

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. 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, 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: 79060, Львів, 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 79060, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74,
(38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27.
E-mail: journal.pcm@gmail.com

Відповідальний секретар редакції **Р. Р. Кокот**

Редактори Д.С. Бриняк, О.Т. Досин, Л.Є. Єлейко. Технічний редактор І.В. Калинюк

Зав. групою комп'ютерної підготовки видання І. В. Калинюк

Комп'ютерний набір Л. Г. Колчак, Г. М. Кулик

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

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

ТОМ 60, № 3, 2024

травень – червень

УДК 62:[544+539](051)

ЗМІСТ

- Станкевич О. М., Ребот Д. П.* Методи штучного інтелекту для акустико-емісійного діагностування стадій руйнування (Огляд).
Ч. 1: Алгоритми неконтрольованого та контрольованого машинного навчання..... 5
- За результатами аналізу найновіших досліджень оцінено можливості використання алгоритмів неконтрольованого та контрольованого машинного навчання для автоматичного опрацювання сигналів акустичної емісії, щоб ідентифікувати та локалізувати їх джерела. Порівняно точність результатів для різних підходів та окреслено напрямки її підвищення. Підтверджено важливість подальших досліджень для адаптації та оптимізації новітніх методик для різних матеріалів та структур.
- Ключові слова:** акустична емісія, машинне неконтрольоване та контрольоване навчання, ідентифікація дефектів.
- Силованюк В. П., Івантишин Н. А., Дідух А. І.* Напружено-деформований та граничний стани попередньо напруженого тіла із залікованою тріщиною..... 15
- У межах механіки крихкого руйнування матеріалів з початковими напруженнями розглянуто проблему залікування плоскої тріщини за допомогою ін'єкційних технологій. За використання інтегральних перетворень Фур'є отримано сингулярні інтегральні рівняння щодо функцій стрибка переміщень на поверхнях заповненої тріщини. Одержано точний розв'язок відповідного рівняння за еліптичної тріщини в площині нормального відриву. Залишкову міцність тіла із залікованою тріщиною розраховували за критерієм Ірвіна. Встановлено параметри, від яких залежить ефективність відновлення міцності попередньо напруженого тіла з тріщиною.
- Ключові слова:** ізотропне тіло, попередньо напружене тіло, залікування тріщин, міцність матеріалу.
- Вербовицький Ю. В.* Статистичний аналіз досліджень електродних матеріалів типу La–Mg–Ni для нікель-металогідридних батарей за 2000–2024 роки.....22

Виконано статистичний аналіз досліджень за 2000–2024 роки бінарних та багатоконпонентних сплавів та сполук на основі рідкісноземельних металів, магнію та перехідних металів – перспективних воденьсорбційних матеріалів, які містять структури складу AB_2 , AB_3 , A_2B_7 , A_3B_{19} та AB_4 . Проаналізовано близько 500 наукових публікацій, які є у наукометричних базах даних типу Scopus та Web of Science. Більшість наукових праць зосереджені на дослідженні електродних матеріалів на основі La–Mg–Ni. Велику увагу у дослідницьких роботах приділено розробці матеріалів із найбільшою розрядною ємністю та циклічною тривкістю. Важливим елементом таких досліджень також є встановлення взаємозв'язку між складом, природою компонентів та способом отримання електродних матеріалів та їх електрохімічними властивостями. Через багатофазну природу більшості досліджених сплавів такий взаємозв'язок можна встановити лише для вузького кола матеріалів. Необхідно вдосконалити існуючі методики синтезу для отримання однофазних зразків, яких є менше. Аналіз досліджень показує певний дисбаланс у вивченні окремих електрохімічних параметрів електродних матеріалів. Більшу увагу слід приділити кінетичним властивостям негативних електродів, циклічній стабільності за різних режимів навантаження та температури навколишнього середовища.

Ключові слова: *рідкісноземельний метал, магній, сплави, воденьсорбційні матеріали, електрохімічні властивості, нікель-металогідридні батареї.*

Лук'яненко О. Г., Гвоздецький В. М., Студент М. М., Студент О. З.,
Лаврись С. М., Мазола Н. З. Термодинамічний аналіз реакцій утворення
хімічних сполук під час електродугового напилювання покриттів
із порошкових дротів..... 33

За зміною енергії Гіббса визначено термодинамічну ймовірність утворення простих сполук (оксидів, нітридів, карбідів) зі складників порошкових дротів під час напилювання відновних покриттів електродуговим методом. Оцінено можливі втрати легувальних елементів внаслідок випаровування у чистому вигляді та у складі простих сполук.

Ключові слова: *електродугове напилювання, порошкові дроти, покриття, енергія Гіббса, оксиди, нітриди, карбіди, тиск насиченої пари.*

Погрелюк І. М., Труш В. С., Задорожна Х. Р., Сірак Я. Я., Кравчишин Т. М.
Фазовий склад, структура та властивості електроіскрових покриттів
на титані..... 41

Оцінено фазовий склад, структуру та характеристики модифікованого шару титану VT1-0 після електроіскрового легування (ЕІЛ) та його комбінування з оксидуванням та азотуванням. Як електродні матеріали під час ЕІЛ використано графітовий, нікелевий та молібденовий електроди. Визначено антифрикційні властивості сформованих покриттів у парі з керамікою Al_2O_3 за тертя без мащення. Встановлено позитивний вплив комбінованого оброблення на втомну довговічність титану VT1-0 за малоциклового чистого згину.

