

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.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. Копчак, Г. М. Кулик*

Підписано до друку 26.02.2021. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12. Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 050321 від 05.03.2021. 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, № 3, 2021

травень – червень

ЗМІСТ

<i>Назарчук З. Т.</i> 70 років з часу заснування Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України.....	5
<i>Панасюк В. В.</i> Внесок Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у дослідження впливу водню на деформування та руйнування металів (Огляд).....	7

Проаналізовано результати досліджень взаємодії водню з металами під час їх деформування. Сформульовано висновки про руйнування та міцність конструкційних матеріалів за даними випроб, виконаних у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка (ФМІ) НАН України за минулих 70 років (з 1951 р.). Головну увагу приділено двоїстому характеру впливу водню на деформування металів: за малих концентрацій він сприяє їх пластифікації, а за високих – окрихченню. Ці особливості його взаємодії з металами є основою для прогнозування довговічності металевих конструкцій у воденьвмісних середовищах, а також розроблення виробів з високими фізико-механічними характеристиками.

Ключові слова: металічні матеріали, водень, деформація, воднева декогезія міжатомних зв'язків у кристалічній ґратці металів, пластифікування та окрихчення металів, пластифікувальна дія водню.

<i>Хома М. С., Василів Х. Б., Чучман М. Р.</i> Вплив концентрації сірководню на корозію та наводнювання трубних сталей (Огляд).....	17
---	----

Розглянуто корозію сталей у сірководневих середовищах різної концентрації з врахуванням особливостей формування на їх поверхні сульфідів різного хімічного складу та їхнього впливу на перебіг окисно-відновних реакцій. Подано різні погляди на їх роль у корозійних процесах. На основі узагальнення впливу сульфідів заліза на електродні реакції, виділення і абсорбцію водню армо залізом, сталями У8 та 45 різної структури виявлено, що хоч сульфіди заліза переважно знижують перенапругу катодних реакцій та збільшують кількість виділеного за катодної поляризації водню, вони не завжди сприяють їх наводнюванню. Сульфіди заліза впливають здебільшого на реакцію виділення водню, а його абсорбція залежить від структури сталей. На прикладі сталі 17Г1С-У показано, що на швидкість корозії впливає природа сформованих на поверхні сульфідів, які за концентрацій 25...100 mg/dm³ знижують її майже на порядок. За концентрацій сірководню C_{H2S} ≥ 500 mg/dm³ формуються пористі сульфіди, корозійні пошко-

дження локалізуються і сталь абсорбує водень майже удвічі більше, ніж за менших концентрацій, що сприяє розвитку тріщиноутворення та корозійному розтріскуванню. Встановлено, що критичною концентрацією для розвитку сірководневого корозійного розтріскування сталей такого класу є $C_{H_2S} \leq 100 \text{ mg/dm}^3$.

Ключові слова: сірководень, сталі, корозія, швидкість корозії, наводнювання, сірководневе корозійне розтріскування, продукти корозії, сульфіди.

Звірко О. І. Експлуатаційна деградація конструкційних сталей (Огляд).....28

Проаналізовано механізм деградації сталей перлітного класу залежно від умов експлуатації, насамперед, температури, напружень та наводнювання. Систематизовано мікроструктурні, механічні та електрохімічні ознаки експлуатаційної деградації конструкційних сталей, її основні стадії. Найхарактернішою ознакою є зниження опору крихкому руйнуванню, що підвищує ризик втрати цілісності конструкцій. Виділено стадію розвитку розсіяної пошкодженості на нано- і мікрорівні та пов'язані з цим певні механічні ефекти. Розглянуто лабораторні методи прискореної деградації сталей. Показано особливу роль наводнювальних середовищ у деградації сталей та проаналізовано неруйнівні методи її діагностування. Розглянуто перспективи досліджень експлуатаційної деградації сталей водневої енергетики, пов'язаної з використанням існуючої мережі транзитних і розподільчих газопроводів для транспортування водню чи сумішей природного газу з ним.

Ключові слова: сталь, експлуатація, водень, мікроструктура, механічні властивості, корозія, опір крихкому руйнуванню, воднева крихкість.

