

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, 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, П. В. ЯСНІЙ

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), Г. БОЛЗОН (Італія), М. ЕЛЬБОВДЖАІНІ (США–Канада), Е. ГДУТУС (Греція), В. КЕЙН (Індія), 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, O. P. OSTASH, V. V. PANASYUK, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. SKALSKIY, O. Z. STUDENT, M. S. KHOMA, O. E. CHYHYRYNETS', V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRUL'NYK, P. V. YASNIY

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), G. BOLZON (Italy), M. ELBOUJDAINI (USA–Canada), E. GDOUTOS (Greece), V. KAIN (India), T. LAGODA (Poland), G. LESIUK (Poland), P. MOREIRA (Portugal), A. PICH (Germany), G. PLUVINAGE (France), J. POKLUDA (Czech Republic), G. SCHMITT (Germany), A. SEDMAK (Serbia), J. TORIBIO (Spain), L. TÓHT (Hungary), P. TRAMPUSH (Hungary), V. YARTYS' (Norway)

Відповідальний за випуск д-р техн. наук, проф. Г. М. Никифорчин
Responsible for issue Dr. (Engn.), Prof. H. M. Nykyforchyn

Адреса редакції: 79601, Львів МСП, Наукова, 5, Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України. Тел.: (032) 263-73-74,
(032) 229-62-30. Факс: (032) 264-94-27.
E-mail: journal.pcm@gmail.com

WWW-address: <http://pcmm.ipm.lviv.ua>

Editorial office address: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St.,
Lviv 79601, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74,
(38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27.
E-mail: journal.pcm@gmail.com

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

Редактори *Д. С. Бриняк, О. Т. Досин, Л. Є. Єлейко*

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

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

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

Підписано до друку 02.09.2021. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 070921 від 07.09.2021. 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", 2021

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 57, № 4, 2021

липень – серпень

ЗМІСТ

Нетребко В. В., Волчок І. П., Попов С. М., Акімов І. В. Особливості руйнування високохромистих чавунів за абразивного зношування.....5

Показано, що руйнування високохромистих чавунів у сухому та вологому абразивному середовищах залежить від їх хімічного складу, структури, розподілу хрому в металевій основі, властивостей абразиву і значною мірою від ефекту Ребіндера та виникнення мікрогальванічних пар. Встановлено, що відпал збільшує хімічну неоднорідність розподілу хрому в металевій основі. Наявність зон біля карбідів з пониженим до 8,5% вмістом хрому (негативний потенціал) та центральних частин зерен із концентрацією хрому понад 12% (позитивний потенціал) призводила до виникнення мікрогальванічних пар у електролітичному середовищі. Виявлено, що руйнування посилювалося за присутності у абразивному середовищі частинок розміром до 0,5 μm (пульпа), які його пришвидшували та збільшували втрати маси. Запропоновано марки чавунів для литих деталей із урахуванням умов експлуатації.

Ключові слова: високохромистий чавун, абразивне зношування, структура, розподіл хрому, ефект Ребіндера.

Скальський В. Р., Студент М. М., Мокрий О. М., Гвоздецький В. М., Романишин І. М., Семак П. М. Оцінювання стану приповерхневих шарів металу, підданих абразивно-струменевої обробці, з допомогою поверхневих акустичних хвиль.....12

Досліджено поверхневі шари металу низьковуглецевої сталі після абразивно-струменевої обробки. Визначено швидкість поверхневих хвиль Релея імпульсно-фазовим методом на частотах 3; 6 і 9 МГц зі застосуванням контактних п'єзоелектричних перетворювачів. Вивчено розподіл механічних напружень за глибиною з допомогою тензометричних вимірювань. Проаналізовано вплив різних чинників на зміну швидкості поверхневих акустичних хвиль. Запропоновано нову методику визначення товщини пластично деформованого шару металу після абразивно-струменевої обробки за частотною залежністю швидкості цих хвиль.

Ключові слова: абразивно-струменева обробка, швидкість поверхневих хвиль, залишкові механічні напруження, шорсткість.

<i>Рибачук В. Г., Учанін В. М., Кулинич Я. П. Особливості контролю анізотропних немагнетних матеріалів вихрострумовими давачами з коловими обмотками.....</i>	18
---	----

Розглянуто особливості взаємодії накладного вихрострумового давача з коловими концентричними обмотками на феритовому осерді під час його збудження гармонічним струмом з об'єктом контролю у вигляді немагнетної пластини з однією анізотропією питомої електропровідності (ПЕП). Отримано аналітичний вираз для внесеної напруги вимірювальної обмотки давача та проаналізовано його числовими розрахунками. Показано, що для такого типу давачів анізотропія ПЕП є додатковим джерелом похибок та встановлено закономірності її впливу на параметри внесеної напруги. Виявлено, що залежність амплітуди внесеної напруги від коефіцієнта анізотропії є суттєво меншою порівняно зі залежністю від зазору і проявляється в обмеженому діапазоні значень узагальненого параметра контролю. Вплив зазору можна усунути відповідним вибором режиму контролю. На противагу цьому дія анізотропії ПЕП на фазу внесеної напруги є співмірною із впливом зазору і проявляється в широкому діапазоні значень узагальненого параметра з дуже повільним загасанням з ростом останнього. Показано, що контролювати, використовуючи фазу внесеної напруги вихрострумового давача з коловими обмотками, можна тільки немагнетні матеріали з малою анізотропією, де коефіцієнт анізотропії ПЕП $\leq 0,04$.