Ключові слова: *титан VT1-0, електроіскрове легування, вуглець, нікель, молібден, комбіноване оброблення, оксидування, азотування, твердість, структура, коефіцієнт тертя, втомна довговічність.*

Рябцев І. О., Бабінець А. А., Лентюгов І. П. Керування формуванням
структури металу, наплавленого дуговим методом порошковими
дротами..... 48

Досліджено керування проплавленням, часткою основного металу в наплавленому, а також формуванням та структурою металу, наплавленого дуговим методом на циліндричні та плоскі деталі самозахисними порошковими дротами

ПД-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8...2,8 mm. Встановлено, що на проплавлення та частку основного металу в наплавленому найбільше впливає струм наплавлення, а на стабільність процесу, якість формування наплавленого металу та дефекти у ньому – напруга дуги. З'ясовано, що за дугового наплавлення циліндричних деталей вказані вище показники змінюються зі зсувом осі електродного дроту (дуги) зі zenіту наплавленої деталі проти напрямку її обертання. Виявлено, що, змінюючи режими наплавлення, які призводять до зниження погонної енергії, можна керувати структурою наплавленого металу, зменшуючи ширину кристалітів та підвищуючи його мікротвердість. Використовуючи отримані результати, можна збільшити продуктивність наплавлення деталей, зменшуючи кількість наплавлених шарів.

Ключові слова: *дугове наплавлення, наплавлений валик, глибина проплавлення, якість формування, структура металу, порошковий дріт.*

Матвійчук О. О. Формування мезоструктурних композицій на основі тугоплавких сполук для пар тертя (Огляд).....56

Висвітлено створення мезоструктурних композицій для пар тертя з твердих сплавів на основі карбідів WC та TiC. Продемонстровано, що клас мезоелемента визначатиме особливості спікання мезокомпозиції. Для пар тертя придатні мезокомпозиції першого та другого класів на основі карбідів тугоплавких сполук, причому для першого класу необхідно використовувати твердофазне спікання під тиском, щоб запобігти швидкому розпаду гранул мезоелементів, а для другого достатньо рідкофазного спікання. Продемонстровано залежність тріщино- та зносотривкості від об'ємного вмісту зв'язувального металу та гранул мезоелементів у композиції та їх вплив на рівень залишкових термічних напружень, які є нижчими порівняно з однорідними твердими сплавами. Висвітлено дію легувальних додатків (Cr_3C_2 та Mo_2C) на мезоеlementи та формування мезоструктури під час рідкофазного спікання. Обґрунтовано необхідність використання нікелевого зв'язувального для виготовлення пар тертя на основі карбідів WC та TiC для роботи в турбінах атомних реакторів.

Ключові слова: *мезоструктурний твердий сплав, спікання, торцеві ущільнювачі, пари тертя, втомна міцність, зносотривкість, тріщиностійкість, робота руйнування, пружна та пластична деформації, залишкові термічні напруження.*

Ільченко М. І., Руденко О. Г., Ростова Г. Ю., Ільченко О. М., Ситін В. І. Механічні властивості шаруватих композитів на основі Ст3–Cu і Ст3–Ni.....66

Подано результати механічних випробувань металевих шаруватих композитів (МШК) на основі Ст3–Cu і Ст3–Ni залежно від кількості об'ємних часток первинних матеріалів і термічної обробки. Порівняно границі міцності, отриманої експериментально та розрахованої за правилом суміші. Показано, що механічні властивості залежать не тільки від первинних властивостей компонентів МШК, але також істотно від технологічних чинників. На підставі аналізу зроблено припущення про зростаючий вплив перехідних зон та меж з'єднання на механічні властивості МШК. Отримані експериментальні результати можна використати для визначення параметрів термообробки, які забезпечать необхідний рівень механічних властивостей МШК.

Ключові слова: *металевий шаруватий композит, накопичувальне пакетне вальцювання, вальцювання у вакуумі, метод інтенсивної пластичної деформації, термічна обробка, правило суміші, механічні властивості.*

Бакун Б. М., Кречковська Г. В. Обґрунтування міцності конструкції з'єднання сталевий головки та вуглепластиковий насосної штанги.....72

Розглянуто особливості напружено-деформованого стану гібридних насосних штанг (з вуглеволоконним осердям та склопластиковою оболонкою) для видобування нафти. Запропонована конструкція з'єднання сталеві головки з тілом гібридної штанги. Методом скінченних елементів проаналізовано напруження в з'єднанні елементів штанги за її навантаження згином та розтягом. Встановлено, що напруження втричі нижчі за границю міцності. Конструктивне рішення з'єднання вуглепластикових штанг зі сталевими головками рекомендовано для використання у виробничому процесі нафтодобування.

