

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, В. Ф. ЧЕКУРИН, 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, V. F. CHEKURIN, 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. Колчак, Г. М. Кулик*

Підписано до друку 28.11.2020. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 021220 від 02.12.2020. Ціна договірна.
Реєстраційне свідоцтво серія КВ № 203 від 10.11.93

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

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,
"ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ", 2020

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

ТОМ 56, № 6, 2020

листопад – грудень

ЗМІСТ

<i>Сміян О. Д., Студент О. З.</i> Фрактографічні ознаки гігациклової втоми та наводнювання тривалоексплуатованих теплопривних сталей.....	5
---	---

Досліджено структуру та розподіл водню в сталі 16ГНМ після її тривалої (~ 28·10⁴ h) експлуатації у корпусі барабанного котла за значної кількості пусків-зупинок (1830), який зруйнувався під час опресовування після ремонту. Встановлено розподіл локального вмісту водню в різних зонах по товщині стінки його корпусу і виявлено, що наводнювання вплинуло на механізм малоциклового утомного руйнування металу. Проте зафіксовано також фрактографічні ознаки гігациклової втоми. Зокрема, руйнування зароджувалось не від поверхні корпусу, а на певній глибині від неї, що узгоджується з розподілом водню в його стінці. Крім того, на зламі виявлено атипові округлі фрагменти, які пов'язали зі сумісним впливом водню і гігациклової втоми через незначні коливання температури і напружень. Їх кількість значно вища, ніж контрольованих зупинок, але узгоджується з незначним відхиленням технологічних параметрів від регламентованих вимог, які, як правило, не фіксують під час експлуатації. Цю особливість необхідно враховувати, оцінюючи ресурс устаткування, експлуатованого за наводнювання металу.

Ключові слова: водень, наводнювання металу, механізм руйнування, осередки руйнування, фрактографічні ознаки гігациклової втоми.

<i>Винар В. А., Василів Х. Б., Рацька Н. Б., Івашиків В. Р., Чучман М. Р., Дацко Б. М.</i> Вплив температури і тиску вуглекислого газу на корозію та корозійно-механічне руйнування трубних сталей у модельній пластовій воді.....	16
--	----

Досліджено вплив температури (20...120°C) на корозію та корозійно-механічне руйнування мартенситних сталей JFE-13CR-80 (I), JFE-13CR-95 (II), JFE-HP1-13CR-110 (III) і JFE-HP2-13CR-110 (IV) у модельній пластовій воді (МПВ) за тиску вуглекислого газу 1 і 6 atm. Встановлено, що швидкість корозії сталей I і II у МПВ за $P_{CO_2} = 6$ atm у 4–40 разів вища залежно від температури, ніж III і IV. Максимальну швидкість корозії сталей I і II спостерігали за температури 60°C: 0,11...0,16 g/(m²·h). Електрохімічні дослідження у МПВ при 20°C і $P_{CO_2} = 1$ atm показали, що сталі III і IV стійкіші до корозії, ніж I і II. За статичних напружень $\sigma = 0,6\sigma_{0,2}$, температури 20°C і $P_{CO_2} = 6$ atm локальної корозії сталей у МПВ не виявлено. За вищих температур на поверхні деформованих сталей I і II з'являють-

ся виразки, які можуть ініціювати розвиток тріщин. За статичних напружень і вищих температур локальної корозії сталей III і IV не виявлено. За повільного розтягування (швидкість 10^{-6} s^{-1}) у МПВ за $P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$ механічні властивості сталей II, III і IV змінюються несуттєво. Виявлено значний вплив корозійного середовища на механічні властивості сталі, що пов'язано з високою концентрацією корозійно-активних неметалічних включень, яка перевищує допустимі межі. Встановлено, що сталі I і II мають менший опір низькоциклічній корозійній втомі. Довговічність сталей III і IV за циклічного напруження $\sigma = \pm 500 \text{ MPa}$ знижується на 8...9%.

