

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

З. Т. НАЗАРЧУК (головний редактор), Г. М. НИКИФОРЧИН (заст. головного редактора), Р. Р. КОКОТ (відповідальний секретар), О. Є. АНДРЕЙКІВ, Р. Є. ГЛАДИШЕВСЬКИЙ, І. М. ДМИТРАХ, З. А. ДУРЯГІНА, І. Ю. ЗАВАЛІЙ, О. І. ЗВІРКО, І. М. ЗІНЬ, Р. М. КУШНІР, Д. Б. КУРИЛЯК, Л. М. ЛОБАНОВ, П. О. МАРУЩАК, О. П. ОСТАШ, В. В. ПАНАСЮК, І. М. ПОГРЕЛЮК, М. С. ПОЛУТРЕНКО, В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, Т. О. ПРИХНА, М. П. САВРУК, М. Д. САХНЕНКО, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. З. СТУДЕНТ, М. С. ХОМА, О. Е. ЧИГИРИНЕЦЬ, В. М. ФЕДІРКО, С. О. ФІРСТОВ, О. Т. ЦИРУЛЬНИК

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), Г. БОЛЗОН (Італія), М. ЕЛЬБОВДЖАІНІ (США–Канада), Е. ГДУТУС (Греція), В. КЕЙН (Індія), Ж. КОРЕЙЯ (Португалія), Т. ЛАГОДА (Польща), Г. ЛЕСЮК (Польща), П. МОРЕЙРА (Португалія), А. ПІХ (Німеччина), Г. ПЛЮВІНАЖ (Франція), Я. ПОКЛЮДА (Чехія), Г. ШМІТТ (Німеччина), А. СЕДМАК (Сербія), Х. ТОРІБІО (Іспанія), Л. ТОТ (Угорщина), П. ТРАМПУШ (Угорщина), В. ЯРТИСЬ (Норвегія)

EDITORIAL BOARD

Z. T. NAZARCHUK (Editor-in-Chief), H. M. NYKYFORCHYN (Deputy Editor-in-Chief), R. R. KOKOT (Secretary), O. Ye. ANDREIKIV, R. Ye. GLADYSHEVSKII, I. M. DMYTRAKH, Z. A. DURIAGINA, I. Yu. ZAVALIY, O. I. ZVIRKO, I. M. ZIN', R. M. KUSHNIR, D. B. KURYLIAK, L. M. LOBANOV, P. O. MARUSCHAK, O. P. OSTASH, V. V. PANASYUK, I. M. POHRELYUK, M. S. POLUTRENKO, V. I. POKHMURSKII, T. O. PRIKHNA, M. P. SAVRUK, M. D. SAKHNENKO, V. R. SKALSKIY, O. Z. STUDENT, M. S. KHOMA, O. E. CHYHYRYNETS', V. M. FEDIRKO, S. O. FIRSTOV, O. T. TSYRUL'NYK

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

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

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

Підписано до друку 09.09.2022. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12. Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 120922 від 12.09.2022. Ціна договірна. Реєстраційне свідоцтво серія ДК № 5068 від 22.03.2016

Друкарня ТзОВ "Простір-М", 79000, Львів, вул. Чайковського, 8

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,
"ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ", 2022

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 58, № 4, 2022

липень – серпень

ЗМІСТ

Саврук М. П., Онишко Л. Й., Кваснюк О. І. Розподіл напружень біля гострих та закруглених кутових вирізів в анізотропному тілі за антиплоскої деформації.....5

Методом сингулярних інтегральних рівнянь розв'язано антиплоску задачу теорії пружності для пружного анізотропного тіла з гострим та закругленим кутовими вирізами. Отримано асимптотичну залежність між коефіцієнтами інтенсивності та концентрації напружень у гострій та закругленій вершинах довільно орієнтованого кутового вирізу. На цій основі розроблено єдиний підхід до визначення напружень біля гострих та закруглених кутових вирізів в ортотропних та анізотропних тілах за антиплоскої деформації.

Ключові слова: механіка руйнування, анізотропія, коефіцієнт інтенсивності напружень, кутовий виріз, антиплоска деформація, метод сингулярних інтегральних рівнянь.

Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Звягін Н. С., Бобрик К. Р. Оцінювання залишкового ресурсу ректифікаційної колони виробництва етилену за дії вітрового навантаження та атмосферної корозії.....13

За сформульованим раніше авторами енергетичним підходом побудовано математичну модель, яка покладена в основу розрахункового методу прогнозування залишкового ресурсу ректифікаційної колони для виробництва етилену, підданої дії вітрового навантаження і атмосферної корозії. Вітрове навантаження маневрове: постійний тиск на колону з частими поривами. Вважали, що в кільцевому зварному шві, яким колону прикріплена до основи, є зовнішня поверхнева корозійно-механічна тріщина, в яку проникає корозивне середовище, яке разом з маневровим вітровим навантаженням інтенсифікує її поширення до розмірів, що спричиняють руйнування колони. За енергетичним підходом задачу зведено до особливих диференціальних рівнянь зі спеціальними дельта-функціями, які розв'язано наближено для великої кількості поривів вітру, і досліджено залежність залишкового ресурсу колони зі сталі 09Г2С від кількості поривів.

Ключові слова: ректифікаційна колону, залишковий ресурс, енергетичний підхід, коефіцієнт інтенсивності напружень, розкриття тріщини, маневровий режим навантаження.