Ключові слова: *гібридна насосна штанга, вуглепластикове осердя штанги, склопластикові оболонки штанги, скінченно-елементний аналіз, згин, розтяг.*

Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Мокрий О. М., Учанін В. М., Цирульник О. Т., Звірко О. І., Лецак Р. Л. Порівняння застосовності різних методів неруйнівного контролю для оцінювання концентрації водню у вуглецевій сталі.....77

Досліджено зміну параметрів різних фізичних методів неруйнівного контролю (поверхневих акустичних хвиль, магнетної структуроскопії, електрохімічного потенціалу) залежно від концентрації водню у вуглецевій сталі в діапазоні 0,4...8,5 ppm. Встановлено, що найчутливішими є значення коерцитивної сили, які змінювались більш ніж на 25%. Залишкова магнетна індукція та електрохімічний потенціал поверхні металу – відповідно, на 23 та 20%, тому також застосовні для оцінювання вмісту водню у цій сталі. Інші досліджувані параметри менш ефективні. Зокрема, площа петлі магнетного гістерезису змінювалась приблизно на 10%, а максимальна магнетна проникливість та відносна швидкість поширення поверхневої акустичної хвилі – на ~ 2%.

Ключові слова: *вуглецева сталь, електрохімічне наводнювання, концентрація водню, швидкість поширення поверхневої акустичної хвилі, коерцитивна сила, залишкова магнетна індукція, площа петлі магнетного гістерезису, максимальна магнетна проникність, електрохімічний потенціал поверхні сталі.*

Даниляк М.-О. М., Корній С. А. Інгібувальні властивості йонообмінного протикорозійного пігменту на основі природного монтморилоніту для лакофарбових покриттів83

Методом рідкофазного йонного обміну отримано екологічно безпечні протикорозійні пігменти для лакофарбових покриттів на основі природного мінералу монтморилоніту, модифікованого катіонами цинку. Методами потенціодинамічної поляризації та електрохімічної імпедансної спектроскопії встановлено, що корозійна тривкість сплаву Д16Т підвищується у середовищі кислого дощу з додатками одержаного пігменту. Методом сканівної електронної мікроскопії вивчено морфологію поверхні сплаву Д16Т після експозиції в інгібованих середовищах та механізм захисної дії модифікованого монтморилоніту у кислому дощі. Встановлено, що ступінь захисту у такому середовищі за використання Zn-монтморилоніту для алюмінієвого сплаву Д16Т становить вище 90%. Отриманий модифікований монтморилоніт може бути перспективним протикорозійним пігментом для захисних лакофарбових покриттів.

Ключові слова: *йонообмінні мінерали, бентоніт, монтморилоніт, протикорозійний пігмент, ефективність інгібування, алюмінієвий сплав, електрохімічна імпедансна спектроскопія.*

Сніжної Г. В., Нарівський О. Е., Сніжної В. Л., Пуліна Т. В., Шейко С. П. Вплив питомої магнетної сприйнятливості сталі AISI 304 на її опір пітингуванню в модельних оборотних водах.....92

Досліджено вплив хлоридовмісного середовища і питомої магнетної сприйнятливості аустенітної сталі AISI 304 на її пітинготривкість у модельних оборотних водах з рН 4 і концентрацією хлоридів 300 і 600 mg/l, які часто утворюються під накипом або осадом з оборотної води на теплопередавальних елементах теплообмінників. Встановлено, що критична температура пітингування (КТП) сталі незначно знижується (5...6°C) зі збільшенням питомої магнетної сприйнятливості аустеніту χ_0 від $2,23 \cdot 10^{-8}$ до $2,31 \cdot 10^{-8}$ m³/kg. Виявлено, що вплив рН середовища на КТП сталі відчутніший, ніж параметра χ_0 . Зокрема, КТП інтенсивно зростає на 10...13°C зі збільшенням рН модельних оборотних вод від 4 до 7, а за рН 8 така ж та навіть нижча, ніж за рН 4. З'ясовано, що від значення χ_0 сталі суттєво залежать корозійні втрати металів хрому, нікелю і заліза із пітингів у модельних оборотних водах з рН 4 і концентрацією хлоридів 300 і 600 mg/l, що зумовлено репасацією метастабільних пітингів на її поверхні та перерозподілом густини струмів у стабільних.

Ключові слова: *пітинготривкість, аустеніт, питома магнетна сприйнятливість, структурна гетерогенність сталі, селективне розчинення металів із пітингів, хлоридовмісне середовище.*

Нестеров О. А., Олійник О. О., Демянчук Д. О. Корозійно-втомна міцність експлуатаційно деградованої сталі елементів морського портального крана..... 99

Подано результати випробувань на втомну витривалість низьковуглецевої сталі експлуатованого 33 роки крана. Для експериментів вибрано верхню полицю коромисла і праву стінку колони, метал яких відрізнявся за ударною в'язкістю поздовжніх до напрямку вальцювання зразків вдвічі. Побудовано криві втомної та корозійно-втомної витривалості поперечних зразків та визначено границі втомної та корозійно-втомної міцності. Корозивним середовищем слугував 3%-ий водний розчин NaCl, який моделював конденсовану на поверхні сталевих деталей вологу (розпилена морська вода поблизу узбережжя). Встановлено, що для сталі з різних ділянок крана відмінність границь втомної витривалості становить 15%. Корозивне середовище за частоти циклічного навантаження 3 Hz дещо знизило умовну границю корозійно-втомної витривалості порівняно з втомною, однак принципово не змінило низьку чутливість цієї характеристики для оцінювання експлуатаційної деградації металу. Зроблено висновок про переваги ударної в'язкості порівняно з границею втомної витривалості для оцінювання технічного стану експлуатованого прокату.