Ключові слова: *неруйнівний контроль, вихрострумовий давач, колова обмотка, питома електропровідність, анізотропія, пластинка.*

<i>Греділь М. І. Втрата когезії між бетоном та сталеву арматурою за впливу корозивно-наводнювального середовища.....</i>	24
--	----

Використано електрохімічний підхід до моделювання експлуатаційної деградації залізобетону: анодну поляризацію – для пришвидшення корозії арматури в бетоні і катодну – для її наводнювання. В обох випадках за тривалої поляризації виявлено погіршення зчеплення арматури з бетоном.

Ключові слова: *залізобетон, корозія арматури, наводнювання, міцність зв'язку.*

<i>Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Студент О. З., Дзюбик Л. В., Хомич І. Б. Оцінювання технічного стану арматури залізобетонного балкового прогону мосту кінця ХХ сторіччя.....</i>	30
---	----

Проаналізовано структуру, механічні властивості та фрактографічні особливості руйнування арматурної сталі 25Г2С із залізобетонних балок, експлуатованих ~40 років на центральному прогоні автодорожнього мосту. Встановлено, що жорсткі силові умови експлуатації прогону, розташованого на повороті автошляху, підсилені вібраційними навантаженнями від руху залізничного транспорту під ним та шкідливим впливом довкілля, інтенсифікували руйнування бетону на поверхні балок і посилили корозію арматури, порушивши когезію між бетоном та арматурою. Виявлено зменшення експлуатованої сталі поза регламентованим для неї діапазоном та незначну втрату пластичності, проте її ударна в'язкість стала вдвічі нижча, ніж рекомендоване значення. Руйнування прогону майже посередині довжини балки пов'язали з виявленим дефектом зварювання торців одного із прутків арматури та грубоголковою структурою ділянок перегріву в зонах термічного впливу навколо точок технологічних прихоплювань прутків зварюванням з ініціюванням від них крихкого руйнування відколом у максимально навантаженому перерізі балки.

Ключові слова: *експлуатаційна деградація, арматурна сталь, структура, механічні властивості, особливості руйнування.*

<i>Балицький О. І., Квасницька Ю. Г., Іваськевич Л. М., Мяльниця Г. П., Квасницька К. Г.</i> Втомне руйнування лопаток газотурбінного двигуна з нового жароміцного нікелевого сплаву.....	39
--	----

Експериментально досліджено втомне руйнування лопаток турбіни другого ступеня енергетичного газотурбінного двигуна, виготовлених із розробленого жароміцного корозійностійкого сплаву, який додатково містить реній і тантал (4,07 і 2,62 mass% відповідно). Новий сплав має вищу втомну міцність, а його механічні характеристики (довготривала і короткочасна міцність та пластичність) і корозійна стійкість відповідають серійному сплаву CM88Y-VI. Втомне руйнування лопаток за бази випробувань $2 \cdot 10^7$ cycles фіксували на рівні 220...280 МПа, що на 15...20% вище, ніж у виробках зі серійного сплаву.

Ключові слова: жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав, втомна міцність, лопатка, газотурбінний двигун.

<i>Стечишина Н. М., Стечишин М. С., Олександренко В. П., Литвиненко О. А., Мартинюк А. В., Сухенко В. Ю., Цепенюк М. І.</i> Вплив енергетичних параметрів безводного азотування у тліючому розряді на фізико-хімічні властивості сталі 40X.....	47
---	----

Досліджено вплив режимних (температура, склад та тиск газової суміші) і енергетичних характеристик (напруга, густина струму, питома потужність розряду) за безводного азотування в тліючому розряді (БАТР) на структуру, фазовий склад азотованих шарів. Показано, що завдяки комбінації режимних та енергетичних параметрів БАТР можна досягнути фізико-хімічних показників азотованих шарів заданих умовами експлуатації.

Ключові слова: безводневе азотування в тліючому розряді, фазовий склад, напруга, густина струму, питома потужність розряду.

<i>Саврук М. П., Кравець В. С., Чорненький А. Б.</i> Вплив зсувного навантаження на форми оптимальних отворів у квазіортотропній пластині.....	54
--	----

Розроблено аналітико-числовий алгоритм визначення оптимальної форми гладкого отвору (з мінімальною концентрацією напружень) у квазіортотропній пластині за її двовісного розтягу та зсуву на нескінченності. Розв'язано обернені задачі теорії пружності для квазіортотропного тіла з невідомою межею. Використано ефективні розв'язки відповідних прямих задач, отриманих методом сингулярних інтегральних рівнянь. Розв'язування оберненої задачі з невідомою формою отвору зведено до мінімізації багатопараметричного функціонала середньоквадратичних відхилень розтягувальних напружень уздовж контуру отвору від усереднених їх значень. Знайдено форми оптимальних отворів у квазіортотропній пластині для різних двовісних розтягів та зсувів на нескінченності та рівня її ортотропії.

Ключові слова: квазіортотропна пластина, розтягальне та зсувне навантаження, оптимальні отвори, концентрації напружень, сингулярні інтегральні рівняння.

<i>Шопа Т. В., Тужеляк О. І.</i> Поперечні коливання ортотропної пластини з множиною отворів довільної конфігурації за врахування розподіленого навантаження на поверхні.....	63
---	----

Побудовано розв'язок задачі про усталені поперечні коливання ортотропної пластини довільної форми з множиною отворів довільної конфігурації за дії гармонічного розподіленого в часі навантаження на поверхні в межах теорії, яка враховує поперечні зсуви та інерційні компоненти на основі непрямого методу граничних елементів. Розглянуто мішані гармонічні в часі крайові умови на

контурах отворів та на зовнішній межі пластини. Для знаходження функцій Гріна використано послідовнісне подання дельта-функції Дірака та узагальнений метод рядів Фур'є. Наведено тестові числові результати для різних окремих випадків задачі.