Стащук М. Г., Дробенко Б. Д., Ірза Є. М. Методика розрахунку оптимальних режимів відпалу функціонально-градієнтних тіл.....20

Сформульовано задачу розрахунку оптимальних режимів відпалу функціонально-градієнтних тіл. Розроблено оригінальну методику числового її розв'язування на основі методу поетапної параметричної оптимізації. Для розв'язування прямих задач під час ітераційної побудови оптимальних режимів нагрівання-охолодження використано метод скінченних елементів. Пошук оптимального значення функції керування не потребує нульового наближення і на кожному часовому кроці можна мінімізувати функцію однієї змінної.

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

Іваницький Я. Л., Гвоздюк М. М., Клименко Д. В., Гриненко М. В., Максименко О. П. Моделювання впливу наводнювання за підвищених температур на міцність сталі труб парогенератора АЕС.....26

Проаналізовано експлуатаційні умови для моделювання та оцінювання інваріантних характеристик міцності парогенераторної сталі 22К за підвищеної температури та дії газоподібного водню. Показано важливість використання енергетичного критерію, який враховує зміну істинних напружень і деформацій за дії внутрішнього тиску при підвищених температурах водневого середовища. Побудовано діаграми граничного стану сталі 22К за сумісної дії механічного навантаження та підвищених температур. Запропоновано підхід для визначення ступеня пошкодження трубопроводу за експлуатаційних умов на основі співвідношення енергії пружно-пластичного деформування та питомої енергії руйнування сталі 22К.

Ключові слова: *парогенераторна сталь 22К, енергетичний підхід, водневе середовище, підвищена температура, залишкова міцність.*

Звірко О. І., Ліпець С., Венгринюк О. І., Дзіоба І. Оцінювання напружено-деформованого стану у вершині тріщини в обсадних трубах на основі числового моделювання.....32

Моделюванням напружено-деформованого стану у вершині тріщини та числовими розрахунками отримано розподіл локальних напружень та деформацій в околі вершини тріщини у зразках зі сталей 50Г та 32Г2 обсадних труб з різною мікроструктурою. Сталі вирізнялися нетиповою механічною поведінкою: слабший опір крихкому руйнуванню властивий менш міцній сталі 50Г з грубозернистою феритно-перлітною структурою проти сталі 32Г2 з дрібнозернистою бейнітною. Для моделювання зразка з тріщиною використано метод скінченних елементів та застосовано істинні криві розтягу сталей для обчислень. Результатами підтверджено, що грубозерниста сталь схильніша до росту тріщини за крихким механізмом.

Ключові слова: *обсадна труба, мікроструктура сталей, моделювання опору росту тріщини, механізм руйнування, в'язкість руйнування.*

Козак Л. Ю. Особливості пластичного деформування ниткоподібних кристалів.....37

Описано пластичну деформацію монокристалів на атомному рівні за раніше запропонованою дискретною моделлю. Монокристали розглядали як двофазну структуру, яка складається з поверхневих шарів і внутрішніх областей ідеальної кристалічної ґратки. Проаналізовано вплив поверхні на міцність монокристалів досконалої будови. Оскільки частка поверхневого шару в загальному об'ємі масивних монокристалів низька, то цей вплив незначний. Збільшення кількості де-

фектів після пластичної деформації суттєво підвищує міцність кристалів. З іншого боку, через малі діаметри тонких ниткоподібних кристалів поверхня має суттєвий вплив. Зроблено висновок, що механізми пластичної деформації ідентичні як для ниткоподібних, так і масивних кристалів, незважаючи на відмінності їхніх діаграм розтягу.

Ключові слова: масивні монокристали, ниткоподібні кристали, пластична деформація, двофазна структура, напруження, опір зсуву.

Семерак М. М., Римар Т. І., Глова Т. Я. Математичне моделювання термонапруженого стану у вузловому з'єднанні хвостовика змійовика з колектором підігрівника високого тиску ПВ-2500-97.....45

Досліджено термонапружений стан вузла приєднання хвостовика спірального змійовикового елемента $\varnothing 32 \times 4$ mm до колектора $\varnothing 325 \times 32$ mm ПВТ-6 та ПВТ-7 за експлуатаційних режимів енергоблока з реактором ВВЕР-1000. Виконано його математичне моделювання, де враховано, що температурні переміщення і напруження залежать від теплофізичних та механічних характеристик конструкційних матеріалів у експлуатаційних умовах роботи обладнання.

Ключові слова: підігрівник високого тиску, хвостовик змійовика, термонапружений стан елемента теплообмінника.

Ковальчук І. В., Юркевич Р. М., Посувайло В. М. Кристалічна структура оксидокерамічних покриттів, отриманих на сплавах з високим вмістом силіцію.....50

Визначено кристалічну структуру оксидокерамічних покриттів, отриманих на сплавах АК9М2 та АК12. Вже після 5 min обробки сплаву АК9М2 методом плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) в стандартному електроліті (КОН (3 g/l), Na_2SiO_3 (2 g/l)) алюміній та силіцій утворюють сполуку $\text{Al}_{3,21}\text{Si}_{0,47}$. Проаналізовано термічну стабільність сполук складу $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. Запропоновано схему перетворення проміжних оксидів у муліт. Одержані результати показали, що зі збільшенням вмісту силіцію в сплавах зростає кількість силіманіту у відповідних покриттях. Збільшення тривалості ПЕО обробки силумінів до 2 h сприяє частковому перетворенню силіманіту в муліт. Максимальний вміст муліту у покриттях ~ 4 mass%.