Ключові слова: *сталь, експлуатаційна деградація, ударна в'язкість, втомна витривалість, корозійна втома.*

Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Настасяк С. В., Любчак М. О. Поширення тріщин у складених біметалевих пластинах за впливу водню..... 105

Запропоновано розрахункову модель для визначення залишкової довговічності складеної біметалевої пластини з півнескінчених пластин зі сталей 15X2МФА і 321 з прямолінійною тріщиною, яка статично розтягується за високої температури і дії воденьвмісного середовища рівномірно розподіленими зусиллями перпендикулярно до лінії її розташування. В основі моделі – енергетичний підхід про баланс роботи зовнішніх сил і викликаних при цьому внутрішніх енергій. Модель реалізовано числово. Побудовано залежності залишкової довговічності пластини від розміру початкової тріщини, а також впливу воденьвмісного середовища.

Ключові слова: *складена біметалева пластинка, воденьвмісне середовище, високотемпературна повзучість, енергетичний підхід, коефіцієнт інтенсивності*

напружень, зона передруйнування, період докритичного росту воднево-механічної тріщини.

Гембара Т. В., Фірман В. М., Марич В. М. Вплив багаторазових гідроударів потоку нафти на безпечність експлуатації трубопровідного транспорту.....110

Виконано скінченноелементне моделювання напружено-деформованого стану лінійної ділянки трубопроводу за нестационарного силового навантаження, щоб визначити її залишкову довговічність. Розраховано довговічність труби зі сталі Х60 нафтопроводу з внутрішньою поверхневою тріщиною за турбулентного потоку нафти і гідроударів. Встановлено, що гідроудари знижують залишкову довговічність труби майже вдвічі, порівняно з ламінарним потоком. Тому їх важливо враховувати, щоб гарантувати безпеку експлуатації трубопровідного транспорту.

Ключові слова: *нафтопровід, поверхнева тріщина, напружено-деформований стан, турбулентний потік нафти, гідроудари, залишкова довговічність, безпека, трубопровідний транспорт.*

Губенко С. І., Парусов Е. В. Еволюція неметалевих включень за гарячого вальцювання сталей.....115

Досліджено особливості трансформації різних типів неметалевих включень, а також їх руйнування за гарячого вальцювання листових сталей та бунтового прокату залежно від температурних та силових режимів. Показано, що відмінність параметрів технологічних процесів гарячої деформації обумовлює відмінності формозміни та перерозподілу включень у сталевій матриці, а також конкурентних явищ, які їх супроводжують (контактного тертя та проковзування на межах включення–матриця). Проаналізовано особливості фізико-хімічної механіки неметалевих включень у сталях за гарячого вальцювання.

Ключові слова: *сталь, гаряче вальцювання, неметалеві включення, листовий та бунтовий прокати, міжфазні межі включення–матриця, дефекти, пластичність, руйнування.*

Шахбазов Я. О., Широков В. В., Четербух О. Ю., Василів Х. Б., Гасій О. Б., Мельников О. В., Білоус О. В. Оцінка спрацювання контактних поверхонь кулачків та роликів пресових привідних механізмів за циклічного навантаження..... 124

Наведено методику аналітичного розрахунку спрацювання елементів силових механізмів технологічного обладнання. Встановлено найменше спрацювання контактних кулачків і роликів приводу натискної плити плоскоштанцювального преса за закону періодичного руху “Синусоїдне пришвидшення (симетрична тахограма)”, яке для кулачка становить $h_1 = 7,9 \cdot 10^{-5}$ м, а для ролика $h_2 = 7,72 \cdot 10^{-4}$ м.

Ключові слова: *силові механізми, закон періодичного руху, плоскоштанцювальний прес, експериментальні та аналітичні дослідження.*

Костін В. А., Лабур Т. М., Таранова Т. Г. Оцінювання властивостей сплаву В9бцс за умов, які моделюють термічний цикл зварювання плавленням.....130

Встановлено залежність частки та розмірів включень інтерметалідних фаз на основі Zr і Sc, які змінюються за нагрівання під час зварювання, змодельованого на зразках високоміцного алюмінієвого сплаву марки В9бцс системи легування Al–Zn–Mg–Cu. Спрогнозовано їх вплив на параметри в'язкості руйнування у металі на лінії сплавлення та зони термічного впливу з'єднань. Визначено, що швидкість охолодження зразків визначає розміри і форму інтерметалідних включень, розташованих вздовж меж зерен. Утворення грубих включень різної

протяжності, еліпсоподібних або близьких до сфери зумовлює відповідний механізм руйнування.

Ключові слова: *алюмінієвий сплав, моделювання циклу зварювання, зона термічного впливу, мікроструктура, механічні властивості.*

Данілов С. М., Тьомкін Д. О., Педаш О. О., Наумик О. О., Наумик В. В.

