manufacturing (AM) was carried out. AM technology was used to manufacture the studied titanium alloys by electron beam melting (EBM). It is shown that titanium alloys obtained by AM have lower corrosion resistance in 20 wt% hydrochloric acid than alloys obtained by TT. The relationship between corrosion resistance and the microstructure of alloys fabricated by different technologies were established. Namely, corrosion resistance deterioration of additively manufactured α and near α titanium alloys is explained by the formation during EBM of a metastable Widmanstätten and martensitic structure.

Keywords: *titanium alloys, additive manufacturing, electron beam melting, corrosion resistance, electrochemical characteristics.*

Klymenko A. V., Kovalenko S. Yu., Polishko G. O., Tunik A. Yu., Byk M. V., Buket O. I., and Shapiro O. A. Corrosion resistance of stainless steel AISI 310s in lead melt at the temperature 450°C.....30

The corrosion resistance of AISI 310s stainless steel samples in lead melt at 450°C with limited oxygen access is studied. According to the results of corrosion tests, it is found that the dynamics of changes in the corrosion rate of AISI 310s steel shows a tendency to decrease from 0.474 mm/year to 0.045 mm/year with increasing test duration from 240 to 1440 h, respectively. Possibly, the corrosion rate change of steel AISI 310s is due to the formation of protective oxide films on the surface of the samples. According to the results of scanning and optical microscopy, the changes in the structure and composition of corrosion products formed on the surface with an increase in the duration of testing is shown. It has been established that with test duration increase to 720 h, a homogeneous and dense structure of the corrosion product layer is formed on the surface. The layer of corrosion products of the composition O, Si, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni and Pb, formed after 240 h of testing, turns into a two-layer structure with a clear separation of layers that differ in composition. Thus, near the surface of the base metal, the layer of corrosion products consisted of O, Cr, Fe, Ni and Pb, and the layer in contact with the lead melt – O, Cr, Fe and Pb. In addition, coagulation of carbides on the base metal and their precipitation along the grain boundaries and along the rolling lines after 720 h of test is established. It is found that the microhardness of the base metal is 1650±50 MPa, 1855±45 MPa and 1730±60 MPa after 240, 720 and 1440 h of testing in lead melt, respectively, while the microhardness

of the corrosion products is 3710±425 MPa and 3020±615 MPa after 240 and 720 h of testing, respectively.

Keywords: *corrosion resistance, stainless steel, lead melt, scanning and optical microscopy.*

Stechyshyn M. S., Stechyshyna N. M., Dykha O. V., Martynyuk A. V., Liukhovets V. V., and Luk'yanyuk M. V. Corrosion and mechanical wear of nitrided steels in acid environment.....36

The analysis of physicochemical and tribological characteristics of corrosion and mechanical fracture of structural steels nitrided in anhydrous medium in an acidic model environment is carried out. It is shown that the high “flexibility” of the adaptation of nitrided layers to changes in external load conditions is explained by the condition of minimizing the $\Delta E/A$ ratio, the mechanism of which may be different. In the case of elastic-plastic contact the processes in the case under fracture of structural steels nitrided in anhydrous medium occurs due to the formation of dense protective films on the fracture surface, and in the case of plastic contact – by increasing the barrier effect of the debris-layer. The influence of temperature and sucrose on the intensity of surface fracture is clarified.

Keywords: *corrosion-mechanical destruction, anhydrous nitriding in a glow discharge, work of loading forces, internal energy.*

Tsybailo I. O., Svirska L. M., Solovei P. R., Krechkovska S. R., Datsko B. M., and Student O. Z. Use of electrolytic hydrogenation to visualize the damage of long-term operated heat-resistant steel of TPP steam pipelines.....41

It was established that the effect of degradation of heat-resistant steel of TPP steam pipelines is more clearly manifested after its additional hydrogenation. On specimens of axial orientation, the negative effect of degradation was weaker near the outer surface of the pipe and increased as it approached its inner surface. An increase in the elongation of specimens was considered to be a consequence of the operational defects under the influence of hydrogenation. It was recorded only near the inner pipe surface of tangential orientated specimens and caused by defects in its diametrical section as a result of thermal fatigue. Testing of radial specimens made it possible to reveal operational defects caused by delaminations along the rolling texture. Fractographic analysis of specimens of hydrogenated steel demonstrated a large number of non-metallic inclusions delaminated from the matrix with lenticular flat fragments around them, formed due to shear fracture mechanism. In addition, areas of transgranular cleavage were recorded in the metal of pipes with a large number of shutdowns. These areas were considered as a fractographic sign of the embrittlement effect of internal hydrogen, cumulatively absorbed by steel both during operation on steam pipes and during electrolytic hydrogenating.