Ключові слова: силумін, плазмоелектролітне оксидування, оксиди алюмінію, оксидокерамічні покриття, рентгеноструктурний аналіз, кристалічна структура, силіманіт, муліт.

Студент М. М., Погрелюк І. М., Гвоздецький В. М., Задорожна Х. Р., Веселівська Г. Г. Трибологічні характеристики ПЕО шарів, синтезованих на плазмових Al-Ti-Si покриттях.....57

Досліджено трибологічні характеристики оксидних шарів, синтезованих плазмоелектролітним оксидуванням (ПЕО) у слаболужному електроліті в імпульсному катодно-анодному режимі на плазмових Al-Ti-Si покриттях, напилених на підкладку із алюмінієвого сплаву Д16. Встановлено, що у парі тертя ПЕО шар-сталева кулька найвищу зносотривкість забезпечує вибірково перенос, зумовлений міддю у структурі шару, а у парі тертя ПЕО шар-керамічна кулька – висококоміцна фаза Al_2TiO_5 .

Ключові слова: плазмоелектролітне оксидування покриттів, оксидокерамічне покриття, трибологічні характеристики, алюмінієвий сплав Д16, плазмові Al-Ti-Si покриття.

Стовпченко Г. П., Лісова Л. О., Медовар Л. Б., Гончаров І. О. Термодинамічні та фізичні властивості шлаків системи $\text{CaF}_2\text{-(Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MgO)}$ для електрошлакового переплавлення сплаву Inconel 718.....	63
--	----

Досліджено фізико-хімічні властивості (в'язкість, електропровідність, температурний інтервал плавлення, термодинамічну активність кисню) шлаків системи $(10...70)\text{CaF}_2\text{-(0...60)Al}_2\text{O}_3\text{-(0...30)TiO}_2\text{-(0...30)MgO}$. Встановлено, що необхідний вміст титану (0,65...1,15%) в сплаві Inconel 718 можна забезпечити, використовуючи шлаки $(49\text{CaF}_2\text{-}30\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}21\text{TiO}_2$ та $50\text{CaF}_2\text{-}22\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}18\text{TiO}_2\text{-}10\text{MgO}$) навіть за наявності в їх складі 0,5...2% SiO_2 . Вміст алюмінію вдається відкоректувати додатковим легуванням або заздалегідь його підвищити у переплавленому електроді. З ростом температури від 1500 до 2500 К рівноважний вміст титану в металі знижується, а алюмінію зростає. Кількість титану на рівні вихідного (1%) у переплавленому металі зі шлаком $50\text{CaF}_2\text{-}22\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}18\text{TiO}_2\text{-}10\text{MgO}$ забезпечено при 1700 К. Порівняно зі шлаком $70\text{CaF}_2\text{-}15\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}15\text{CaO}$, який часто використовують для переплаву суперсплавів, досліджувані $49\text{CaF}_2\text{-}30\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}21\text{TiO}_2$ та $50\text{CaF}_2\text{-}22\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}18\text{TiO}_2\text{-}10\text{MgO}$ поліпшують екологічність процесу внаслідок зниженого на 20% вмісту CaF_2 за зівставних значень температури кристалізації та електропровідності.

Ключові слова: фізико-хімічні властивості шлаків, в'язкість, електропровідність, температурний інтервал плавлення, термодинамічна активність кисню, Inconel 718, окиснення, алюміній, титан.

Балицький О. І., Колесніков В. О., Іваськевич Л. М., Гаврилюк М. Р.

Вплив особливостей навантаження та наводнювання на триботехнічні властивості сталей.....	73
--	----

Досліджено зносостійкість конструкційних сталей 20; 45 та високоазотної DDT 68 під час сухого тертя за різних умов навантаження. Встановлено, що зі збільшенням проковзування до 20% за навантаження 550 N інтенсивність зношування збільшилася в 1,41 разів для високоазотної сталі та 1,54 рази для конструкційної сталі. Під час проковзування поверхня руйнується шляхом викиду матеріалу в умовах інтенсивного теплового схоплювання, яке впливає на формування вторинних структур з підвищеною концентрацією кисню. З достовірністю апроксимації $R_2 = 0,87...0,99$ отримано логарифмічні та поліноміальні рівняння, які описують інтенсивність зношування в умовах зміни проковзування та навантаження досліджуваних сталей. Після наводнювання продукти зношування мають суттєво складніший текстурований мікрорельєф зі смугами та більші розміри: $\geq 350 \mu\text{m}$ ($P = 250 \text{ N}$), $600...1000 \mu\text{m}$ ($P = 400 \text{ N}$), $800... 1300 \mu\text{m}$ ($P = 600 \text{ N}$).

Ключові слова: сухе тертя, тертя кочення, проковзування, високоазотна сталь, конструкційна сталь, продукти зношування, наводнювання.