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

Стацук М. Г., Ірза Є. М. Термонапруження функціонально-градієнтних тіл за відпалу.....71

Запропоновано методикку визначення термонапруженого стану в'язкопружних тіл з функціонально-градієнтних матеріалів за відпалу. Розроблено числовий алгоритм розв'язання відповідної задачі та реалізовано його для задач теплопровідності й термов'язкопружності. Оцінено термонапружений стан порожнистого циліндра за заданим режимом відпалу. Проілюстровано зміну його температурного і напруженого станів.

Ключові слова: *термонапружений стан, тіло обертання, функціонально-градієнтний матеріал, метод скінченних елементів, порожнистий циліндр.*

Труш В. С., Стоєв П. І., Федірко В. М., Восводін В. М., Тихоновський М. А., Панов В. А., Лук'яненко О. Г. Вплив водню на властивості окисненого та азотованого сплаву Zr-1% Nb.....79

Виявлено вплив насичення воднем на фізико-механічні характеристики окиснених та азотованих зразків-кілець, вирізаних з твельних трубок зі сплаву Zr-1% Nb. Встановлено, що зміцнений приповерхневий шар, сформований у контрольованих (кисне- та азотовмісному) газових середовищах, впливає на їх тривалу міцність у повітрі за витримки 100 h. Насичені воднем зразки, заздалегідь окиснені та азотовані, за витримки у повітрі при кімнатній температурі руйнуються за напружень 490...510 МПа. Цей діапазон у 10 разів вузчий, ніж для ненасичених воднем зразків-кілець, які руйнуються за напружень 400...600 МПа. Оцінено характер їх руйнування після різних обробок.

Ключові слова: *цирконієвий сплав, хіміко-термічна обробка, кисень-азотовмісне середовище, водень, приповерхневий шар, механічні властивості.*

Цирульник О. Т., Звірко О. І., Волошин В. А. Корозійно-втомна витривалість сталі 35 у водогінній воді за додаткового кавітаційного навантаження.....86

Встановлено основні чинники зниження корозійно-втомної витривалості вуглецевої сталі за кавітаційного, циклічного навантажень та їх сумісної дії. Попередня кавітація поверхні неоднозначно впливає на втомну витривалість сталі через переважальний вплив одного з двох чинників: деформаційного зміцнення та розвитку пошкоджень на кавітованій поверхні. Сумісна дія кавітаційного та циклічного навантажень зменшує умовну границю корозійної втоми сталі у 2,4 рази, а обмежену довговічність для близьких до границі втоми навантажень – на порядок. Електрохімічними дослідженнями показано, що отримані ефекти зумовлені посиленням впливу корозійного чинника.

Ключові слова: *вуглецева сталь, корозійна втома, кавітація, мікротвердість, електрохімічні властивості.*

- Герцик О. М., Хрущук Х. І., Ковбуз М. О., Носенко В. К., Корній С. А.,
Пандяк Н. Л. Роль дифузії продуктів окисдно-відновних реакцій
у процесах корозії алюмінієвих аморфних сплавів.....91

Методом циклічної вольтамперометрії досліджено корозійну тривкість аморфного та кристалічного сплавів $Al_{87}Ni_8Y_5$ у 0,5 М водному розчині NaCl з різною швидкістю сканування потенціалу поверхні електрода (10; 20; 50 та 100 mV/s). Визначено електрохімічні характеристики кристалічних Al, Ni та Y у розчині натрій хлориду. Розраховано коефіцієнти дифузії іонів Al^{3+} та Ni^{2+} . Встановлено, що сплави йонізуються у цьому розчині у три стадії, а швидкість дифузії Al^{3+} з приелектродного шару нижча, ніж йонів Ni^{2+} .

Ключові слова: аморфні сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики, коефіцієнт дифузії.

- Юзевич В. М., Лозован В. П. Вплив механічних напружень на ріст
корозійної тріщини у стінці трубопроводу.....96

Запропоновано методику оцінювання закономірностей кінетики росту зовнішньої корозійної тріщини у стінці підземного металевого трубопроводу (ПМТ) з урахуванням заданого внутрішнього тиску і катодного захисту. В її основі аналіз корозійного струму у вершині тріщини з урахуванням механічних напружень, омичного зниження потенціалу, перенапруження анодного розчинення металу. Запропоновано удосконалений метод обчислення ресурсу ПМТ з урахуванням впливу механічних напружень в околі вершини тріщини на корозійні струми. Виявлено, що механічні напруження призводять до зменшення ресурсу трубопроводу у 3,6 рази порівняно з режимом, коли внутрішній тиск близький до атмосферного.

Ключові слова: підземний трубопровід, тріщина, механічні напруження, корозійні струми, катодний захист, критерій якості, нейронні мережі.

- Копей Б. В., Кречковська Г. В., Нісонський В. П., Бакун Б. М.
Закономірності росту тріщин втомних гібридних насосних штангах.....104

Розглянуто особливості втомного руйнування гібридних насосних штанг для видобування нафти з вуглеволоконним осердям та склопластиковою оболонкою. Встановлено, що руйнування штанг за навантаження згином супроводжується інтенсивним утворенням повздовжніх тріщин у вигляді розшарувань у склопластиковій оболонці та зародження в ній до 5–6 тріщин. Визначено умови тріщиноутворення за однакового рівня циклічного навантаження в штангах запропонованої конструкції. Методом скінченних елементів проаналізовано напруження в з'єднанні елементів гібридної штанги за її навантаження згином та розтягом. На основі встановлених закономірностей росту втомних тріщин у гібридних насосних штангах запропоновано метод прогнозування їх залишкового ресурсу.