Саврук М. П. Концентрація напружень біля криволінійних отворів та вирізів з негладкими контурами.....41

Наведено огляд досліджень концентрації напружень у пружних тілах, послаблених криволінійними отворами та вирізами з негладкими контурами. Особливу увагу приділено асимптотичному підходу до вивчення розподілу напружень біля таких концентраторів, коли коефіцієнти інтенсивності напружень у гострих вершинах вирізів знаходять з коефіцієнтів концентрації напружень у закругленій вершині кутового вирізу.

Ключові слова: механіка руйнування, коефіцієнт інтенсивності напружень, коефіцієнт концентрації напружень, кутовий виріз, гострокутний отвір.

Назарчук З. Т., Вороняк Т. І., Муравський Л. І. Розвиток оптико-цифрових методів контролю поверхні елементів конструкцій для потреб технічної діагностики.....53

Проаналізовані оптико-цифрові методи контролю поверхні елементів конструкцій, розвинуті у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України для потреб технічної діагностики. Методи засновані на принципах фазозсувної інтерферометрії (ФЗІ), цифрової спекл-інтерферометрії (ЦСІ) та цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Оцінено переваги методів дво- та трикрокової ФЗІ з довільними зсувами фази опорного променя проти традиційних. На основі методу трикрокової ФЗІ створено 3D профілометр для вимірювання параметрів шорсткості і хвилястості поверхні. Розроблено метод фазозсувної ЦСІ, що здатний лише за двома парами спекл-інтерферограм відтворювати поле переміщень поверхні. Метод використано для розв'язування різних задач технічної діагностики, зокрема, для виявлення прихованих отворів і дефектів у металічних зразках та зварних з'єднаннях. Методами ЦКЗ визначено поля переміщень поверхні поблизу берегів тріщин та інших концентраторів напружень, коефіцієнти інтенсивності напружень, J -інтеграл, напрям поширення тріщини, межі зони пластичності під час навантаження зразка. Для встановлення 3D полів переміщень

розроблено новий метод 3D ЦКЗ, за допомогою якого виміряно деформації поверхні паливного бака ракети-носія.

Ключові слова: фазозсувна інтерферометрія, цифрова спекл-інтерферометрія, цифрова кореляція зображень, рельєф поверхні, поле переміщень поверхні.

Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Долінська І. Я. Теоретичні засади методу акустичної емісії у діагностиці заповільненого руйнування матеріалів.....64

Зроблено огляд результатів теоретичних досліджень методу акустичної емісії (АЕ) для встановлення граничної рівноваги матеріалів з тріщинами, їх заповільненого руйнування (зародження і поширення тріщин) та визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій тривалого експлуатування. Водночас розроблено розрахункові моделі для визначення методом АЕ дефектів типу тріщин, об'ємної пошкодженості матеріалів та критерії механізмів їх руйнування, а також акустико-емісійні методики для побудови кінетичних діаграм заповільненого росту тріщин повзучості.

Ключові слова: акустична емісія, кількісна діагностика стану матеріалів, заповільнене руйнування, розрахункова модель, ріст тріщини.

Вербовицький Ю. В., Оприск В. В., Штендер В. В., Завалій І. Ю. Воденьсорбційні властивості матеріалів на основі сплавів та сполук з великим вмістом магнію.....74

Подано короткий аналіз праць з газового та електрохімічного гідрування сплавів з високим вмістом магнію, зокрема, на основі R_2Mg_{17} та RMg_{12} . Проаналізовані методи поліпшення воденьсорбційних властивостей магнієвих композитів та вплив на них різних додатків. Показано як тривалість помолу та кількість доданих каталізаторів діють на воденьсорбційні та електрохімічні властивості композитів. Практично у всіх випадках цей вплив є позитивним, а основні параметри можуть зростати на значний відсоток.

Ключові слова: сплави рідкісноземельних металів, сплави магнію, гідриди, електрохімічні властивості, електродні матеріали.