Галайчак С. А., Дацко Б. М., Головчук М. Я., Дячук А. І. Порівняння сорбційної

здатності синтетичного цеоліту і фосфатів двовалентних металів.....	81
---	----

Механохімічним синтезом отримано екологічно безпечні пігменти на основі синтетичного цеоліту і монофосфатів цинку, кальцію і марганцю. Встановлено оптимальні умови їх диспергування. Методами електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу визначено морфологію поверхні та елементний склад одержаного пігменту, який свідчить про інтеркаляцію фосфору і відповідних металів у структуру цеоліту. Десорбція фосфат-аніонів у 0,1% NaCl зростає у ряду $\text{Na-A/Zn(H}_2\text{PO}_4)_2\text{-Na-A/Ca(H}_2\text{PO}_4)_2\text{-Na-A/Mn(H}_2\text{PO}_4)_2$, максимум їх концентрації для всіх композицій виявлено після 48 h експозиції. Концентрація десорбованих фосфат-аніонів у досліджуваному середовищі за механохімічного синтезу у ~ 2 рази більша, ніж у йонно-обмінному. Виявлено ефективність пігменту на основі монофосфату цинку і цеоліту у складі лакофарбових покриттів.

Ключові слова: синтетичний цеоліт, фосфат, модифікація, механохімічний синтез, сорбція, алюмінієвий сплав, сталь.

Шахбазов Я. О., Широков В. В., Василів Х. Б., Федорович В. О. Визначення фізико-технологічних параметрів правки шліфувальних кругів алмазним інструментом.....86

Правку шліфувальних кругів на керамічній зв'язці методом точіння алмазними інструментами подано у вигляді ударної системи. Отримано часові та силові характеристики взаємодії “абразивне зерно–кристал алмаза” як ударної контактної системи, за якими визначили силу удару, яка передається пружній основі і визначає її напружений стан. Результати теоретичних розробок підтверджені експериментальними дослідженнями, зокрема, розмірним аналізом продуктів руйнування робочої поверхні шліфувального круга та її лазерним скануванням після правки за різними режимами.

Ключові слова: правка, ударна система, контактна міцність, часові характеристики удару, руйнування зерен, лазерне сканування, відносна опорна поверхня.

Литвиненко Я. В., Маруцак П. О. Метод перевірки циклічності мікрорельєфу самоорганізованої поверхні титанового сплаву, обробленої лазером.....92

Оцінено морфологію рельєфних утворень на поверхні титанового сплаву, обробленої фемтосекундним лазерним імпульсом, за припущення наявності просторово повторюваної сегментно-циклічної структури, сформованої сегментами-циклами. Крім сегментної, проаналізовано також ритмічну структуру із постійним або змінним ритмами на основі математичної моделі циклічного випадкового процесу. За опрацьованим методом можна визначити морфологію поверхні і її статистичні характеристики.

Ключові слова: фемтосекундний лазерний імпульс, перевірка циклічності мікрорельєфу, сегментна структура, самоорганізація поверхні.

Рибачук В. Г., Учанін В. М. Рекурентна формула для визначення ефективної коерцитивної сили шаруватих феромагнетних матеріалів.....98

Проаналізовано розподіл магнетних потоків під час перемагнечування три- і чотиришарових феромагнетних матеріалів з однаковою товщиною шарів приставними давачами з П-подібним осердям і отримано аналітичні вирази для визначення їх ефективної коерцитивної сили (КС). Обґрунтовано застосування лінійної апроксимації ділянок розмагнечування петель гістерезису окремих шарів. Встановлено в цих виразах стійкі закономірності і на їх основі запропоновано рекурентну формулу для розрахунку ефективної КС феромагнетних матеріалів, які складаються із довільної кількості шарів однакової товщини. Виявлено, що вона залежить не тільки від КС окремих шарів, але й від їх залишкових магнетних індукцій. Експериментально перевірено отриманий вираз на дослідних зразках зі сталей 08кп і Ст3. Для вимірювання КС і залишкової індукції використано магнетний аналізатор типу КРМ-Ц-МА. Підтверджено добру узгодженість розрахункових значень ефективної КС двошарового феромагнетного матеріалу із цих сталей з результатами вимірювань (похибка не перевищує 3%).

Ключові слова: неруйнівний контроль, шаруватий феромагнетний матеріал, петля гістерезису, коерцитивна сила, залишкова індукція.

Уцаповський Д. Ю., Лінючева О. В., Кушмирук А. І., Редько Р. М., Підвашиецький Г. Ю. Порівняльне дослідження корозійної активності блискучих та матових нікелевих покриттів у розчинах і парі оцтової кислоти.....105

Досліджено корозійну поведінку матових та блискучих гальванічних нікелевих покриттів у розчинах і парі оцтової кислоти. Показано, що корозія як блиску-

чих, так і матових покриттів у досліджуваних середовищах відбувається з кисневою деполяризацією. Швидкість анодного розчинення блискучих нікелевих покриттів у розчинах оцтової кислоти вища, ніж матових, що пов'язано із впливом сульфур у суцільність пасивної плівки на блискучих нікелевих осадах та їх здатність до пасивації. На основі енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії та рентгеноструктурного аналізу показано формування на поверхні блискучих нікелевих осадів за експонування у парі та розчинах оцтової кислоти продуктів корозії у вигляді ацетату нікелю та плівки із сульфідів нікелю змінного стехіометричного складу. Встановлено, що цей склад змінюється у бік збільшення вмісту сірки від Ni_3S_2 до Ni_3S_4 за тривалої витримки досліджуваних блискучих осадів нікелю в парі чи розчинах оцтової кислоти.

Ключові слова: оцтова кислота, нікель, корозія, сульфідні нікелю, киснева деполяризація.