Ключові слова: гібридна насосна штанга, вуглепластикові частини штанги, склопластикові оболонки штанги, скінченно-елементний аналіз, циклічний згин і розтяг, ріст втомних тріщин, прогнозування ресурсу.

- Гембара О. В., Ченіль О. Я. Моделювання деформації елементів
конструкцій в умовах повзучості, корозійного розтріскування
і наводнення.....111

Числово проаналізовано напружено-деформований стан прямолінійної ділянки теплообмінних труб трьох типів парогенераторів, виготовлених із нержавної жароміцної хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T, за умов, що

моделюють експлуатаційні, з урахуванням наводнювання стінки та дії корозивного середовища. Спрогнозовано їх довговічність за різних режимів експлуатації.

Ключові слова: повзучість, довговічність, наводнювання, корозивне середовище.

Абдуліна Д. Р., Коптєва Ж. П., Коптєва Г. Є., Вортман М. Я. Мікробна деструкція полімерних матеріалів – пінополіетилену, етиленвінілацетату і гуми.....116

Вивчено біодеструкцію полімерних матеріалів (пінополіетилену, етиленвінілацетату і гуми) за впливу вуглеводеньокиснювальних (НОВ) та сульфатовідновлювальних (SRB) бактерій. Показано, що за дії НОВ бактерій упродовж 180 days коефіцієнти деструкції (K_D) для пінополіетилену – 7,6...12,5%, для етиленвінілацетату – 2,2...8,8%, для гуми – 1,5...1,8%. Під дією SRB бактерій після 90 days культивування виявлено втрату маси зразків для пінополіетилену 0,6...2,9%, етиленвінілацетату – 0,2...0,6%, гуми – 1,2...2,3%. Ензиматична активність бактерій на 30-ту добу культивування така: каталазна у межах 5...26,9 U/mg білка для НОВ та 0,31...4,1 U/mg білка для SRB; ліполітична – 5,9...37,1 для НОВ і 2,54...55,5 U/mg білка для SRB. Це вказує на прямий вплив бактерій на полімери. Згідно з результатами інфрачервоної спектроскопії, у зразках пінополіетилену під дією НОВ бактерій відбувались окиснювальні процеси, а в зразках етиленвінілацетату – деструктивні, а саме руйнування полімерного ланцюга за естерною групою, що корелює з коефіцієнтом біодеструкції матеріалів за 180 days експерименту. На зразках гуми змінюється структура скелета. За впливу SRB бактерій *Desulfovibrio* sp. 10, *D. desulfuricans* DSM642 у досліджених зразках відбуваються окиснювальні процеси та змінюється структура ланцюга.

Ключові слова: біодеструкція, інфрачервона спектроскопія, полімерні матеріали, вуглеводеньокиснювальні, сульфатовідновлювальні бактерії, ензиматична активність.

Кахерський С. І., Доброжан О. А., Пшеничний Р. М., Воробйов С. І., Гаврилюк Є. О., Команіцький В., Плотніков С. В., Опанасюк А. С. Вплив низькотемпературних відпалів на структуру і хімічний склад плівок Cu_2ZnSnS_4 , нанесених на гнучкі поліімідні підкладки.....125

Розпиленням чорнил з наночастинками нанесено плівки Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) на гнучкі поліімідні підкладки з подальшим низькотемпературним відпалом при 200°C упродовж 10...120 min в атмосфері аргону. Встановлено методами рентгенівської дифрактометрії і Раманівської спектроскопії, що наночастинки і плівки містять фазу кестериту з невеликою кількістю включень фаз Cu_xS і $Cu_xSn_yS_z$. Збільшення тривалості росту наночастинок і відпалу плівок спричинило поліпшення кристалічної якості їх основної фази – кестериту. Показано, що плівки CZTS наноструктуровані і не розтріскувалися навіть після 50 згинів на площі $10 \times 10 \mu m$. Методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії хімічного складу зразків встановлено, що наночастинки і плівки CZTS містять надлишок міді і сірки, але мають дефіцит цинку. У результаті дослідження оптичних характеристик шарів з'ясовано, що ширина забороненої зони синтезованих матеріалів становить $E_g = 1,4...1,5 \pm 0,2$ eV, що добре збігається з літературними даними. Отримані плівки CZTS можна використати як поглинальні шари сонячних елементів третього покоління.

Ключові слова: Cu_2ZnSnS_4 , поліімідні підкладки, морфологія, структура, хімічний склад, оптичні властивості.

Ghazvinloo H. R., Honarbakhsh-Raouf A. Вплив параметрів металозварювання на ширину зони термічного впливу у з'єднаннях зі сталі HQ130.....134

Останнім часом електродуговому зварюванню металів у газі (GMAW) приділяють особливу увагу через його ефективне застосування у різних галузях промисловості. Зона термічного впливу (HAZ) відзначається найнижчою в'язкістю у зварному з'єднанні і тому викликає особливу зацікавленість багатьох дослідників. Розглянуто вплив параметрів GMAW, зокрема, кута робочого електрода (ϕ), діаметра металевого наповнювача (d) і типу захисного газу (SGT) на середню ширину HAZ (АНВ) в сталі HQ130. Для цього використано різні зварювальні зразки з кутами 65° , 75° та 85° ; діаметрами 0,8 mm, 1 mm та 1,2 mm, а також аргон, гелій і діоксид вуглецю як SGT. Визначено та проаналізовано ширину HAZ. Показано, що відмінності у параметрах роботизованого GMAW суттєво впливають на АНВ.