Комплексне модифікування жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ ітрієм та карбонітридом титану..... 137

Досліджено зразки, відлиті зі жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, комплексно модифікованого ітрієм та карбонітридом титану в різних комбінаціях, після гарячого ізостатичного пресування (ГІП) та подальшої термічної обробки. Комплексно модифікували, одночасно використовуючи ітрій та церій. Встановлено, що хімічний склад (з урахуванням кількості ітрію), а також механічні та жароміцні властивості литих зразків всіх варіантів відповідають вимогам ОСТ 1.90.126-85, за винятком ударної в'язкості зразків без карбонітриду титану, яка майже вдвічі нижча за висунуту розробником для відповідальних литих авіаційних виробів, а також для зразків з карбонітридом титану. Найкращий модифікувальний ефект одержано за комплексного модифікування сплаву з 0,075% карбонітриду титану. В інших варіантах виявлено огрубіння структури, а для зразків без нього – ще і оплавлення евтектичної (γ - γ')-фази, що, ймовірно, і викликало зниження ударної в'язкості. В результаті ГІП мікропори і пухкості, що не виходять на поверхню деталей (розташовані у внутрішніх обсягах металу), заліковуються, що сприяє стабілізації структури та властивостей матеріалу.

Ключові слова: *жароміцний нікелевий сплав, литий зразок, хімічний склад, модифікування, ітрій, карбонітрид титану, гаряче ізостатичне пресування, макро- і мікроструктура, механічні властивості, ударна в'язкість, тривала міцність.*

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 60, № 3, 2024

May – June

UDC 62:[544+539](051)

CONTENTS

- Stankevych O. M. and Rebot D. P.* Methods of artificial intelligence for acoustic emission diagnostics of fracture stages (A review).
P. 1: Algorithms of unsupervised and supervised machine learning.....5

Based on the analysis of the latest studies, the possibilities of using unsupervised and supervised machine learning algorithms for automating the processing of acoustic emission signals to identify and localize their sources are considered. The accuracy of the results for different approaches is compared and directions for its improvement are described. The importance of further research regarding the adaptation and optimization of the latest techniques for various materials and structures is confirmed.

Keywords: *acoustic emission, machine unsupervised and supervised learning, identification of defects.*

- Sylovanyuk V. P., Ivantyshyn N. A., and Didukh A. I.* Stressed-strain and limit states of a prestressed body with a healed crack 15

The problem of healing a plane crack using injection technology is considered within the framework of brittle fracture mechanics of materials with initial stresses. With the use of integral Fourier transforms, singular integral equations are obtained with respect to the functions of displacements jump on the surfaces of the filled crack. The exact solution of the corresponding equation in the case of an elliptical crack in the normal opening displacement plane is obtained. The residual strength of the body with a healed crack is calculated according to the Irwin criterion. The parameters on which the effectiveness of restoring the strength of a prestressed body with a crack depends, were established.

Keywords: *isotropic body, prestressed body, crack healing, material strength.*

- Verbovytskyy Yu. V.* Statistical analysis of research of La–Mg–Ni-based electrode materials for nickel-metal hydride batteries for the years 2000–2024.....22

The research results for the years 2000–2024 of binary and multicomponent alloys and compounds based on rare earth metals, magnesium, and transition metals – promising hydrogen sorption materials with compositions like AB_2 , AB_3 , A_2B_7 , A_5B_{19} , and AB_4 are analyzed. About 500 scientific publications and citation database like Scopus or Web of Science were analyzed. Research was focused on electrode mate-

rials based on La–Mg–Ni alloys. Much attention was paid to the development of materials with the highest discharge capacity and cyclic durability. Another important aspect is establishing the relationship between the composition, the nature of the components, the method of obtaining electrode materials, and their electrochemical properties. Due to the multiphase nature of most studied alloys, this relationship can only be established for a narrow range of materials. It is necessary to improve synthesis methods to obtain single-phase samples, which are currently uncommon. An analysis of the research reveals an imbalance in the study of individual electrochemical parameters of electrode materials. More interest should be paid to the kinetic properties of negative electrodes, their cyclic stability under different load modes and ambient temperatures.

Keywords: *rare earth metal, magnesium, alloys, hydrogen sorption materials, electrochemical properties, nickel-metal hydride batteries.*

Luk'yanenko A. G., Hvozdetskyi V. M., Student M. M., Student O. Z., Lavrys S. M., and Mazola N. Z. Thermodynamic analysis of the reactions of chemical compounds formation during electric arc spraying of powder wire coatings.....33

The thermodynamic probability of the formation of simple compounds (oxides, nitrides, carbides) from the components of cored wires during deposition of restorative coatings by the arc sprayed method was considered based on the change in Gibbs energy. The possible loss of doping elements due to evaporation in their pure form and in the composition of simple compounds was estimated.