Зуйок В. А., Купрін О. С., Клименко І. О., Толмачова Г. М., Третьяков М. В., Рудь Р. О., Куштим Я. А., Дикий І. В., Шевченко І. В., Штефан В. В.
Жаротривкість у водяній парі оболонок зі сплаву Zr–1Nb після йонно-плазмового азотування..... 113

Вивчено вплив часу йонно-плазмового азотування твельних трубок зі сплаву Zr–1Nb на їх тривкість до окиснення у водяній парі при 600...1200°C. Виявлено, що залежно від часу оброблення твердість зразків по товщині стінки трубки збільшується від 2 до 3 GPa, а на поверхні – до 12 GPa. Азотовані трубки окиснюються набагато сильніше за розтріскування і розшарування оксидного шару порівняно з вихідним станом.

Ключові слова: цирконієвий сплав, оболонка, йонно-плазмове азотування, окиснення, водяна пара.

Масюк А. С., Левицький В. Є., Куліш Б. І., Кечур Д. І., Гуменецький Т. В., Білий Л. М. Фізико-механічні та теплофізичні характеристики крохмальвмісних поліактидних матеріалів для 3D друку..... 120

Розроблено полілактидні композиційні матеріали з органічним наповнювачем-модифікатором крохмалем, неорганічним – карбонатом кальцію та пластифікатором – епоксидованою соєвою оливою для 3D друку. Модульно-деформаційним методом визначено пружно-пластичні та деформаційні їх властивості. Виявлено зміну модулів деформації, пружності та високоеластичності залежно від складу композиту. Встановлено твердість і теплотривкість за Віка, а також термомеханічні характеристики розроблених полілактидів.

Ключові слова: полілактид, модифікування, крохмаль, епоксидована соєва олива, деформація.

Берега В. В., Руденко В. В., Рубальський П. С., Пастушенко О. М., Заєць О. В.
Параметричний метод виявлення прихованих підповерхневих неметалевих трубопроводів..... 126

Подано параметричний метод виявлення прихованих підповерхневих неметалевих трубопроводів на основі органічних високомолекулярних з'єднань (поліетилену, полістиролу полівинхлориду, поліпропілену). Він ґрунтується на параметричних властивостях рідин трубопроводів, які проявляються за примусової їх поляризації поворотом магнетних осей їхніх протонів на деякий кут відносно магнетного поля Землі. Після закінчення дії імпульсу поляризації виникає прецесія осей протонів рідини у напрямку до магнетного поля Землі. Це призводить до появи магнетного поля вільної ядерної прецесії з частотою Лармора, що свідчить про знаходження прихованого підповерхневого трубопроводу з рідиною.

Тривалість прецесії протонів залежить від рідини та слугує ознакою для її розпізнавання в трубопроводі.

Ключові слова: *неметалеві трубопроводи, параметричні властивості рідин, параметричний метод виявлення трубопроводів, тривалість прецесії протонів, частота Лармора, магнетне поле Землі.*

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
H. V. KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE

PHYSICO-CHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS

International Scientific-Technical Journal
Founded in January 1965
Published bimonthly

VOLUME 58, № 4, 2022

July – August

CONTENTS

- Savruk M. P., Onyshko L. Yo., and Kvasniuk O. I.* Stress distribution near sharp and rounded V-notches in anisotropic elastic body under antiplane strain.....5

Using the singular integral equations method the antiplane elastic problem for elastic anisotropic body with sharp and rounded angular notches is solved. The asymptotic dependence between the stress intensity factor and stress concentration in the sharp and rounded tips of arbitrarily oriented angular notch is obtained. On this basis the unified approach of stress determination near sharp and rounded angular notches in orthotropic and anisotropic bodies under antiplane deformation is developed.

Keywords: *fracture mechanics, anisotropy, stress intensity factor, V-notch, antiplane deformation, singular integral equation method.*

- Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., Zviagin N. S., and Bobryk K. R.* Estimation of residual life time of rectification column of ethylene production under action of wind load and atmospheric corrosion13

Using the energy approach formulated earlier by the authors, a mathematical model is constructed, which in turn is the basis of the calculation method for predicting the residual life of the distillation column for production of ethylene under the action of wind load and atmospheric corrosion. It should be noted that the wind load is shunting in nature – a constant pressure on the column with frequent gusts. It is believed that in the girth weld, to which the column is attached to the base, there is an external surface corrosion-mechanical crack, into which the corrosive environment penetrates. Such a corrosive environment together with the shunting wind load intensifies its propagation to the size, which causes failure of the column. Using the energy approach, this problem is reduced to special differential equations with special delta functions, which are solved approximately for a large number of wind gusts. With the help of this method the dependence of the residual life time of the 09Г2С steel column on the number of wind gusts are investigated.

Keywords: *distillation column, residual life time, energy approach, stress intensity factor, crack opening, shunting load mode.*

- Stashchuk M. H., Drobenko B. D., and Irza Ye. M.* Method of calculation of optimal annealing modes of functionally gradient bodies.....20

The problem of calculating the optimal annealing modes of functional-gradient bodies is proposed. An original method of its numerical solution based on the principle of

stepwise parametric optimization has been developed. Use of the finite element method to solve direct problems in the process of iterative construction of optimal heating-cooling modes makes it possible to solve a wide class of problems for bodies of complex geometric shape and structure. The search for the optimal value of the control function does not require zero approximation in time and at each time step the function of one variable can be minimized.