Ключові слова: *електродугове зварювання металів у газі, робочі параметри, сталь HQ130, зона термічного впливу, середня ширина зони термічного впливу.*

Опачко І. І., Жигуц Ю. Ю., Опачко М. В. Особливості наплення плівок компонентами плазми, створеної наносекундними лазерними імпульсами.....139

Розроблено спосіб формування періодичних структур під час опромінення цугом лазерних імпульсів, який забезпечує якісні гетерогенні і субґраткові структури за дотримання встановлених умов.

Ключові слова: *цуги, лазерні імпульси, мішень, фаза, наплення, періодичні структури.*

Масюк А. С., Левицький В. Є., Катрук Д. С., Гуменецький Т. В., Білий Л. М. Фізико-механічні властивості полівінілхлоридполістирольних пластикатів.....145

Досліджено вплив природи полістирольних модифікаторів та діестерфталатних пластифікаторів на поверхневу твердість, теплотривкість за Віка, ступінь вивільнення пластифікатора, пружно-пластичні властивості полівінілхлоридних пластикатів та композитів на їхній основі. Встановлено вплив полімерсилікатних наповнювачів та полістиролмагнетитових матеріалів на фізико-механічні та теплофізичні характеристики модифікованих полівінілхлоридних пластикатів та визначено умови їх регулювання.

Ключові слова: *полівінілхлорид, модифікування, полістирол, полімерсилікатний наповнювач, пластифікація, акрилонітрилбутадієнстирольний пластик, дібутилфталат.*

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 57, № 4, 2021

July – August

CONTENTS

Netrebko V. V., Volchok I. P., Popov S. M., and Akimov I. V. Peculiarities
of fracture of high-chromium cast irons under abrasive wear.....5

It is shown that the fracture of cast irons with high chromium content in dry and wet abrasive media depends on their chemical composition, structure, distribution of chromium in the metal base, the properties of the abrasive and is significantly determined by the Rebinder's effect, as well as the appearance of microgalvanic couples. It is established that annealing increases the chemical heterogeneity of the distribution of chromium in the metal base. The presence of zones near carbides with low chromium content of up to 8.5% (negative potential) and the central zones of grains with chromium concentration of more than 12% (positive potential) leads to the appearance of microgalvanic couples in an electrolytic medium. It is found that the fracture has enhanced in the presence of particles up to 0.5 μm (pulp) in the abrasive medium, which accelerated the fracture and increased weight losses. Grades of cast irons for foundry parts with account of the operating conditions are proposed.

Keywords: *high-chromium cast irons, abrasive wearing, structure, chromium distribution, the Rebinder's effect.*

*Skalskyi V. R., Student M. M., Mokryi O. M., Hvozdettskyi V. M., Romanyshyn I. M.,
and Semak P. M.* Assessing the state of the near-surface layers of metal
subjected to shot peening using surface acoustic waves.....12

The surface layers of low-carbon steel metal after shot peening was studied. The velocity of surface Rayleigh waves of different frequencies was measured by the pulse-phase method using contact piezoelectric transducers. Determination of the surface acoustic waves velocity was performed at frequencies of 3; 6 and 9 MHz. The distribution of mechanical stresses by depth was studied by means of tensometric researches by etching the surface layers of metal. A study of the roughness of the treated surface was carry out. The influence of various factors on the change in the speed of surface acoustic waves was considered. An approach that allows us to estimate the thickness of the plastically deformed layer of metal after abrasive blasting, based on determining the frequency dependence of the surface acoustic waves velocity is proposed.

Keywords: *shot peening, velocity of surface waves, residual mechanical stresses, roughness.*

<i>Rybachuk V. H., Uchanin V. M., and Kulynych Ya. P. Peculiarities of anisotropic nonmagnetic materials testing by eddy-current probes with circular windings.....</i>	18
---	----

Peculiarities of the interaction of the attachable eddy-current probe (ECP) with circular concentric windings on the ferrite core with the plate with uniaxial anisotropy of specific electrical conductivity (SEC) are investigated. The ECP drive winding is excited by the current of harmonic shape. An analytical expression for added voltage of the ECP measuring winding is obtained and analyzed by numerical calculations. It is shown that for such ECP type the SEC anisotropy is an additional stray factor, and the regularities of its influence on the added voltage parameters have been established. It is found that the degree of dependence of the added voltage amplitude on the anisotropy coefficient is significantly less compared to the dependence on the lift-off and is evident in a limited range of values of the generalized parameter of eddy current testing. It can be eliminated by choosing a suitable testing mode. On the contrary, the influence of the SEC anisotropy on the added voltage phase is comparable to the effect of the lift-off and exists in a wide range of the generalized parameter values. It slowly attenuates as the value of the generalized parameter increases. It is shown that testing by using the added voltage phase of the ECP with circular windings can be used only for materials with a low level of anisotropy, which does not exceed ≤ 0.04 .

Keywords: *non-destructive testing, eddy current probe, circular winding, specific electrical conductivity, anisotropy, plate.*

<i>Hredil M. I. Loss of cohesion between concrete and steel reinforcement under the influence of corrosion-hydrogenated environment</i>	24
---	----

The electrochemical approach to simulation of the operational degradation of reinforced concrete is used: anodic polarization – to accelerate the reinforcement of corrosion in concrete and cathodic – for its hydrogenation. In both cases under durable polarization deterioration of cohesion between reinforcement and concrete is found.