Keywords: *arc spraying, cored wires, coating, Gibbs energy, oxides, nitrides, carbides, saturated vapor pressure.*

Pohrelyuk I. M., Trush V. S., Zadorozhna Kh. R., Sirak Ya. Ya., and Kravchyshyn T. M. Phase composition, structure and properties of electrospark coatings on titanium.....41

The phase composition, structure and characteristics of the modified BT1-0 titanium layer after electrospark alloying (ESA) and its combination with oxidation and nitriding were evaluated. Graphite, nickel, and molybdenum electrodes were used as electrode materials during ESA. The anti-friction properties of the formed coatings paired with Al₂O₃ ceramics under friction without lubrication were evaluated. The positive effect of combined processing on the fatigue life of BT1-0 titanium under low-cycle pure bending is shown.

Keywords: *titanium BT1-0, electrospark alloying, carbon, nickel, molybdenum, combined treatment, oxidation, nitriding, hardness, structure, coefficient of friction, fatigue life.*

Ryabtsev I. O., Babinets A. A., and Lent'uhov I. P. Control of the formation of metal structure surfaced with flux-cored wires.....48

Control of fusion penetration, the fraction of the base metal in the deposited material, as well as the formation and structure of the metal deposited by the arc method on cylindrical and flat parts with self-shielding powder-coated wires ПД-Нп-25Х5ФМС Ø 1.8...2.8 mm were experimentally studied. It was established that the welding current has the greatest influence on the fusion penetration and the fraction of the base metal in the deposited material, and the arc voltage affects the stability of the process, the quality of the deposited metal formation and the presence of defects in it. At the same time, during arc welding of cylindrical parts, the above indicators change with the shift of the axis of the electrode wire (arc) from the zenith of the cylindrical part that is being welded, against the direction of its rotation. It is shown that by changing the deposition modes, which lead to a decrease in the linear energy, it is possible to control the structure of the deposited metal, by decreasing the width of the crystallites and increasing its microhardness. The use of the results obtained in this work made it

possible to increase the productivity of the welded parts by reducing the number of welded layers.

Keywords: *arc surfacing, deposited bead, fusion penetration depth, forming quality, metal structure, flux-cored wire.*

Matviichuk O. O. Formation of mesostructure compositions based on refractory compounds for friction couples (A review)..... 56

The creation of mesostructural compositions for friction pairs made of cemented carbide based on WC and TiC carbides is presented. The class of mesoelement will determine the features of sintering of the mesocomposition. For friction pairs, mesocompositions of the first and second classes based on carbides of refractory compounds are suitable, and for mesocompositions of the first class, solid-phase sintering under pressure must be used to prevent rapid decay of the granules of mesoelements, and for mesocompositions of the second class, liquid-phase sintering is sufficient. The dependence of the crack growth resistance and wear resistance on the volume content of binder metal and mesoelement granules in the composition and their influence on the level of residual thermal stresses, which are lower compared to homogeneous hard alloys, is demonstrated. The influence of alloying elements such as Cr_3C_2 and Mo_2C on mesoelements and mesostructure formation during liquid phase sintering is highlighted. The necessity of using a nickel binder for the manufacture of friction pairs based on WC and TiC carbides for operation in nuclear reactor turbines is substantiated.

Keywords: *mesostructure cemented carbide, sintering, face seals, friction pairs, fatigue strength wear and crack growth resistance, work of fracture, elastic and plastic deformation, thermal residual stresses.*

Ilchenko M. I., Rudenko O. G., Rostova G. Yu., Ilchenko O. M., and Sytin V. I. Mechanical properties of layered composites based on St3–Cu and St3–Ni..... 66

The results tests of metal layered composites (MLC) based on Ct3–Cu and Ct3–Ni steels, depending on the number of volume fractions of original materials and heat treatment mode are proposed. The values of the experimental ultimate tensile strength are compared with the ultimate tensile strength calculated according to the mixture rule. It is shown that the mechanical properties depend not only on the original properties of the MLC components, but also significantly depend on technological factors. Based on the analysis performed, an assumption was made about the influence of the transition area of the joint boundaries on the mechanical properties of MLC. The obtained experimental data can be used to determine the heat treatment parameters, which will provide the required level of MLC mechanical properties.

Keywords: *metal layered composite, accumulative roll bonding process, vacuum roll bonding, severe plastic deformation, heat treatment, mixture rule, mechanical properties.*

Bakun B. M. and Krechkovska H. V. Justification of the structural strength of a connection of a steel head and a carbon-plastic pump rod..... 72

The peculiarities of the stress-strain state of hybrid sucker rods (with a carbon fiber core and a fiberglass shell) for oil production are considered. The design of the connection of the steel head with the body of the hybrid rod was proposed. The finite element method was used to analyze the stress in the rod elements connection under bending and tensile loading. It was established that the stresses are three times lower than the ultimate strength. The structural design of carbon-plastic rods connection with steel heads is recommended for use in the oil production process.