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

Ivanytskyi Ya. L., Hvozdiuk M. M., Klymenko D. V., Hrynenko M. V., and Maksymenko O. P. Modeling of the effect of hydrogenation at elevated temperatures on the strength of steam generator pipes steel of the nuclear power plant26

The operating conditions for modeling and evaluating the invariant strength characteristics of 22K steam-generator steel at high temperature and the action of gaseous hydrogen are analyzed. The importance of using the energy criterion, which takes into account the change in true stresses and strains under the action of internal pressure at high temperatures of the hydrogen medium, is demonstrated. Diagrams of the limit state of 22K steel under the combined effect of mechanical load and high temperatures are constructed. An approach to determining the degree of pipeline damage under operating conditions based on the ratio of elastic-plastic deformation energy and specific fracture energy of 22K steel is proposed.

Keywords: *steam generator 22K steel, energy approach, hydrogen environment, high temperature, residual strength.*

Zvirko O. I., Lipiec S., Venhryniuk O. I., and Dzioba I. Evaluation of the stress-strain state at the crack tip in casing pipes based on numerical modeling.....32

The distributions of local stresses and strains in the specimen at the crack tip for the 50Г and 32Г2 casing pipe steels with different microstructures are obtained by simulating the stress-strain state at the crack tip and using numerical calculations. Steels are distinguished by atypical mechanical behaviour: lower strength steel 50Г with a coarse-grained ferrite-pearlitic structure is characterized by lower resistance to brittle fracture compared to other 32Г2 steel with a fine-grained bainite structure. The finite element method is used for the simulation of the specimen with a crack, and the true stress-strain curves of the steels are used for calculations. The results of the calculations confirm a higher susceptibility to brittle crack growth for coarse-grained steel.

Keywords: *casing, microstructure of steels, simulation of crack growth resistance, fracture mechanism, fracture toughness.*

Kozak L. Yu. Peculiarities of plastic deformation of filamentary crystals.....37

The process of plastic deformation of single crystals at the atomic level according to the previously proposed discrete model is described. The single crystals are considered as a two-phase structure consisting of surface layers and inner regions of a perfect crystalline lattice. The effect of surface on the strength of single crystals of perfect structure is analyzed. As the proportion of the surface layer in the total volume of thick single crystals is small, the influence of the surface on their strength is very low. Increase of the number of defects after plastic deformation significantly increases their strength. On the other hand, due to the small size of whisker crystals, the surface has a significant influence, which makes them very strong. It is concluded that the mechanisms of plastic deformation at the atomic level are the same for both thin and thick crystals, despite the differences in their tensile diagrams.

Keywords: *thick single crystals, whisker crystals, plastic deformation, two-phase structure, stress, shear resistance.*

- Semerak M. M., Rymar T. I., and Glova T. Ya.* Mathematical modeling of the thermally stressed state in the node connection of the coil shank with the collector of the high-pressure heater ПІВ-2500-97.....45

The thermal stress state of the connecting node of the shank of the spiral coil element $\varnothing 32 \times 4$ mm to the collector $\varnothing 325 \times 32$ mm of HPH-6 and HPH-7 for the operational modes of the power unit with the WWER-1000 reactor is investigated. Mathematical modeling of the connection is performed, taking into account that temperature movements and stresses depend on the thermophysical and mechanical characteristics of structural materials in the operating conditions of the equipment.

Keywords: *high-pressure heater, coil shank, the thermal stress state of heat exchanger element.*

- Kovalchuk I. V., Yurkevych R. M., and Posuvailo V. M.* Crystal structure of oxide ceramic coatings obtained on alloys with a high silicon content.....50

Crystal structure of oxide ceramic coatings obtained on AK9M2 and AK12 alloys is determined. Already after 5 min of processing the AK9M2 alloy the plasma electrolyte oxidation (PEO) method in a standard electrolyte (KOH (3 g/l), Na_2SiO_3 (2 g/l)), aluminum and silicon form a compound $\text{Al}_{3.21}\text{Si}_{0.47}$. The thermal stability of compounds with the composition $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ is analyzed. A scheme for converting intermediate oxides into mullite is proposed. The obtained results show that with an increase in the content of silicon in the alloys, the amount of sillimanite in the corresponding coatings increases. Increase of the duration of the PEO process of silumins processing to 2 h causes a partial transformation of sillimanite into mullite. The maximum content of mullite in coatings is ~ 4 mass%.

Keywords: *silumin, plasma electrolyte oxidation, aluminum oxides, oxide ceramic coatings, X-ray analysis, crystal structure, sillimanite, mullite.*

- Student M. M., Pohrelyuk I. M., Hvozdetzkyi V. M., Zadorozhna Kh. R., and Veselivska H. H.* Tribological characteristics of PEO layers synthesized on plasma Al–Ti coatings.....57

The tribological characteristics of oxide layers synthesized by plasma electrolytic oxidation (PEO) in a weakly alkaline electrolyte in the pulsed cathodic-anodic mode on plasma Al–Ti–Cu coatings sprayed on a substrate D16 aluminum alloy are investigated. It was established that in the PEO layer-steel ball friction pair, the highest wear resistance is provided by selective transfer due to the presence of copper in the layer structure, and in the PEO layer-ceramic ball friction pair, the high-strength Al_2TiO_5 phase is provided.