Keywords: *reinforced concrete, rebar corrosion, hydrogenation, bond strength.*

<i>Dziubyk A. R., Voitovych A. A., Student O. Z., Dziubyk L. V., and Khomych I. B. Assessment of the technical condition of the reinforcement of the reinforced concrete beam span of the bridge of the end of the XX century.....</i>	30
--	----

The structure, mechanical properties and fractographic features of 25Г2С steel for reinforced concrete beams after ~40 years of operation on the central span of a highway bridge are analyzed. It is shown that severe force conditions of operation of this bridge span located at a turn of a highway, intensified by vibration loads due to railway transport movement under it and harmful effects of the environment, facilitate the fracture of concrete on the surface of beams and intensify rebar corrosion breaking the cohesion between concrete matrix and reinforcement. The decrease in the exploited steel outside of the regulated range and a slight loss of plasticity are found. Its impact toughness is twice lower than the recommended value. The fracture of the bridge span beam almost in the middle of its length is associated with a detected defect in welding of the ends of one of the reinforcing bars and a coarse-acicular microstructure inside overheating areas in the heat-affected zones around technological spot of tack welding of the reinforcement with initiation of brittle cleavage fracture in the maximum loaded section of the beam.

Keywords: *operational degradation, reinforcing steel, microstructure, mechanical properties, fractographic features of fracture.*

<i>Balitskii O. I., Kvasnytska Yu. H., Ivaskevych L. M., Mialnitsa G. P., and Kvasnytska K. H. Fatigue fracture of gas turbine engine blades made of a new heat-resistant nickel alloy.....</i>	39
---	----

Experimental studies of fatigue fracture of turbine blades of the second stage of a power gas turbine engine, made of the developed heat-resistant corrosion-resistant alloy, have been carried out. The new alloy, which additionally contains rhenium and tantalum (4.07 and 2.62 mass%, respectively), has high fatigue strength while maintaining ductility and corrosion resistance. The fracture of the investigated blades during endurance tests at a base load of $2 \cdot 10^7$ cycles occurred at the level of 220...280 MPa, which is 15...20% higher than in products made of CM88Y-VI serial alloy.

Keywords: *heat-resistant corrosion-resistant nickel alloy, fatigue strength, blade, gas turbine engine.*

<i>Stechyshyna N. M., Stechyshyn M. S., Oleksandrenko V. P., Lytvynenko A. A., Martynyuk A. V., Sukhenko V. Yu., and Tsepeniuk M. I. The influence of energy parameters of hydrogen-free nitriding in the glow discharge on physicochemical properties of 40X steel.....</i>	47
--	----

The influence of the regime (temperature, composition of a gas mixture and its pressure) and energy characteristics (voltage, current density, specific discharge power) under non-hydrogenated nitriding in a glow discharge (NHGD) on the structure, phase composition of the nitrided layers is investigated. It is shown that because of the combination of regime and energy parameters of the NHGD it is possible to reach the physical and chemical indicators for the nitrided layers assigned by the exploitation conditions.

Keywords: *non-hydrogenated nitriding in a glow discharge, phase composition, voltage, current density, specific discharge power.*

<i>Savruk M. P., Kravets V. S., and Chornenkyi A. B. The influence of shear loading on the shapes of optimal holes in a quasi-orthotropic plate.....</i>	54
--	----

An analytical-numerical algorithm for determining the optimal shape of a smooth hole (with a minimum stress concentration) in a quasi-orthotropic plate under biaxial tension and shear at infinity has been developed. Inverse problems of the theory of elasticity for a quasi-orthotropic body with an unknown boundary are solved. Effective solutions of the corresponding direct problems obtained by the method of singular integral equations are used. Solving the inverse problem with an unknown hole shape is reduced to minimization of multiparametric functional of the standard deviations of the tensile stresses along the hole contour from their averaged values. The shapes of optimal holes in a quasi-orthotropic plate for different biaxial tension and shear loading at infinity and the level of its orthotropy are found.

Keywords: *quasi-orthotropic plate, tension and shear loading, optimal holes, stress concentration, singular integral equations.*

<i>Shopa T. V. and Tuzheliak O. I. Transversal oscillations of an orthotropic plate with a set of holes of arbitrary shape with account of distributed loading on the surface.....</i>	63
--	----

The solution of the problem on the steady state flexural vibrations of an orthotropic plate of arbitrary shape with a set of holes of arbitrary configuration under the effect of harmonic distributed in time load on the surface is constructed within the theory that takes into account transverse shear displacements and all inertial components, based on the indirect boundary elements method. Mixed harmonic in time boundary conditions on the contours of the holes and on the outer boundary of the plate are considered. To find the Green's functions the sequential representation of the Dirac

delta-function and the generalized Fourier series method are used. Test numerical results for different partial cases of the problem are presented.

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

Stashchuk M. H. and Irza Ye. M. Thermal stresses of functionally gradient bodies under annealing.....71

A method for calculating the thermal stress state of viscoelastic bodies made of functional-gradient materials during annealing is proposed. A numerical algorithm for solving the corresponding problem has been developed and implemented for the problems of thermal conductivity and thermal viscoelasticity. The thermal stress state of the hollow cylinder is calculated according to the given annealing mode. The change in temperature and stress state of the hollow cylinder during annealing is graphically illustrated.