Студент М. М., Погрелюк І. М. Модифікація поверхні алюмінієвих і титанових сплавів для підвищення їх зносостійкості та трибологічних характеристик.....84

Показано основні досягнення науковців Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у формуванні зносостійких покриттів на алюмінієвих та титанових сплавах. Встановлено механізми дії водню, міді та нікелю на синтез оксидокерамічних покриттів під час плазмоелектролітного оксидування (ПЕО) алюмінієвих сплавів. Запропоновано методи інтенсифікації синтезу, а саме: додання пероксиду водню та озону в електроліт (підвищення вмісту кисню) та збільшення густини анодного і зменшення катодного струмів, що призведе до зниження йонів водню в плазмовому каналі. Поєднання цих методів збільшить товщину ПЕО покриття на 80%, а зносостійкість у 4–6 разів. Розроблено металооксидні композиційні шари на основі корунду із включеннями міді або нікелю. Виявлено взаємозв'язок розмірів включень металів з енергією окремого розряду, що дасть змогу формувати включення міді і нікелю нанорозмірів. Встановлено вплив водню, який утворюється під час розпаду мастила та води, на трибологічну поведінку контактних пар метал–ПЕО покриття, що дозволило зменшити коефіцієнт тертя цих трибопар у 5–20 разів. Розроблено методи підвищення зносостійкості високоміцних $(\alpha+\beta)$ -титанових сплавів, зокрема, сплаву ВТ22. Вперше встановлено, що вихідна $(\alpha+\beta)$ -глобулярна структура сплаву є найсприятливішою для газового азотування. Розроблено підхід для інтенсифікації газового азотування за допомогою холодного поверхневого пластичного де-

формування, що дозволило знизити температурно-часові параметри азотування та сумістити його зі зміцнювальним термічним обробленням сплаву. Показано, що таке комбіноване деформаційно-дифузійне оброблення забезпечує високі триботехнічні характеристики сплаву VT22. Встановлено, що комбінування низькотемпературного оксинітрування та старіння в одному технологічному циклі забезпечує високу фретингостійкість сплаву VT22 у трибопарі зі сплавом Д16.

Ключові слова: *алюмінієві та титанові сплави, плазмоелектролітне оксидування, оксидокерамічні покриття, металооксидні покриття, поверхнєве зміцнення, азотування, термічне оброблення, деформаційно-дифузійне оброблення, оксинітрування, зміцнені шари, зносостійкість, фретингостійкість.*

Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Лецак Р. Л. Вплив попереднього наводнювання–зневоднювання на здатність низьколегованої сталі абсорбувати електрохімічний водень.....95

Встановлено, що попереднє циклічне наводнювання–зневоднювання феритно-перлітної трубної сталі суттєво впливає на її здатність поглинати електрохімічний водень, кількість якого зростає зі збільшенням таких циклів. Розрахована концентрація водню, адсорбованого приповерхневими шарами металу та абсорбованого об'ємом металу, а також сумарна у металі залежно від кількості циклів наводнювання–зневоднювання. Виявлено, що для розглянутих випадків попереднє наводнювання–зневоднювання збільшує здатність сталі поглинати водень у 1,2–2 рази.

Ключові слова: *низьколеговані сталі; електрохімічне наводнювання; наводнювання–зневоднювання металу; концентрація водню.*

Songyuan Jin, Гембара О. В., Гриненко М. В. Комп'ютерне моделювання деформування елементів конструкцій в умовах повзучості за наводнювання металу та складного навантаження.....103

Сформульовано розрахункову модель для оцінювання впливу водню на деформації повзучості в металі за складного напруженого стану. Визначено напружено-деформований стан тонкостінного трубчастого зразка за складного навантаження та повзучості за наводнювання матеріалу. Встановлено вплив виду навантаження на час до руйнування зразка. Показано, що зразки за розтягу з внутрішнім тиском руйнуються на 30% швидше, ніж зразки за одновісного розтягу, а також, що водень зменшує приблизно на 14% тривалість експлуатації матеріалу за всіх видів навантаження.

Ключові слова: *наводнювання, складний напружений стан, повзучість, пошкодження, довговічність.*

Студент О. З., Кречковська Г. В., Свірська Л. М., Кіндрацький Б. І., Широков В. В. Ранжування механічних характеристик сталей парогонів ТЕС за чутливістю до експлуатаційної деградації.....110

Проаналізовано механічні властивості теплотривких сталей після тривалої експлуатації на об'єктах теплоенергетики. Встановлено, що умови роботи (високі температура та тиск корозивно-наводнювального середовища, термічні і механічні напруження) негативно впливають на їх структурно-механічний стан. Узагальнено результати про механічні характеристики сталей після їх експлуатації в різних елементах (прямі ділянки, гини труб, зварні з'єднання) головних парогонів ТЕС за сукупного впливу експлуатаційних чинників і на цій основі проаналізовано їх за чутливістю до високотемпературної водневої деградації.