Ключові слова: мартенситні трубні сталі, температура, корозія, вуглекислий газ, механічні властивості.

Звірко О. І., Цирульник О. Т., Дзіоба І., Крет Н. В., Лінець С. Вплив особливостей структури сталей обсадних труб на їх механічні властивості та водневу крихкість.....24

Проаналізовано механічні властивості сталей обсадних труб різних категорій міцності. Показано нетипово нижчий опір крихкому руйнуванню сталі меншої міцності, яка мала особливу феритно-перлітну структуру з великими зернами перліту та вузькою облямівкою фериту навколо них. Базові механічні властивості сталей проаналізовано з використанням спеціального підходу, в основі якого лежать істинні діаграми розтягу. Показано, що крихкіша сталь має більше ніж удвічі нижчу істинну пластичність на стадії формування на зразку шийки і цей чинник вважають відповідальним за низький опір крихкому руйнуванню. Сталь меншої міцності з грубодисперсною структурою мала також особливо низький опір водневому розтріскуванню, а також нетипове поєднання нелінійної діаграми навантаження за випроб на тріщиностійкість з макрокрихким характером руйнування.

Ключові слова: обсадна труба, мікроструктура сталей, механічні властивості, істинна діаграма розтягу, опір крихкому руйнуванню, воднева крихкість.

Герцик О. М., Ковбуз М. О., Гула Т. Г., Корній С. А., Єзерська О. А., Пандяк Н. Л. Корозійна тривкість модифікованих аморфних сплавів на основі заліза у сульфатній кислоті.....30

Методами хронопотенціометрії, циклічної вольтамперометрії та електрохімічної імпедансної спектроскопії досліджено корозійну тривкість сплавів на основі Fe у водних розчинах H_2SO_4 різної концентрації. Показано, що зі збільшенням швидкості сканування потенціалу та тривалості контакту з агресивним середовищем потенціали корозії зсуваються в анодну сторону. За результатами електрохімічних досліджень виявлено, що сплави з додатками Cu, Nb, Ni, Cr та Mo корозійнотривкіші, а модифікація змінним магнетним полем підвищує цю тривкість.

Ключові слова: аморфні сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики, сульфатна кислота, змінне магнетне поле.

Zhigang Liu, Чепіль О. Я., Санужак Я. І. Математичне моделювання нагромадження пошкоджень в умовах повзучості та корозійного розтріскування конструкційних матеріалів.....38

Розроблено математичну модель нагромадження пошкоджень за повзучості та корозійного розтріскування конструкційних матеріалів, яку апробовано для визначення показників довговічності прямолінійної ділянки теплообмінних труб парогенераторів атомних електростанцій за складного навантаження. Встановлено вплив товщини труб, тиску в другому контурі і хімічного складу агресивного середовища на ресурс елементів конструкцій.

Ключові слова: корозивне середовище, повзучість, енергія деформування, пошкодження, довговічність.

Скобло Т. С., Ключко О. Ю., Сідашенко О. І., Белкін Й. Л., Автухов А. К., Мальцев Т. В., Дерябкіна Є. С., Колпаченко Н. М. Ознаки деградації карбідних фаз у хромонікелевому чавуні за температур експлуатації прокатних валків.....45

Досліджено причини і ознаки деградації цементиту в хромонікелевому чавуні для виробництва масивних прокатних валків та особливості структуротворення в цементиті за впливу робочих температур і локальних деформацій під час їх експлуатації. Для цього використано високотемпературне вакуумне травлення, щоб виявити дислокації, сканівну електронну мікроскопію та метод оптико-математичного опису фаз та їх неоднорідності. Встановлено, що деградація цементиту пов'язана з формуванням дислокаційної структури і дифузією, які сприяють утворенню нових типів карбідних фаз нестехіометричного складу, квазікристалічного графіту, а також фериту і бейніту. Виявлено можливі комбінації новоутворених фаз, які також впливають на стабільність карбідів. За результатами досліджень сформульовано рекомендації для підвищення стабільності структури цементиту та зниження напружень у валках.