Keywords: *thermal stress state, body of revolution, functional gradient material, finite element method, hollow cylinder, optimization modes.*

Trush V. S., Stoev P. I., Fedirko V. N., Voyevodin V. N., Tykhonovskiy M. A., Panov V. A., and Lukyanenko A. G. The influence of hydrogen on the properties of oxidized and nitrided Zr-1% Nb alloy.....79

The effect of hydrogen saturation on the physicochemical characteristics of oxidized and nitrided specimens-rings cut from fuel tubes of the Zr-1% Nb alloy has been studied. It is shown that the hardened near-surface layer, which is formed in controlled (oxygen- and nitrogen-containing) gaseous media, affects the long-term strength of specimens-rings of Zr-1% Nb alloy during holding in air for 100 h. The rupture of specimens-rings after oxidizing and nitriding, when held for 100 h in air at room temperature, occurs in the range of stress 490...510 MPa, which is 10 times narrower than for non-hydrogenated specimens-ring, which are fractured in the stress range of 400...600 MPa. The fracture character of specimens-rings manufactured of Zr-1% Nb alloy after thermochemical treatments is shown.

Keywords: *zirconium alloy, hydrogen, chemical-thermal treatment, oxygen-nitrogen-containing media, near-surface layer, mechanical properties.*

Tsyurulnyk O. T., Zvirko O. I., and Voloshyn V. A. Corrosion-fatigue endurance of steel 35 in tap water under additional cavitation loading.....86

The main factors reducing corrosion fatigue durability of carbon steel under cavitation, cyclic loading and their combined action have been established. Preliminary cavitation of the surface ambiguously affects the fatigue durability of steel due to the predominant influence of one of two factors: deformation hardening and the development of damages on the cavitated surface. The combined effect of cavitation and cyclic loading reduces the corrosion fatigue limit of the steel in 2.4 times, and the limited durability for loads close to the fatigue limit – by an order of magnitude. Electrochemical studies have shown that the obtained effects are caused by intensification of corrosion factor.

Keywords: *carbon steel, corrosion fatigue, cavitation, microhardness, electrochemical properties.*

Hertsyk O. M., Khrushchych Kh. I., Kovbuz M. O., Nosenko V. K., Kornii S. A., and Pandiak N. L. The role of diffusion of redox reaction products in the processes of aluminum amorphous alloys corrosion.....91

Corrosion resistance of amorphous and crystalline $Al_{87}Ni_8Y_5$ alloys in 0.5 M aqueous NaCl solution with different scanning speed of the electrode surface potential (10; 20; 50 and 100 mV/s) was investigated by cyclic voltammetry. The electrochemical pro-

properties of crystalline Al, Ni, and Y in sodium chloride solution were determined. The diffusion coefficients of Al^{3+} and Ni^{2+} ions were calculated. It was found that the ionization of the alloys in 0.5 M aqueous NaCl solution occurred in three stages, and the diffusion rate of Al^{3+} from the electrode layer was lower than the diffusion of Ni^{2+} ions.

Keywords: *amorphous metallic alloy, corrosion resistance, electrochemical characteristics, diffusion coefficient.*

Yuzevych V. M. and Lozovan V. P. The influence of mechanical stresses on corrosion crack growth in a pipeline wall.....96

The method of estimation of the peculiarities of the kinetics of an external corrosion crack growth in the wall of an underground metal pipeline (UMP) taking into account the specified internal pressure and cathodic protection is proposed. The corresponding method is based on the analysis of the corrosion current at the crack tip, taking into account mechanical stresses, ohmic potential drop, overvoltage of anodic dissolution of metal. An improved method for calculating the service life of UMP taking into account the influence of mechanical stresses in the vicinity of the crack tip on corrosion currents is proposed. It is found that mechanical stresses lead to a 3.6-fold decrease in the pipeline life compared to the regime when the internal pressure is close to the atmospheric.

Keywords: *underground pipeline, crack, mechanical stresses, corrosion currents, cathodic protection, quality criterion, neural networks.*

Kopei B. V., Krechkovska H. V., Nisonyski V. P., and Bakun B. M. Regularities of crack propagation in hybrid pumping rods.....104

The features of fatigue fracture of hybrid sucker rods with a carbon fiber rod and a fiberglass shell for oil production are considered. It has been established that the fracture of the rods under bending loading is accompanied by the intensive formation of longitudinal cracks in the form of delamination in the metal part of the rods and the initiation of up to 5–6 cracks in the fiberglass shell. The conditions for cracking at the same cyclic load in rods of different designs are determined. The finite element method is used to analyze the stress in the connection of the elements of the hybrid rod when it is loaded by bending and tension. Based on the established patterns of fatigue crack growth in hybrid sucker rods, a method for predicting their residual life is proposed.

Keywords: *hybrid sucker rod, carbon fiber part of rod, fiberglass shell, finite element analysis, cyclic bending and tensile loading, fatigue crack growth, life time prediction.*

Hembara O. V. and Chepil O. Ya. Modelling of the structural elements deformation under conditions of creep, stress corrosion cracking and hydrogenation.....111

A numerical analysis of the stress-strain state of a rectilinear section of heat exchange tubes of three types of steam generators made of stainless chromium-nickel austenitic steel 08X18H10T under conditions simulating operating conditions, taking into account the saturation of the wall with hydrogen and the action of a corrosive medium, was carried out. On this basis their durability was predicted under various operating conditions and geometric dimensions.