Keywords: *plasma electrolytic oxidation of coatings, oxide ceramic coating, tribological characteristics, D16 aluminum alloy, plasma Al–Ti–Cu coatings.*

- Stovpchenko G. P., Lisova L. O., Medovar L. B., and Goncharov I. O.* Thermodynamic and physical properties of CaF_2 –(Al_2O_3 – TiO_2 – MgO) slags for electroslag remelting of Inconel 718 alloy.....63

Physicochemical properties (viscosity, electrical conductivity, melting point, thermodynamic activity of oxygen) of $(10\text{...}70)\text{CaF}_2$ – $(0\text{...}60)\text{Al}_2\text{O}_3$ – $(0\text{...}30)\text{TiO}_2$ – $(0\text{...}30)\text{MgO}$ slags system are studied. It is shown that the required content of titanium in the Inconel 718 (0.65...1.15%) can be provided with the studied slags $(49\text{CaF}_2\text{--}30\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}21\text{TiO}_2$ and $50\text{CaF}_2\text{--}22\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}18\text{TiO}_2\text{--}10\text{MgO}$) even if they contain 0.5...2% SiO_2 . The aluminum content can be adjusted by adding or pre-increasing its content in the remelting electrode. With temperature growth from 1500 to 2500 K, the equilibrium content of Ti in the metal decreases, and of Al – vice versa. The content of titanium at the initial level (1%) in the molten metal is provided at a temperature of 1700 K with

50CaF₂-22Al₂O₃-18TiO₂-10MgO slag. It is determined that in comparison with 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO slag (which is widely used for superalloy remelting), the studied compositions 49CaF₂-30Al₂O₃-21TiO₂ and 50CaF₂-22Al₂O₃-18TiO₂-10MgO will increase environmental friendliness of the remelting due to the reduced content of CaF₂ by 20% at comparable values of crystallization temperature and conductivity.

Keywords: *physicochemical properties of slags, viscosity, electrical conductivity, melting point, thermodynamic activity of oxygen, Inconel 718, oxidation, aluminum, titanium.*

Balitskii O. I., Kolesnikov V. O., Ivaskevych L. M., and Havryliuk M. R.

The influence of specific features of load and hydrogenation
on steels tribotechnical properties.....73

Wear resistance of structural steels 20; 45 and high-nitrogen DDT 68 during dry friction under different load conditions has been studied. It is found that with an increase in slip to 20% at a load of 550 N, the wear intensity increases 1.41 times for high-nitrogen steel and 1.54 times for structural steel. In sliding, the surface fractures by tear of the material under conditions of intense thermal setting, which affects the formation of secondary structures that contain an increased concentration of oxygen. With the reliability approximation of $R_2 = 0.87...0.99$ logarithmic and polynomial equations are obtained that describe the wear intensity in the conditions of change of the slip and loading of the studied steels. After hydrogenation, the wear products have a significantly more complex textured microrelief with strips and larger dimensions: $\geq 350 \mu\text{m}$ ($P = 250 \text{ N}$), $600...1000 \mu\text{m}$ ($P = 400 \text{ N}$), $800...1300 \mu\text{m}$ ($P = 600 \text{ N}$).

Keywords: *dry friction, rolling friction, slip, high-nitrogen steel, structural steel, wear products, hydrogenation.*

Halaichak S. A., Datsko B. M., Holovchuk M. Ya., and Dyachuk A. I. Comparison

of the sorption capacity of synthetic zeolite and phosphates of divalent metals.....81

Ecologically safe pigments based on synthetic zeolite and monophosphates of zinc, calcium and manganese were obtained by mechanochemical synthesis. The optimal conditions for their dispersion were established: 200 rpm for 60 min. Using the method of electron microscopy and energy dispersive analysis, the surface morphology and elemental composition of the obtained pigment were determined, which indicated the intercalation of phosphorus and relevant metals into the zeolite structure. The desorption of phosphate anions in 0.1% NaCl increases in the series Na-A/Zn(H₂PO₄)₂-Na-A/Ca(H₂PO₄)₂-Na-A/Mn(H₂PO₄)₂, the maximum concentration for all compositions is found after 48 h exposure. The concentration of desorbed phosphate anions in the studied medium during mechanochemical synthesis is ~ 2 times higher than in ion exchange. The obtained results indicate the effectiveness of the mechanochemically obtained pigment based on zinc monophosphate and zeolite as part of paint coatings for the protection of structures made of aluminum alloys.

Keywords: *synthetic zeolite, phosphate, modification, mechanochemical synthesis, sorption, aluminum alloy, steel.*

Shakhbazov Ya. O., Shyrovkov V. V., Vasylyv Kh. B., and Fedorovych V. O.

Determination of physical and technological parameters of the process
of grinding wheels diamond tool dressing.....86

The cutting process of grinding wheels with ceramic bonding by means of diamond tools is presented as a shock system, which uses the method of turning. The time and power characteristics of the shock contact system "abrasive grain-diamond crystal" are obtained, which determine the magnitude of the impact force, that is passed to the elastic base and causes its stressed state. The results of theoretical developments are confirmed by experimental studies, in particular, by dimensional analysis of the frac-

ture products of the working surface of the grinding wheel and its laser scanning after correction by different regimes.

Keywords: *renovation, impact system, contact strength, time characteristics of impact, laser scanning of grains, relative bearing surface.*

- Lytvynenko Ya. V. and Marushchak P. O.* A method for checking the cyclicity of the microrelief of the titanium alloy self-organized surface, processed by laser.....92

The morphology of relief formations on the surface of a titanium alloy treated with a femtosecond laser pulse for cyclicity has been evaluated. An assumption is introduced about the presence of a segment-cyclic structure, which has a spatial repeatability formed by segment-cycles. In addition to the segment structure, a rhythmic structure with a constant or variable rhythm is also considered based on a mathematical model of a cyclic random process (stochastic case). A method has been developed for checking the cyclicity of the formed relief formations, which makes it possible to evaluate the morphology of the resulting surface and its statistical characteristics.