Ключові слова: карбіди, деградація, структурна неоднорідність, дислокація, дифузія, хромонікелевий чавун, стабілізація карбіду.

Коноваленко І. В., Марущак П. О. Класифікація поверхневих технологічних дефектів у металопрокаті за допомогою глибокої нейронної мережі.....52

Розроблено та досліджено автоматизований метод класифікації трьох типів технологічних дефектів металопрокату. Основою методу є класифікатор на базі нейронної мережі ResNet50, який дає змогу розрізняти на зображеннях плоских поверхонь пошкодження трьох класів з точністю 95,8% на тестових даних з незбалансованою кількістю зображень різних видів. Для навчання класифікатора використано ~88 тис. зображень. Показано, що застосування розробленої моделі на базі нейромережі ResNet50 забезпечує відмінні показники продуктивності, високу швидкість і точність, що робить такий класифікатор дієвим інструментом для задач технічної діагностики і неруйнівних методів контролю для класифікації дефектів на поверхнях металопрокату.

Ключові слова: прокат, поверхневі дефекти, розпізнавання, класифікатор, пошкодження.

Бліхарський Я. З., Максименко О. П. Оцінювання міцності і деформативності термозміцненої арматури.....60

Досліджено зміну міцнісних і деформаційних характеристик різних структурних шарів термозміцненої арматури А500С. Побудовано умовні та істинні діаграми руйнування за розтягу циліндричних зразків різного структурного стану, виготовлених з арматурного стрижня. Встановлено зміну механічних характеристик арматурної сталі для різних структурних станів та показано їх особливості під час руйнування. Розраховано істинні напруження руйнування арматурної сталі А500С за істинними деформаціями, визначеними методом цифрової кореляції зображень для різного структурного стану матеріалу арматури.

Ключові слова: термозміцнена арматурна сталь А500С, істинні напруження, істинна деформація, цифрова кореляція зображень.

Усов В. В., Шкатуляк Н. М., Савчук О. С., Рибак Н. І. Вплив виду деформації й текстури на пошкоджуваність та механічні властивості магнісного сплаву ZE10.....65

Досліджено вплив обробки екструзією з подальшим вальцюванням у поєднанні з відпалом та зміною напрямку після кожного проходу (вихідний лист) і знакозмінним вигином (ЗВ) за 0,5; 1; 3 та 5 cycles, а також текстури на параметр пошкоджуваності D , пружні та механічні властивості за одновісних випробувань на розтяг (границю міцності σ_B , умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$ та відносне видовження $\Delta l/l$) сплаву магнію з цинком, цирконієм і рідкісноземельними металами ZE10. Параметри пошкоджуваності визначали зі змін модуля пружності після відповідної кількості циклів ЗВ відносно його значень у різних напрямках вихідного листа та розраховували за моделями еквівалентних деформації і пружної енергії. Встановлено, що усереднені за всіма напрямками в листах сплаву модулі пружності, границі міцності, умовні границі плинності та відносні видовження зменшуються, а відповідні параметри пошкоджуваності, навпаки, збільшуються зі зростанням кількості циклів ЗВ за параболічними законами. Анізотропія вищезазначених характеристик також зменшується під час знакозмінного вигину. Виявлено, що між параметрами текстури Кернса, з одного боку, та модулями пружності, параметрами пошкоджуваності, границею міцності, умовною границею плинності та відносним видовженням існують сильні кореляційні зв'язки. Отримано відповідні квадратичні рівняння регресії з високими значеннями коефіцієнтів надійності апроксимації. Показано, що вищезазначені зміни досліджуваних властивостей обумовлені, здебільшого, зміною кристалографічної текстури.

Ключові слова: екструзія, вальцювання, знакозмінний вигин, текстура, анізотропія, модуль Юнга, параметр пошкоджуваності, кореляція.