Keywords: *hybrid pump rod, carbon-plastic core of the rod, fiberglass shell of the rod, finite element analysis, tension, bending.*

<i>Dmytrakh I. M., Syrotyuk A. M., Mokryi O. M., Uchanin V. M., Tsyurulnyk O. T., Zvirko O. I., and Leshchak R. L. Comparison of applicability of different non-destructive test methods for assessing hydrogen concentration in carbon steel.....</i>	77
--	----

The change in the values of the parameters of different physical nondestructive testing methods (surface acoustic waves, magnetic structuroscopy, and electrochemical potential) was studied depending on the concentration of hydrogen in carbon steel in the range of 0.4...8.5 ppm. It was established that the most sensitive are the values of the coercive force, which changed by more than 25%. The values of the residual magnetic induction and the electrochemical potential of the metal surface changed by 23% and 20%, respectively, making them also applicable for assessing the hydrogen content in this steel. Other investigated parameters showed lower efficiency and their change was: for the area of the magnetic hysteresis loop of about 10%, and for the maximum magnetic permeability and the relative change in the velocity of propagation of the surface acoustic wave – approximately 2%.

Keywords: *carbon steel, electrochemical hydrogen charging, hydrogen concentration, surface acoustic wave propagation velocity, coercive force, residual magnetic induction, magnetic hysteresis loop area, maximum magnetic permeability, electrochemical potential of the steel surface.*

<i>Danyliak M.-O. M. and Korniy S. A. Inhibitory properties of an ion-exchange anti-corrosion pigment based on the natural montmorillonite for paint coatings.....</i>	83
--	----

Environment-friendly anti-corrosion pigments for paint coatings based on the natural montmorillonite mineral modified with zinc cations were obtained by the liquid phase ion exchange method. It was established by the methods of potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy that the corrosion resistance of aluminium alloy increases in the acid rain environment with obtained pigment. The surface morphology of the D16T aluminium alloy after immersion in inhibited environments and the protective mechanism of modified montmorillonite in acid rain were studied using scanning electron microscopy. It was established that the protection degree in such an environment with Zn-montmorillonite for aluminium alloy is above 90%. The obtained modified montmorillonite can be a promising anti-corrosion pigment for protective paint coatings.

Keywords: *ion-exchange minerals, bentonite, montmorillonite, anti-corrosion pigment, inhibition efficiency, aluminium alloy, electrochemical impedance spectroscopy.*

<i>Snizhnoi G. V., Narivs'kyi O. E., Snizhnoi V. L., Pulina T. V., and Sheiko S. P. Influence of the specific magnetic susceptibility of AISI 304 steel on its pitting resistance in model circulating waters</i>	92
---	----

The influence of the parameters of the chloride-containing media and the specific magnetic susceptibility of AISI 304 steel on its pitting resistance in model circulating waters with pH 4 and chloride concentration of 300 and 600 mg/l is investigated. Chlorides are often found under scale or precipitate from circulating water on the heat transfer elements of heat exchangers made of this steel. It was established that the critical temperature of pitting (CTP) of AISI 304 steel slightly (5...6°C) decreases with an increase in its specific media pH on the CTP of AISI 304 steel is greater than of the parameter χ_0 . Also, it was established that CTP increases intensively by (10...13°C) when the pH of model circulating waters increases from 4 to 7, and with pH 8 it is the same and even lower than with pH 4. It is found that corrosion losses of chromium, nickel and iron from pittings in model circulating waters with pH 4 and chloride concentration of 300 and 600 mg/l significantly depend on χ_0 of

steel, which is caused by the repassivation of metastable pittings on its surface and the redistribution of current density in stable ones.

Keywords: *pitting resistance, austenite, specific magnetic susceptibility, structural heterogeneity of steel, selective dissolution of metals from pitting, chloride-containing media.*

Nesterov O. A., Oliynyk O. O., and Demianchuk D. O. Corrosion-fatigue strength of operation degraded steel elements of marine portal crane.....99

The results of tests on the fatigue life of low-carbon steel for 33 years of operation of the gantry crane are presented. For the experiments the upper shelf of the rocker arm and the right wall of the column were chosen, the metal of which differed twice in the level of impact toughness of the longitudinal specimens to the rolling direction. Fatigue and corrosion-fatigue strength curves of transversal specimens were constructed with determination of the fatigue and corrosion-fatigue ultimate strength. The corrosive medium was a 3% NaCl aqueous solution, which simulated moisture condensed on the surface of steel parts caused by seawater spray near the coast. It was established that for two states of steel the difference in the fatigue ultimate strength is 15%. The corrosive environment at loading frequencies of 3 Hz slightly reduced the corrosion-fatigue ultimate strength compared to fatigue ultimate strength, but fundamentally did not change the low sensitivity of this characteristic for evaluating the operational degradation of metal. A conclusion was made about the advantages of impact toughness compared to the fatigue ultimate strength for evaluating the technical state of the operated rolled products.

Keywords: *steel, operational degradation, impact toughness, fatigue strength, corrosion fatigue.*

Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., Nastasiak S. V., and Liubchak M. O. Propagation of cracks in composite bimetallic plates under hydrogen effect..... 105

A computational model is proposed to determine the residual life of a composite bimetallic plate made of semi-infinite plates of 15X2MΦA and 321 steels with a rectilinear crack. The plate is statically tensioned at a high temperature and under the influence of a hydrogen-containing environment by uniformly distributed forces perpendicular to the line of its placement. The model is based on the energy approach about the balance of external forces and the resulting internal energies. This model is implemented numerically. Graphical dependences of the change in the residual service life of a plate on the size of the initial crack and the influence of a hydrogen-containing environment were constructed.