Ключові слова: *теплотривкі сталі, головні парогони, зварні з'єднання, різні зони гинів, деградація, механічні характеристики, теплоенергетика.*

<i>Остап О. П., Чепіль Р. В., Тітов В. А., Поливода С. Л., Ворон М. М., Подгурська В. Я.</i> Міцність і циклічна тріщиностійкість термодеформованих сплавів системи Al–Mg–Sc.....	118
---	-----

Досліджено структуру, фазовий склад, характеристики міцності і пластичності та тріщиностійкості за циклічного навантаження термодеформованих (екструзією, пресуванням і вальцюванням) виливок сплавів системи Al–Mg–Sc з різним вмістом магнію (типу 1570 і 1545), отриманих за магнетогідродинамічного переміщення розплаву. Встановлено, що з пониженням вмісту магнію розмір зерна сплаву після вальцювання і кількість зернограничних виділень інтерметалідів зменшуються. Механічні характеристики обох сплавів неоднозначно залежать від способу і температури термодеформаційного оброблення. Виявлено, що за параметром конструкційної міцності, який комплексно визначають характеристики міцності і циклічної тріщиностійкості, вони переважають відомі сплави систем Al–Mg–Sc, Al–Mg і Al–Cu–Mg. При цьому його найнижче значення зафіксовано для сплаву з малим розміром зерна.

Ключові слова: *алюмінієві сплави, екструзія, пресування, вальцювання, структура, конструкційна міцність.*

<i>Кирилів В. І., Гурей В. І., Максимів О. В., Гурей І. В., Кулик Ю. О.</i> Вплив моди деформації на силові умови формування поверхневої наноструктури сталі 40X.....	126
---	-----

Вивчено вплив моди деформації, спричиненої різними зміцнювальними інструментами під час формування поверхневої наноструктури сталі 40X механоімпульсною обробкою, на складники сили тертя в зоні фрикційного контакту, структуру та фізико-механічні властивості. Виявлено, що внаслідок реалізації моди простого зсуву спеціальним зміцнювальним інструментом зменшуються розміри зерен, підвищуються глибина та мікротвердість зміцненого поверхневого шару через поліпшення умов зародження та генерування дислокацій.

Ключові слова: *наноструктура, джерело Франка–Ріда, складники сили тертя, зміцнювальний інструмент, розмір зерен.*

<i>Горбань В. Ф., Сердюк І. В., Чугай О. М., Волошин О. О., Олійник С. В., Веселівська Г. Г., Даниленко М. І., Слюсар Д. В., Столбовий В. А., Калахан О. С.</i> Особливості структури і електрофізичних характеристик нітридних покриттів з високоентропійного сплаву Ti–V–Zr–Nb–Hf.....	132
--	-----

Досліджено склад, морфологію та електрофізичні властивості вакуумно-дугових нітридних покриттів на основі високоентропійного сплаву Ti–V–Zr–Nb–Hf. Встановлено істотні коливання хімічного складу високоентропійного сплаву вздовж зразків. Водночас для досліджених областей відхилення усередненого атомного радіуса елементів високоентропійного сплаву не перевищують 1,5%. Виявлено, що морфологія поверхні зразків характеризується трьома типами включень, які відрізняються вмістом легувальних елементів, розміром і формою. Частина включень є краплями, що характерно для вакуумно-дугового методу нанесення покриттів, а решта – сколами. Встановлено, що розподіли електроопору змінному струму та добротності вздовж зразка характеризуються сплесками. Виявлено зв'язок між морфологією поверхні і наявністю на ній окисних шарів.