Ghazvinloo H. R., Honarbakhsh-Raof A. Числове моделювання зони термічного впливу під час газодугового зварювання металів.....76

Низьковуглецеві сталі St37-2 широко використовують в автомобілебудівній промисловості. Газодугове зварювання металу (ГДЗМ) успішно застосовують для зварювання сталевих елементів через його простоту та дешевизну. Зона термічного впливу (ЗТВ) – це ділянка між зварним з'єднанням та основним металом, де з'єднання може мати найменшу в'язкість і тому цікавить багатьох дослідників. Досліджено вплив параметрів ГДЗМ на ширину ЗТВ. Використано ортогональний масив Тагучі, відношення сигнал/шум (S/N) та дисперсійний аналіз (ANOVA) для аналізу впливу параметрів зварювання на ширину ЗТВ.

Ключові слова: сталь St37-2, газодугове зварювання, зона термічного впливу, аналіз.

Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А.
Сталь для залізничних рейок з поліпшеними експлуатаційними властивостями.....82

Вивчено вплив хімічного складу, гарячої пластичної деформації і термічної обробки на структуру і властивості дослідних сталей, призначених для виготовлення залізничних рейок. Встановлено вплив первинної дендритної структури на їх кінцеву перлітну структуру. Розроблено рекомендації щодо хімічного складу та режимів термічної обробки, які дадуть можливість отримати високі міцність та твердість сталі.

Ключові слова: рейкова сталь, гаряча пластична деформація, термічна обробка, мікроструктура, твердість.

Студент М. М., Погрелюк І. М., Чумало Г. В., Гвоздецький В. М.
Підвищення функціональних характеристик покриттів, отриманих методом твердого анодування алюмінієвих сплавів.....87

Проаналізовано шляхи поліпшення функціональних властивостей покриттів на алюмінієвих сплавах, отриманих методом твердого анодування. Виявлено, що захисні характеристики твердого анодного покриття тісно пов'язані з його пористістю. Під час імпульсного анодування внаслідок ефективного розсіювання (відведення) тепла за низької густини струму діаметр пор, порівняно з процесом за постійного струму, зменшується, тоді як їх кількість залишається незмінною. Це викликає вищу зносотривкість і рівномірніший профіль твердості по товщині покриття. Встановлено, що під час занадто низької густини струму розчинення оксиду домінує над його утворенням. Твердість покриття та зносотривкість погіршуються. Виявлено, що найважливішою властивістю анодного покриття є не твердість, а зносотривкість. Найчастіше як електроліт для анодування алюмінію вживають водний розчин сірчаної кислоти, а також електроліти на основі сірчаної і щавлевої кислот. Під час застосування озono-повітряної суміші для барботажу електроліту за анодування сплавів алюмінію товщина оксидного покриття збільшується на 30%. Зі зростанням концентрації озону мікротвердість покриття зростає, а знос анодованих зразків знижується. Виявлено, що товщину і твердість оксидної плівки можна збільшити, заздалегідь термообробляючи литий алюмінієвий сплав і використовуючи електроліт зі сульфатом алюмінію, який сприяє утворенню більшої кількості дрібних кристалів Al_2O_3 у плівці та підвищенню твердості.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, імпульсне анодування, анодний оксидний шар, електроліт, зносотривкість.

Нестеренков В. М., Мотруніч С. І., Берднікова О. М., Клочков І. М., Половецький Є. В. Підвищення опору втомі з'єднань алюмінієвого сплаву 7056-T351, отриманих електронно-променевим зварюванням.....96

Досліджено зварні з'єднання (ЗЗ) термічно зміцненого алюмінієвого сплаву 7056-T351 з підвищеним вмістом цинку, отримані електронно-променевим зварюванням (ЕПЗ), у вихідному стані та після високочастотного механічного проковування (ВМП). Виявлено, що під час ЕПЗ формується якісне ЗЗ з високими показниками міцності та опору втомі. Встановлено ефективні параметри ВМП та проаналізовано їх вплив на структуру, характер руйнування та мікротвердість металу по глибині від обробленої поверхні. Під час зміцнення з'єднання ВМП подрібнюється зеренна структура, підвищується мікротвердість та змінюється характер руйнування за диспергування елементів мікрорельєфу поверхні зламів.