Keywords: *composite bimetallic plate, hydrogen-containing environment, high-temperature creep, energy approach, stress intensity factor, prefracture zone, period of subcritical growth of a hydrogen-mechanical crack.*

Hembara T. V., Firman V. M., and Marych V. M. Influence of multiple hydroshocks of oil flow on safe operation of pipeline transport..... 110

Finite element modeling of the stress-strain state of the linear section of the pipeline under non-stationary force load was carried out to determine its residual life. Calculations were made for a pipe made of X60 steel of an oil pipeline with an internal surface crack under turbulent oil flow and hydraulic shock. It was established that hydraulic shocks reduce the residual life of the pipe in almost 2 times compared to laminar oil flow. Therefore, they must be taken into account to guarantee the reliable operation of pipeline transport.

Keywords: *oil pipeline, surface crack, stress-strain state, turbulent flow of oil, hydraulic shock, residual life, security, pipeline transport.*

<i>Gubenko S. I. and Parusov E. V.</i> Evolution of nonmetallic inclusions during hot rolling of steels.....	115
--	-----

Peculiarities of the transformation of non-metallic inclusions of various types, as well as their fracture during hot rolling of sheet steels and wire rod products, depending on the temperature and force regimes along the entire route of pressure treatment, were studied. It is shown that the differences in the parameters of technological processes of hot deformation determines the differences in the processes of shape change and redistribution of inclusions in the steel matrix, as well as competing phenomena which accompany them (contact friction and slipping at the inclusion-matrix boundaries). The processes which determine the peculiarities of the physicochemical mechanics of the non-metallic inclusions in steels during hot rolling are discussed.

Keywords: *steel, hot rolling, non-metallic inclusions, sheet and wire rod rollings, inclusion-matrix interphase boundaries, defects, plasticity, destruction.*

<i>Shahbazov Ya. O., Shyrovkov V. V., Cheterbukh O. Yu., Vasylyiv Kh. B., Hasii O. B., Melnykov O. V., and Bilous O. V.</i> Assessment of wear of contact surfaces of cams and rollers of press drive mechanisms under cyclic loading.....	124
--	-----

The method of analytical calculation of the elements wear in power mechanisms of technological equipment is presented. It was established that the lowest wear of the contact cams and rollers of the pressure plate drive of the flat punching press is observed during the periodic movement “Sinusoidal acceleration (symmetric tachogram)” and is for the cam $h_1 = 7.9 \cdot 10^{-5}$ m and for the roller $h_2 = 7.72 \cdot 10^{-4}$ m.

Keywords: *power mechanisms, the law of periodic motion, flat punching press, experimental and analytical studies.*

<i>Kostin V. A., Labur T. M., and Taranova T. G.</i> Assessment of B96цc alloy properties under conditions simulating a thermal cycle of fusion welding.....	130
--	-----

Dependence of the fraction and the size of inclusions of intermetallic phases based on Zr and Sc, which change during heating under welding, with the Al–Zn–Mg–Cu alloying system simulated on samples of the high-strength B96cs aluminum alloy was established. Their influence on the fracture toughness parameters during crack initiation and propagation in the metal at the fusion line and the heat-affected zone of the joints was shown. It was determined that the cooling rate of the samples specified the size and shape of intermetallic inclusions located along the grain boundaries. The formation of coarse phase inclusions of various lengths, elliptical or ellipse or sphere-like, causes the appropriate mechanism of alloy fracture.

Keywords: *aluminum alloy, modeling of a welding cycle, heat-affected zone, microstructure, mechanical properties.*

<i>Danilov S. M., Tomkin D. O., Pedash O. O., Naumyk O. O., and Naumyk V. V.</i> Complex modification of heat-resistant ЖСЗДК-BI alloy with yttrium and titanium carbonitride.....	137
--	-----

Samples cast from heat-resistant nickel ЖСЗДК-BI alloy, complex modified with yttrium and titanium carbonitride in various combinations, after hot isostatic pressing (HIP) and subsequent heat treatment, were investigated. For comparison, complex modification was performed with the simultaneous use of yttrium and cerium. It was established that the chemical composition (taking into account the presence of yttrium in the alloys), as well as the mechanical and heat-resistant properties of the cast samples meet the requirements of OST 1.90.126-85, with the exception of the impact ductility of the samples without titanium carbonitride, which is almost twice lower than the additional requirements put forward by the developer for responsible aircraft castings, and also for the samples with titanium carbonitride. The best modifying

effect was obtained with the complex modified alloy with 0.075% titanium carbonitride. In other options, there is a coarsening of the structure, and for the samples without titanium carbonitride, melting of the eutectic (γ - γ')-phase is also observed, which probably contributes to the reduction of impact toughness. As a result of HIP, micropores and loosening which do not reach the surface of the parts (located in the internal volumes of the metal) are healed, which contributes to the stabilization of the material structure and properties.

Keywords: *heat-resistant nickel alloy, cast sample, chemical composition, modification, yttrium, titanium carbonitride, hot isostatic pressing, macro- and microstructure, mechanical properties, impact toughness, long-term strength.*