Ключові слова: *вакуумно-дугові нітридні покриття, високоентропійний сплав, електроопір змінному струму, добротність, морфологія поверхні, окисні шари.*

<i>Федоренкова Л. І.</i> Вплив попередньої обробки в електролітній плазмі на склад та властивості боридного шару за багатокомпонентного насичення сталі.....	137
--	-----

Експериментально досліджено комплексний багатофазний дифузійний шар, сформований на поверхні попередньо обробленої сталі в електролітній плазмі та в умовах хіміко-термічної обробки (ХТО) в насичувальному середовищі, що містить бор, молібден, вольфрам. В результаті багатокомпонентного насичення на поверхні сталі отримано дифузійний шар зі структурними елементами різної твердості, до складу яких входять мікрокристалічні включення боридів молібдену і вольфраму, а також тверді розчини на основі заліза, які сприяють підвищенню зносостійкості боридного покриття в 1,5–2 рази. Встановлено, що попередня обробка сталі в електролітній плазмі прискорює дифузійні процеси під час формування багатофазного покриття за ХТО, сприяє утворенню і розподілу мікрокристалічних включень з тугоплавких сполук на велику глибину, впливає на морфологію та якісні характеристики поверхні.

Ключові слова: бориди, багатокомпонентний, попередня обробка, електролітна плазма, мікрокристалічні включення, мікротвердість.

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

PHYSICOCHEMICAL

MECHANICS OF MATERIALS

International Scientific-Technical Journal

Founded in January 1965

Published bimonthly

VOLUME 57, № 3, 2021

May – June

CONTENTS

Nazarchuk Z. T. The 70-th anniversary of the foundation of H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine.....5

Panasyuk V. V. Contribution of H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS Ukraine into the researches on hydrogen effect on deformation and fracture of metals (A review).....7

The research results on the problems of hydrogen interaction with metals during their deformation are analyzed. The conclusions on the fracture and strength of structural materials using the test data obtained by the scientists of H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute NASU for the last 70 years (beginning from 1951) are formulated. Main attention is paid to the double character of hydrogen influence on metals deformation: at low concentrations it promotes plastification of the metals, and at high – embrittlement. These peculiarities of its interaction with metals are the basis for prediction of the metal structure life time in hydrogen – containing environments as well as the development of products with high physico-mechanical characteristics.

Keywords: *metallic materials, hydrogen, deformation, hydrogen decohesion of interatomic bonds in crystal lattice of metals, plastification and embrittlement of metals, plasticizing effect of hydrogen.*

Khoma M. S., Vasylyv Kh. B., and Chuchman M. R. The influence of hydrogen sulphide concentration on corrosion and hydrogenation of pipe steels (A review)17

The corrosion of steels in environments with different concentrations of hydrogen sulfide is considered, the peculiarities of the formation of different sulfides on the surface and their influence on the redox reactions are considered. Different points of views on their role in corrosion processes are shown. The effect of iron sulfides on electrode reactions, formation of hydrogen and its absorption by iron, steels Y8 and 45 of different structure is summarized. It is shown that iron sulfides mainly reduce the overvoltage of cathodic reactions, increase the amount of hydrogen released by cathodic polarization, although they do not always contribute to their hydrogenation. Iron sulfides affect mainly the reaction of hydrogen formation, and its absorption is determined by the structure of steels. It is shown on the example of 17Mn1S steel, that the corrosion rate is determined by the sulfides nature on the surface. When H₂S

concentration is 25...100 mg/dm³, the surface sulfide film reduces corrosion rate by almost an order of magnitude. Porous sulfides are formed at $C_{H_2S} \geq 500$ mg/dm³, corrosion damage is localized and steel absorbs hydrogen almost twice as much as at lower concentrations, thus contributing to the development of corrosion cracking. It is found that the critical concentration for the development of hydrogen sulfide corrosion cracking of this type of steels is $C_{H_2S} \leq 100$ mg/dm³.

Keywords: *hydrogen sulfide, steels, corrosion, corrosion rate, hydrogenation, hydrogen sulfide corrosion cracking, corrosion products, sulfides.*

Zvirko O. I. Operational degradation of structural steels (A review).....28

The mechanism of degradation of pearlitic steels depending on operational conditions, first of all, temperature, stresses and hydrogenation, is analyzed. Microstructural, mechanical and electrochemical indicators of operational degradation of structural steels and its main stages are systematized. The most characteristic feature is a decrease in resistance to brittle fracture, which increases the risk of the structural integrity loss. The stage of development of dissipated damaging at the nano- and microscales and associated mechanical effects are highlighted. In-laboratory methods of accelerated steel degradation are considered. The special role of hydrogenating environments in the steel degradation process is shown, and non-destructive evaluation methods are analyzed. Research perspectives in operational degradation of steels for hydrogen energy associated with a usage of an existing network of gas transit and distribution pipelines for transportation of hydrogen or its mixtures with natural gas are considered.