Ключові слова: високоміцний алюмінієвий сплав, електронно-променеве зварювання, високочастотне механічне проковування, мікроструктура, опір втомі.

Стечишин М. С., Скиба М. Є., Стечишина Н. М., Соларьов О. О., Калнагуз О. М. Фізико-хімічні властивості карбоазотованої сталі ХВГ.....102

Наведено результати досліджень фізико-хімічних властивостей сталі ХВГ залежно від способу і режимів карбоазотування в тліючому розряді. Найоптимальнішим варіантом карбоазотування в тліючому розряді є одночасне насичення поверхні металу азотом і вуглецем. При цьому на поверхні сталі утворюється композиційний шар, який складається із зовнішньої карбонітридної зони (15 μm) із мікротвердістю 7480 МПа і розвинутої дифузійної (55 μm) без виділення на межах зерен ϵ -фази, яка знижує опір абразивному і адгезійному зношуванню, а також корозійній утомі.

Ключові слова: карбоазотування, мікротвердість, структура.

Подгурська В. Я., Василів Б. Д., Остап О. П., Даніленко І. А., Шило А. В., Бурховецький В. В. Вплив відновлювального середовища на структуру і фізико-механічні властивості кераміки системи $ZrO_2-Y_2O_3-Al_2O_3-NiO-CuO$108

Вивчено закономірності зміни мікроструктури, міцності, електропровідності та мікромеханізму руйнування кераміки 50% (ZrO_2 -8 mol% Y_2O_3 -2 wt.% Al_2O_3) + +50% (NiO-5 wt.% CuO) і відповідного кермету після відновлення у високотемпературних (600°C) газових сумішах Ar-5% H_2 і N_2 -10% H_2 -5% CO_2 , призначеного для анодів-підкладок твердооксидних паливних комірок. Встановлено, що досліджуваний кермет має вищу міцність і електропровідність, коли температура прожарювання вихідних порошків знижують з 900°C до 700°C, а температуру їх спікання – з 1450°C до 1400°C. Не виявлено ознак забруднення цього матеріалу сполуками вуглецю і не зафіксовано зниження міцності та електропровідності після його відновлення при 600°C у газовій суміші N_2 -10% H_2 -5% CO_2 порівняно з цим процесом у суміші Ar-5% H_2 .

Ключові слова: кераміка системи ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 -NiO-CuO, воденьвмісне середовище, диоксид вуглецю, структура, міцність, електропровідність.

Мечник В. А., Колодницький В. М., Закієв І. М., Закієв В. І., Ігнатович С. Р., Ісонкін О. М. Вплив порошку CrB_2 на фізико-механічні властивості композитів Fe-Cu-Ni-Sn, спечених вакуумним гарячим пресуванням.....116

Досліджено вплив додатків порошку CrB_2 на механічні (мікротвердість H , модуль пружності E) та трибологічні (зносотривкість) властивості композиційних матеріалів на основі заліза, міді, нікелю і олова, спечених методом холодного пресування з подальшим вакуумним гарячим пресуванням. Дисперсність вихідних порошків 5...50 μm . Встановлено, що зі збільшенням вмісту CrB_2 зростають твердість і модуль пружності. При цьому швидкість зношування за вмісту CrB_2 до 2 mass% зменшується, а далі зростає. Значення опору матеріалу пружній (H/E) і пластичній (H^3/E^2) деформації добре корелюють з рівнем зносотривкості. Обговорено причини зміни фізико-механічних і експлуатаційних характеристик спечених композиційних матеріалів.