Keywords: *creep, durability, hydrogenation, corrosive environment.*

Abdulina D. R., Kopteva Zh. P., Kopteva A. E., and Vortman M. Ya. Microbial destruction of polymer materials – foamed polyethylene, ethylene vinylacetate and rubber.....116

The biodegradation of polymer materials (foamed polyethylene (FPE), ethylvinylacetate (EVA) and rubber) under the influence of hydrocarbon-oxidizing (HOB) and sulfate-reducing bacteria (SRB) is studied. It is shown that the coefficients of materials fracture during the exposure period for 180 days under the influence of HOB for FPE is 7.6...12.5%, for EVA – 2.2...8.8%, for rubber – 1.5...1.8%. In variants with SRB, no changes in the mass of samples during this period are observed. After 90 days of SRB cultivation a mass loss of samples is detected, the coefficients of destructions for foamed PPE are 0.6...2.9%, EVA – 0.21...0.6%, rubber – 1.2...2.3%. For 30 days of exposure the enzymatic activity of bacteria is the following: the catalase activity is in the range of 5...26.9 U/mg of protein for HOB and 0.31...4.1 U/mg of protein for SRB; the lipolytic activity for HOB and SRB are 5.9...37.1 and 2.54...55.5 U/mg of protein, respectively. This indicates a direct effect of bacteria on the studied polymers. According to IR spectroscopy data, oxidative processes occur in foamed FPE samples under the action of hydrocarbon-oxidizing bacteria. In EVA samples the destructive processes occur, i.e. the biodestruction of the polymer chain by the ester group, which correlates with the coefficient of biodegradation of materials for 180 days of the experiment. For rubber samples, the carbon chain structure changes are detected. Under the effect of sulfate-reducing bacteria *Desulfovibrio* sp. 10, *D. desulfuricans* DSM642 oxidative processes and changes in the chain structure occur in the studied samples.

Keywords: *biodestruction, IR spectroscopy, polymer materials, hydrocarbon-oxidizing, sulfate-reducing bacteria, enzymatic activity.*

Kakherskyi S. I., Dobrozhan O. A., Pshenychnyi R. M., Vorobiov S. I., Havryliuk Ye. O., Komanicky V., Plotnikov S. V., and Opanasyuk A. S.
The effect of low-temperature annealing on structure and chemical composition of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films deposited on flexible polyimide substrates..... 125

The $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) films were deposited onto flexible polyimide substrates by spraying inks containing nanoparticles followed by low-temperature annealing at 200°C for 10...120 min in an argon atmosphere. Studies by X-ray diffractometry and Raman spectroscopy showed that nanoparticles and films contained a kesterite phase with a small amount of inclusions of the Cu_xS and $\text{Cu}_x\text{Sn}_y\text{S}_z$ phases. Increasing the growth time of nanoparticles and annealing of films led to an improvement in the crystalline quality of their main phase – kesterite. TEM studies showed that the obtained CZTS films were nanostructured and did not crack even after 50 bends in an area of $10 \times 10 \mu\text{m}$. EDAX measurements of the chemical composition of the samples revealed that the nanoparticles and CZTS films contained an excess copper and sulfur but were deficient in zinc. As a result of the study of the optical characteristics of the layers, it was found that the value of the band gap of the synthesized materials was $E_g = 1.4...1.5 \pm 0.2 \text{ eV}$, which coincided well with the literature data. The obtained CZTS films are promising for application as absorbing layers of the third generation solar cells.

Keywords: $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, *polyimide substrates, morphology, structure, chemical composition, optical properties.*

Ghazvinloo H. R. and Honarbakhsh-Raouf A. Effect of the robotic GMAW parameters on HAZ width in HQ130 steel joints..... 134

Gas metal arc welding (GMAW) has received much attention over the last several years and has many wide and beneficial applications in different industries. Heat affected zone (HAZ) is the region between the base and weld metal where has the lowest toughness in a welding joint and hence has always been a matter of interest for many researchers. This study is focused on GMAW parameters effects including, electrode to work angle (φ), filler metal diameter (d) and shielding gas type (SGT) on average

HAZ width (AHW) in HQ130 steel. For this aim, different welding samples were produced by employing electrode to work angles 65°, 75° and 85°; filler metal diameters 0.8 mm, 1 mm, and 1.2 mm, and shielding gases of argon, helium and carbon dioxide. Having finished the welding process, the average HAZ width was experimentally measured and discussed in all samples. The results of this study indicated that variations in robotic GMAW parameters have significant effects on average HAZ width.

Keywords: *gas metal arc welding, welding parameters, HQ130 steel, heat affected zone, average heat affected zone width.*

Opachko I. I., Zhiguts Yu. Yu., and Opachko M. V. Specific features of spraying of layered structures by plasma components formed by nanosecond laser pulses.....139

The method of the formation of periodic structures under irradiation by a train of laser pulses, which ensures the production of qualitative heterogeneous and sublattice structures provided that the conditions established in the work are observed, has been developed

Keywords: *pulse group, laser pulses, target, phase, sputtering, periodic structures.*

Masiuk A. S., Levytskyi V. Ye., Katruk D. S., Humenetskyi T. V., and Bilyi L. M. Physicochemical properties of polyvinyl chloride polystyrene plastics.....145

The influence of the nature of polystyrene modifiers and diesterphthalate plasticizers on the surface hardness, Vicat softening point, the degree of release of the plasticizer, elastic-plastic properties of polyvinyl chloride plastics and composites based on them has been investigated. The influence of polymer-silicate fillers and polystyrene-magnetite materials on the physicochemical and thermophysical properties of modified polyvinyl chloride plastics is established and the conditions of directional regulation of technological and operational properties of such materials are determined.

Keywords: *polyvinylchloride, modification, polystyrene, polymer-silicate filler, plasticization, acrylonitrile butadiene styrene plastic, dibutylphthalate.*