Keywords: *steel, operation, hydrogen, microstructure, mechanical properties, corrosion, resistance to brittle fracture, hydrogen embrittlement.*

Savruk M. P. Stress concentration near curvilinear holes and notches with unsmoothed contours.....41

The survey of studies on stress concentration in elastic bodies weakened by curvilinear holes and notches with unsmooth contours is presented. Special attention is paid to the asymptotic approach to the problems of stress distribution near these stress concentrators, when stress intensity factors at sharp vertices are found from the stress concentration factors at the rounded vertices of V-shaped notches.

Keywords: *fracture mechanics, stress intensity factor, stress concentration factor, V-shaped notch, acute-angled hole.*

Nazarchuk Z. T., Voronyak T. I., and Muravsky L. I. Development of optical-digital methods for control of structural elements surface for needs of technical diagnostics.....53

Optical-digital methods for control of the structural elements surface that have been developed in H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine for technical diagnostics are considered. These methods are based on the principles of phase shifting interferometry (PSI), digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital image correlation (DIC). The advantages of the developed methods of two- and three step PSI with arbitrary phase shifts of a reference wave in comparison with conventional PSI techniques, in particular, their simple technical implementation and high speed, are analyzed. A 3D profilometer for measuring the roughness and waviness parameters is developed on the basis of the three step PSI. The phase shifting DSPI method that allows us to restore the surface displacement field using only two pairs of speckle interferograms is developed. This method is used to solve different tasks of technical diagnostics including detection of hidden holes and defects in metal specimens and welded joints. Due to the proposed optical-digital speckle correlation method, it is possible to determine the displacement fields of the surface near uneven crack edges and other stress concentrators. Using the DIC method, new methodologies

have been developed for definition of stress intensity factor, J -integral, crack propagation direction, plastic zone boundaries under specimen loading. To determine 3D displacement fields, a new 3D DIC method has been elaborated and used to measure the surface deformations of a launch vehicle fuel tank.

Keywords: *phase shifting interferometry, digital speckle pattern interferometry, digital image correlation, surface relief, surface displacement field.*

Andreikiv O. Ye., Skalskyi V. R., and Dolinska I. Ya. Theoretical bases of the acoustic emission method in diagnosing delayed fracture of materials.....64

The results of theoretical investigation of the method of acoustic emission for establishing the limit equilibrium of materials with cracks, their delayed fracture (initiation and propagation of cracks) and, thus, determining the residual life of structural elements of long-term operation are analyzed. At the same time, computational models for determination of crack-like defects, volumetric damage of materials, criteria of their fracture mechanisms, and also acoustic-emission techniques for construction of kinetic diagrams of slow growth of creep cracks are developed.

Keywords: *acoustic emission, quantitative diagnostics of materials state, delayed fracture, calculation model, crack growth.*

Verbovytskyi Yu. V., Oprysk V. V., Shtender V. V., and Zavaliy I. Yu. Hydrogen sorption properties of materials based on alloys and components with a high content of magnesium74

A brief analysis of experimental works on solid gas and electrochemical hydrogenation of the alloys with high magnesium content, in particular, based on R_2Mg_{17} and RMg_{12} is given. Methods for improving the hydrogen sorption properties of magnesium-based composites and the effect of various additions on these properties are analyzed. It is shown that the grinding time and the amount of added catalysts significantly affect the hydrogen sorption and electrochemical properties of the composites. In almost all cases, this influence is positive, and the increase in basic parameters can have a significant percentage.