Keywords: *heat-resistant steel, fracture, degradation, hydrogenation.*

Ozouaki S. and Berthod P. Behaviors of (Ti, C)-containing cast (Co, Ni)-based superalloys in oxidation and creep at 1200°C.....48

Six alloys (25 wt% Cr, 0.4 C, 1.6 Ti, Co and Ni (bal.)) were prepared by casting for evaluating their oxidation and creep properties at 1200°C. Their microstructures consist of a dendritic matrix with eutectic carbides in the interdendritic spaces. Carbides are TiC for the alloys richer in Co than in Ni, and chromium carbides in the alloys richer in Ni than in Co. Differential thermal analysis shows that all alloys start melting above 1250°C. The oxidation tests in air at 1200°C allow observing a chromia-forming behavior of the alloys rich in nickel better than the cobalt alloys. In contrast, the creep resistance tests at 1200°C demonstrate an undeniable superiority of the alloys rich in cobalt. Good compromise for both types of high temperature

behavior appears to be obtained by a Co-base alloy containing nickel as minor element but with significant proportion in nickel (15...30 wt% Ni).

Keywords: *Co and Ni alloys, TiC carbides, chromium carbides, creep resistance, high temperature oxidation.*

- Razmyshlyayev O. D., Maksimov S. Yu., Berdnikova O. M., Prilipko O. O., Kushnarova O. S., and Alekseienco I. I. Structure of low-alloy steel joints after welding under an external electromagnetic field effect.....55

Parameters of heat-affected zone (HAZ) effect on microstructure, phase composition, and microhardness of welded joints (WJ) metal of 09Г2С steel, obtained without and with the use of longitudinal and transverse electromagnetic fields, are studied. Changes in the structural parameters of the weld metal and the heat affected zone in the areas of overheating, normalization, etc. were analyzed. The conditions for obtaining high-quality crack resistant welded joints under the influence of an external electromagnetic field were determined.

Keywords: *low-alloy steel, welded joints, magnetic field, heat-affected zone, microstructure, phase composition, microhardness.*

- Lutsenko V. A., Parusov E. V., Parusov O. V., Lutsenko O. V., Chuiko I. M., and Golubenko T. M. Peculiarities of formation of high-carbon steel structure during rolling.....60

Features of the formation and distribution of the degree of pearlite dispersity in the steel billet of C82D steel (EN ISO 16120-2:2017) and also in the process of its hot plastic deformation in various technological areas of the rolling mill, were established. The structure is a lamellar pearlite with different degrees of dispersity, regardless of the technological selection area of the samples. In the process of approaching to the axial zone of the rolled product, the interplate distance of pearlite increases and reaches the largest values in the center. It is found, that hot plastic deformation should be completed at a controlled temperature of the metal fall of the last finishing stand, while the stage of water cooling should be excluded, which will reduce the temperature gradient between the surface and the center of the rolled product before cooling.

Keywords: *high-carbon steel, wire rod, temperature, recrystallization, structure, pearlite, dispersity.*

- Brezinová J., Hašul' J., Brezina J., Maruschak P. O., and Viňáš J. Determination of tribological properties of multilayer coatings based on nitrides.....68

The coefficient of friction (COF) of AlTiCrN and AlTiN multilayer coatings is evaluated. The results of research on the evaluation of the COF, the values of the removed material volume and the specific abrasion values for multilayer coatings based on nitrides for different path radius are presented. Various wear mechanisms of worn surfaces for the different loading conditions at a temperature of 400°C are found. It is shown that the AlTiN coating can be used in environments with higher temperatures, i.e. also on the inserts of molds used in high-pressure casting of Al and its alloys.