Keywords: *femtosecond laser pulse, verification of microrelief cyclicity, segmental structure, surface self-organization.*

- Rybachuk V. H. and Uchanin V. M.* Recurrent formula for effective determination of coercitive force of layered ferromagnetic materials.....98

The distribution of magnetic fluxes during the reversal magnetization of three- and four-layer ferromagnetic materials with the same layer thickness by attachable probes with a U-shaped core was analyzed. As result, analytical expressions for their effective coercive force (CF) have been obtained. The application of linear approximation for hysteresis loop demagnetization sections of separate layers is substantiated. The presence of stable regularities in these expressions is shown. Based on them, a recurrent formula for the effective CF of layered ferromagnetic materials, which consist of an arbitrary number of layers of the same thickness, is proposed. It is established that the effective CF depends not only on the CF of individual layers, but also on their residual magnetic inductions. An experimental verification of the obtained expression is carried out on samples of steels 08кп and Ст3. A magnetic analyzer of the KRM-Ts-MA type is used for CF and residual magnetic induction measurements. The good agreement between the calculated value of the effective CF of the two-layer ferromagnetic material of these steels according to the obtained recurrent formula and the measurement results is confirmed (the error does not exceed 3%).

Keywords: *non-destructive testing, layered ferromagnetic material, hysteresis loop, coercive force, residual induction.*

- Uschapovskiy D. Y., Linyucheva O. V., Kushmyruk A. I., Red'ko R. M., and Pidvashetskiy G. Y.* Comparative study of corrosion activity of bright and matte nickel plating in solutions and vapour of acetic acid.....105

Corrosion behavior of matte and bright galvanic nickel coatings in solutions and vapors of acetic acid has been studied. It has been shown that corrosion of the corresponding materials in the studied media occurs with oxygen depolarization. The rate of anodic dissolution of bright nickel deposits in acetic acid solutions is higher than that of matte, due to the effect of sulfur on the continuity of the passive film on bright nickel deposits and their passivation ability. Based on EDX and XRD studies, the formation of corrosion products on the surface of bright nickel deposits in the form of nickel acetate and a film of nickel sulfides of variable stoichiometric composition during the exposition to acetic acid solutions and vapour has been shown. It is found that the stoichiometric composition of sulfide corrosion products changes in

the direction of increasing sulfur content from Ni₃S₂ to Ni₃S₄ with prolonged exposure of the studied bright nickel deposits to vapour or solutions of acetic acid.

Keywords: *acetic acid, nickel, corrosion, nickel sulfides, oxygen depolarization.*

Zuyok V. A., Kuprin O. S., Klimenko I. O., Tolmachova G. N., Tretyakov M. V.,
Rud R. O., Kushtym Ya. A., Dikiy I. V., Shevchenko I. V., and Shtefan V. V.
Heat resistance in water vapor of Zr–1Nb alloy shells after ion-plasma nitriding113

The influence of the time of ion-plasma nitriding of fuel claddings made of Zr–1Nb alloy on their resistance to oxidation in water steam at 600...1200°C is studied. Nano-indentation confirms the effective nitriding of the alloy: depending on the processing time, the hardness of the samples on the wall thickness increases from 2 to 3 GPa, and on the surface to 12 GPa. It is found that nitrided tubes oxidize much more higher with cracking and delamination of the oxide layer compared to the initial state.

Keywords: *zirconium alloy, cladding, ion-plasma nitriding, oxidation, water steam.*

Masiuk A. S., Levytskyi V. Ye., Kulish B. I., Kechur D. I., Humenetskyi T. V.,
and Bilyi L. M. Physico-mechanical and thermophysical characteristics
of starch-containing polyactide materials for 3D printing.....120

Polyactide composite materials with organic filler-modifier starch, inorganic filler – calcium carbonate and plasticizer – epoxidized soybean oil for 3D printing have been developed. On the basis of the modular deformation method of calculation the elastic-plastic and deformation properties of the developed modified polyactide materials are determined. The change of modulus of deformation, modulus of elasticity, modulus of high elasticity depending on the composition of the composite is revealed. The surface hardness, Vicat heat-resistance softening point and thermomechanical characteristics of the developed polyactide materials are determined.

Keywords: *polyactide, modification, starch, epoxidized soybean oil, deformation.*

Bereka V. V., Rudenko V. V., Rubalskii P. S., Pastushenko O. M., and Zayets O. V.
Parametric method of detection of hidden subsurface non-metallic pipelines.....126

The self-reactance method for locating hidden subsurface non-metal pipelines made of high molecular compounds (polyethylene, polystyrene, PVC, polypropylene) is proposed. It is based on the self-reactance properties of liquids in pipelines, which appear with the forced polarization of liquid by turning the magnetic axis of the protons at some angle in relation to the magnetic field of Earth. After the polarization pulse a liquid proton axis precession starts in the direction to the magnetic field of Earth. It results in appearance of the variable magnetic field of free nuclear precession with Larmor frequency, that testifies to the location of subsurface pipeline with a liquid. Proton precession time depends on the liquid and serves as a sign for recognition of liquid type in a pipeline.

Keywords: *non-metal pipelines, self-reactance properties of liquids, self-reactance method of pipeline location, proton precession time, Larmor frequency, magnetic field of Earth.*