Keywords: *rare-earth alloys, magnesium alloys, hydrides, electrochemical properties, electrode materials.*

Student M. M. and Pohrelyuk I. M. Modification of aluminum and titanium alloys surface for increasing their wear resistance and tribological characteristics.....84

The main achievements of scientists of the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine in formation of wear resistant coatings and layers on aluminum and titanium alloys are shown. The mechanisms of the action of hydrogen, copper and nickel on the synthesis of oxide-ceramic coatings during plasma electrolyte oxidation (PEO) of aluminum alloys are established. Methods for intensifying the synthesis are proposed, namely: addition of hydrogen peroxide and ozone to the electrolyte (increasing the oxygen content) and increase of the density of the anodic and decreasing cathodic currents, which lead to a decrease in hydrogen ions in the plasma channel. The combination of these methods will increase the thickness of the PEO coating by 80%, and the wear resistance by 4–6 times. The metal oxide composite layers based on corundum with inclusions of copper or nickel are developed. The relationship between the sizes of metal inclusions and the energy of a separate discharge is established, which makes it possible to form nano-sized copper and nickel inclusions. The influence of hydrogen formed during the oil and water decomposition on the tribological behavior of the metal–PEO contact pairs of the coating is established, which makes it possible to reduce the friction coefficient of these tribopairs by 5–20 times. Methods for increasing the wear resistance of high-strength ($\alpha+\beta$)-titanium alloys, in particular,

the BT22 alloy, are developed. It is established that the initial ($\alpha+\beta$)-globular structure of the BT22 alloy is favorable for gas nitriding. An approach to the intensification of gas nitriding, using cold surface plastic deformation, is developed, which makes it possible to reduce the temperature-time parameters of nitriding and combine it with the strengthening heat treatment of the alloy. It is shown that such a combined deformation-diffusion treatment provides high tribotechnical characteristics of the BT22 alloy. It is established that the combination of low-temperature oxynitriding and aging of the BT22 alloy in one technological cycle provides a high fretting resistance of the BT22 alloy in the tribo-pair with the A2024 alloy.

Keywords: *aluminum and titanium alloys, plasma-electrolytic oxidation, oxide-ceramic coatings, metal oxide coatings, surface hardening, nitriding, heat treatment, deformation-diffusion treatment, oxynitriding, hardened layers, wear resistance, fretting resistance.*

Dmytrakh I. M., Syrotyuk A. M., and Leshchak R. L. Effect of preliminary hydrogen charging–discharging of low-alloyed steel on its further ability to absorb electrochemical hydrogen.....95

It is established that the preliminary cyclic hydrogen charging–discharging of ferritic-pearlitic pipeline steel significantly affects its further ability to absorb electrochemical hydrogen and the amount of absorbed hydrogen increases with the increase of such cycles. The concentration of hydrogen adsorbed by the metal sub-surface layers, the concentration of hydrogen absorbed by the metal bulk and its total concentration in the metal are calculated depending on the number of cycles of hydrogen charging–discharging. It is shown that for the considered cases the preliminary hydrogen charging–discharging increases the further ability of steel to absorb hydrogen in 1.2–2 times.

Keywords: *low-alloyed steel; electrochemical hydrogenation; hydrogen charging–discharging of metal; hydrogen concentration.*

Congyuan Jin, Hembara O. V., and Hrynenko M. V. Computer modeling of deformation of structural elements in creep conditions under metal hydrogenation and complex loading.....103

A computational model for estimating the effect of hydrogen on creep deformations in metal under complex stress state is formulated. The stress-strain state of a thin-walled tubular sample under complex loading and creep is determined. The influence of the type of load effect on the time prior to the sample fracture is established. It is shown that the specimens under tension with internal pressure fracture by 30% faster than the specimens under uniaxial tension. The presence of hydrogen reduces the service life of the material by approximately 14% under all types of loading.

Keywords: *hydrogenation, complex stress-strain state, creep, damage, durability.*

Student O. Z., Krechkovska H. V., Svirska L. M., Kindratskyi B. I., and Shyrokov V. V. Ranking of mechanical characteristics of HPP pipeline steels by their sensitivity to operational degradation.....110

The mechanical properties of heat-resistant steels after long-term operation at heat-power facilities are analyzed. It is found that working conditions (high temperature and pressure of a corrosive-hydrogenation environment, thermal and mechanical stresses) negatively affect the structural and mechanical state of steels. The data on the different mechanical characteristics of steels after their operation in various elements (straight sections, bands of pipes, welded joints) of the main steam pipelines of TPPs according to the combined effect of operating factors are summarized. On this basis, all these characteristics are ranked according to their sensitivity to high-temperature hydrogen degradation.