Keywords: *surface engineering, coatings, friction, nitrides, tribology.*

- Titov A. V., Balushok K. B., Ostash O. P., Titov V. A., Koreva V. O., Polyvoda S. L., and Chepil R. V. Pressing of semi-finished products from of the Al-Mg-Sc alloys in isothermal conditions.....74

The results of modeling and experimental research of the hot isothermal pressing process of various thicknesses strips from cast cylindrical blanks of 1570 and 1545

alloys of Al–Mg–Sc system are presented. The temperature-force parameters of the process and the pressed strip geometry to obtain its minimum damage are established. It is shown that during pressing of a \varnothing 30 mm workpiece at 360°C the calculated damage $\omega = 0.35...0.45$ for a strip with a cross-section of 30×12 mm without visually observable surface cracking. In the strip with a cross-section of 30×6 mm at $\omega = 0.50...0.55$, macrocracks are recorded.

Keywords: *aluminum alloys, hot pressing, process modeling, structure, damage.*

Makymova S. V., Voronov V. V., Kovalchuk P. V., and Zvolinsky I. V.

The influence of alloying elements on heat-resistance
of Ni-based filler metals and brazed joints.....81

The influence of adhesive-active elements on the heat resistance of the experimental Ni–Cr–Co–Al–(Ti, Nb, W, Mo, Zr)-based filler and brazed joints of nickel superalloy ZhS6U made these fillers are analyzed. Doping with zirconium (>2 wt%) has been found to significantly impair the heat resistance of both the brazing filler metal and the brazed joints. It is shown that it is possible to partially compensate the negative effects of zirconium, due to increased doping with chromium. It is noted that the additional doping with chromium (up to 15 wt%) can increase the heat resistance of nickel filler metal by almost 30%. It is also found that additional alloying with titanium and niobium instead of zirconium allows obtaining a level of heat resistance of both filler metal and brazed joint close to the values of the base metal – heat-resistant nickel superalloy ZhS6U.

Keywords: *high-temperature vacuum brazing, brazing filler metal, nickel superalloy, heat resistance, oxidation depth, adhesive-active elements.*

Ryabtsev I. O., Perepletchikov E. F., Babinets A. A., Ryabtsev I. I., Lentyuhov I. P., and Bogaichuk I. L. Plasma-powder surfacing of alloys based on nickel

and cobalt on copper.....87

The results of studies of the formation of deposited metal and its joints with base and deposited metals during plasma surfacing on copper with powders that ensure the production of wear-resistant deposited metal based on nickel or cobalt are presented. It is established that nickel-based ПП-CP4 powder provides the best results regarding welding and technological properties. When using ПП-AH34 powder, which provides the production of deposited metal based on cobalt, individual defects are found in the deposited metal in the form of interlayers and individual inclusions of copper in the deposited layer based on cobalt.

Keywords: *surfacing on copper, plasma-powder surfacing, nickel- and cobalt-based alloys, weldability, fusion zone.*

Fedyna L. O., Fedorchuk A. O., and Fedyna M. F. Interaction of components

and crystal structure of compounds in the Pr–Cu–Ge system.....95

Using X-ray diffractive phase and structural analysis and partially microstructural analysis methods the phase equilibria in the ternary system Pr–Cu–Ge were investigated and the isothermal sections of the phase diagram of the system at 870 K (0...50 at.% of Pr) and 670 K (50...100 at.% of Pr) were constructed. The existence of seven ternary compounds – PrCu₂Ge₂, Pr₂CuGe₆, Pr₂Cu₃Ge₃, PrCu_{0.817}Ge₂, Pr₆Cu₈Ge₈, PrCu_{1.25...0.95}Ge_{0.75...1.05}, PrCu_{0.77...0.5}Ge_{1.23...1.5} was established at 870 K. Only one ternary germanide ~Pr_{0.6}Cu_{0.22}Ge_{0.18} with undetermined crystal structure was found in R rich range at 670 K. All ternary germanides are formed at constant composition except phases with AlB₂ structure type. Appreciable solubility of the third component in the compounds of binary systems was not observed. The structure parameters were determined for ternary germanides: Pr₂CuGe₆ (structure type (ST) Ce₂CuGe₆, Pearson symbol (PS) oS18, space group (SG) Amm2, $a = 4.19300(4)$ Å, $b =$