Keywords: *heat-resistant steels, main steam pipeline, welded joints, different zones of the bend, degradation, mechanical characteristics, heat power engineering.*

- Ostash O. P., Chepil R. V., Titov V. A., Palyvoda S. L., Voron M. M.,
and Podhurska V. Ya. Strength and cyclic crack growth resistance
of thermally deformed Al–Mg–Sc alloys..... 118

The microstructure, phase composition, strength and plasticity characteristics and crack growth resistance under cyclic loading of thermodeformed (by extrusion, pressing and rolling) castings of Al–Mg–Sc alloys (type 1570 and 1545) with different magnesium content obtained by magnetohydrodynamic mixing of the melt have been studied. It is established that after rolling the alloy grain size and the amount of grain boundary intermetallics inclusions decrease with the magnesium content decreasing. The mechanical characteristics of both alloys ambiguously depend on the method and temperature of thermomechanical treatment. It is shown that the structural strength parameter, which is comprehensively determined by the strength and fatigue crack growth resistance characteristics, for investigated alloys is higher in comparison with the known Al–Mg–Sc, Al–Mg and Al–Cu–Mg alloys. In this case, its lowest value is recorded for the alloy with a small grain size.

Keywords: *aluminum alloys, extrusion, pressing, rolling, structure, structural strength.*

- Kyryliv V. I., Gurey V. I., Maksymiv O. V., Hurey I. V., and Kulyk Yu. O.
The influence of deformation mode on force conditions of formation
of the surface nanostructure of 40X steel..... 126

The influence of the mode of deformation, caused by different strengthened tools during the formation of surface nanostructure on 40X steel by mechanopulse treatment, on the components of the frictional force in the friction contact zone, structure, physical and mechanical properties is studied. It is shown that implementation of the simple shear mode by a special strengthened tool decreases the grains size, increases the depth and microhardness of the strengthened layer due to the facilitation of initiation and generation of dislocations.

Keywords: *nanostructure, Frank–Read source, components of the friction force, strengthening tool, grains size.*

- Horban V. F., Serdiuk I. V., Chuhai O. M., Voloshyn O. O., Oliinyk S. V.,
Veselivska H. H., Danylenko M. I., Sliusar D. V., Stolbovyi V. A.,
and Kalakhan O. S. Peculiarities of structure and electrophysical characteristics
of nitride coatings made of high-entropy Ti–V–Zr–Nb–Hf alloy..... 132

The composition, morphology, and electrophysical properties of vacuum-arc nitride coatings based on the Ti–V–Zr–Nb–Hf high-entropy alloy have been investigated. Significant changes in the chemical composition of the high-entropy alloy along the samples are established. At the same time, for the studied regions, the deviations of the averaged atomic radius of elements do not exceed 1.5%. It is revealed that the surface morphology of the samples is characterized by three types of inclusions, which differ in chemical composition, size and shape. Some of the inclusions are drops, what is typical of the vacuum arc method of coating application, and the rest are cleavages. It is found that the distributions of the AC resistance and quality factor along the sample are characterized by bursts. The relationship between the surface morphology and the presence of oxidizing layers on it is found.

Keywords: *vacuum-arc nitride coatings, high-entropy alloy, electrical resistance to alternating current, quality factor, surface morphology, oxide layers.*

Fedorenkova L. I. The influence of pretreatment in electrolyte plasma on composition and properties of the boride layer under multicomponent saturation of steel.....137

Experimental studies of a complex multiphase diffusive layer formed on the surface of a pretreated steel in electrolyte plasma and under conditions of chemical-thermal treatment (CTT) in the saturating medium containing boron, molybdenum, and tungsten are carried out. The diffusive layer with structural elements of different hardness is formed on the steel surface as a result of multicomponent saturation. The diffusive layer composition contains microcrystalline inclusions of molybdenum and tungsten borides, as well as iron-based solid solutions, which increase wear resistance of boride coating in 1.5–2 times. It has been established that steel pretreatment in an electrolyte plasma leads to acceleration of diffusion processes during the formation of a multiphase coating in the CTT process, promotes the formation and distribution of microcrystalline inclusions made of refractory compounds to a greater depth, affects the morphology and qualitative characteristics of the surface.

Keywords: *borides, multicomponent, pretreatment, electrolyte plasma, microcrystalline inclusions, microhardness.*