= 4.05742(4) Å, $c = 21.4823(2)$ Å, $R_I = 0.0686$, $R_P = 0.0993$), PrCu_{1.25}Ge_{0.75} (ST AlB₂, PS $hP3$, SG $P6/mmm$, $a = 4.2922(2)$ Å, $c = 3.9193(3)$ Å, $R_I = 0.0543$, $R_P = 0.1036$), PrCu_{0.72}Ge_{1.28} (ST AlB₂, PS $hP3$, SG $P6/mmm$, $a = 4.19347(6)$ Å, $c = 4.1817(1)$ Å, $R_I = 0.0504$, $R_P = 0.0728$). Relationships of investigated system Pr–Cu–Ge with previously studied R–Cu–Ge systems, and structure peculiarities of established ternary germanides of Cu and Pr were analyzed.

Keywords: *praseodymium, copper, germanium, ternary system, phase equilibria, ternary compound, crystal structure, structure type.*

Sylovaniuk V. P., Ivantyshyn N. A., and Filipov M. V. Healing of cracks
in a transtropical elastic body during torsion.....102

A mathematical model of crack healing in a transversely isotropic cylinder subjected to torsional deformation has been constructed. The problem is reduced to solving the integral equation with respect to the displacements of the crack surfaces. For the case when the crack is filled in the entire volume, an exact analytical solution of the corresponding integral equation is obtained. The effectiveness of cylinder strengthening depending on the geometric parameters of the crack and the mechanical characteristics of the injection material after solidification are determined.

Keywords: *crack healing, strength, anisotropy, torsion.*

Maksymovych M. O., Maksymovych O. V., and Dutkiewicz M. Calculation
of stresses in composite strips with cracks on the basis of modified
integral equations taking into account their edges contact.....107

An algorithm for studying stresses near curvilinear cracks in an anisotropic strip is developed, which is based on the method of singular integral equations. The kernels of the integral equations are written on the basis of a Green's-type solution, so the boundary conditions on the rectilinear boundaries of the strip are fulfilled identically. Green's solution is obtained for isolated and periodically placed cracks. Stresses in composite strips with cracks under the action of tension, pure bending, three-point bending and concentrated forces are determined.

Keywords: *anisotropic strip, cracks, Green's solution, contact of crack's edge, singular integral equations.*

Glotka O. A. and Ol'shanetskii V. Yu. Mathematical prediction of the properties
of heat-resistant nickel alloys by directional crystallization.....115

As a result of the experimental data processing the ratio of alloying elements K_γ which can be used for estimation of mechanical properties, taking into account the complex influence of the main components of an alloy, is proposed for the first time. Regression models are presented, with the help of which it is possible to calculate dimensional mismatch, strength, heat resistance, number of γ' -phases and density of alloys with high accuracy. The regularities of the composition influence on the properties of heat-resistant nickel alloys of directional crystallization are established. It is shown that for multicomponent nickel systems it is possible to predict with high probability a misfit, which significantly affects the strength characteristics of alloys of this grade. The perspective and effective direction for prediction of the basic characteristics influencing a complex of service properties of alloys both during the development of new and improvement of structures of the known industrial grades, is shown.

Keywords: *heat-resistant nickel alloys, mismatch (γ/γ' -mismatch), strength, heat resistance.*

*Shakhbazov Ya. O., Shyrovkov V. V., Cheterbukh O. Yu., Griner I. M.,
Vasylyiv Kh. B., and Melnykov O. V.* Evaluation of residual stresses
during mechanical treatment of machine parts..... 122

The technological possibilities of residual stresses control during mechanical treatment by correcting the distorted structure of the machined surface of machine parts by changing the direction of the cutting speed vector under rough and finish operations are considered. The possibility of using the Bauschinger effect in the process of cutting metals in order to influence the magnitude and sign of the residual stresses of the first kind by checking the technological conditions of processing is shown. Using the example of steel 45, it is established that mechanical processing of parts according to the proposed hypothesis allows us not only to improve the quality of the metal surface layer, but also to increase the service life of friction pairs by 25...50%.

Keywords: *residual stresses, plastic deformation, stress, Bauschinger effect, the direction of the vector cutting velocity.*

JUBILEES

Waclaw-Antoni Kasprzak (to the 90th birthday)..... 128