Ключові слова: структура, температура, композит, зношування, нанотвердість, модуль пружності, сила тертя.

Кублій В. З., Уткін С. В., Бондар А. А., Ремез М. В. Властивості фаз та сплавів системи Mo-Ni-V в області Ni-MoNi-Mo₂NiB₂-Ni₂V.....125

Для відпалених за субсолідусних температур сплавів системи Mo-Ni-V (а також деяких литих) в області Ni-MoNi-Mo₂NiB₂-Ni₂V вивчено залежність періодів кристалічної ґратки фаз від їх складу та проаналізовано отримані значення мікротвердості фаз за Віккерсом. Встановлено, що для більшості фаз періоди зростають зі збільшенням у них вмісту молібдену. Визначено міцність та пластичність доєвтектичного сплаву 13Mo-81Ni-6V (at.%) на стиск в інтервалі температур від 20 до 700°C. Знайдено, що цей сплав має низьку пластичність, але високу жароміцність до 600°C.

Ключові слова: сплав, система, фазовий склад, період кристалічної ґратки, залежність, мікротвердість, пластичність, міцність.

Масюк А. С., Левицький В. Є., Кисіль Х. В., Катрук Д. С., Білий Л. М., Гуменецький Т. В. Вплив фосфатів кальцію на морфологію та властивості полілактидних композитів.....132

Розроблено полілактидні композиційні матеріали з кальційвмісними наповнювачами, зокрема кальцію орто- і гідроортофосфатом. Виявлено, що ступінь кристалічності наповнених і термооброблених полілактидних матеріалів зростає. За модульно-деформаційним методом визначено їх пружно-пластичні властивості створених полілактидних матеріалів і коефіцієнт їхньої структури. Зафіксовано зміну їх модуля деформації, модуля пружності, поверхневої твердості і термо-механічних характеристик.

Ключові слова: полілактид, кальцію фосфати, композит, поверхнева твердість, кристалічність, теплотривкість.

<i>Перелік статей, опублікованих у журналі “ФХММ” за 2020 р.....</i>	139
<i>Авторський покажчик.....</i>	145

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 56, № 6, 2020

November – December

CONTENTS

- Smiyan O. D. and Student O. Z.* Fractographic signs of gigacycle fatigue
and hydrogenation under long-term operating heat-resistant steels.....5

The structure and hydrogen distribution in 16ГНМ steel after its long-term ($\sim 28 \cdot 10^4$ h) operation in the drum boiler body with a significant number of shut-downs (1830), which was damaged during pressure testing after repair, were analyzed. The distribution of the local hydrogen content in various zones of its wall was established and it was shown that hydrogenation affected the mechanism of fatigue fracture of the metal. Fractographic signs of gigacyclic fatigue were revealed. In particular, the fracture did not initiate from the boiler body surface, but at a certain depth from it, which is consistent with the distribution of hydrogen in its wall. In addition, atypical rounded fragments were revealed at the fracture surface, which were associated with the simultaneous influence of hydrogen and gigacyclic fatigue through insignificant fluctuations in temperature and stresses. Their number significantly exceeds the controlled shut-downs effect but corresponds to the minor deviations of the technological parameters from the regulated requirements, which, as a rule, are not fixed during operation. This feature must be taken into account during resource assessing of the mechanisms operated under conditions of the combined influence of elevated temperatures and metal hydrogenation.

Keywords: *hydrogen, hydrogenation of metal, fracture mechanism, location of fracture initiation, fractographic signs of gigacycle fatigue.*

- Vynar V. A., Vasylyv Ch. B., Ratska N. B., Ivashkiv V. R., Chuchman M. R.,
and Datsko B. M.* The effect of temperature and carbon dioxide pressure
on corrosion and corrosion-mechanical fracture of pipe steels
in model seam water16

The effect of temperature (20...120°C) on corrosion and corrosion-mechanical fracture of martensitic steels JFE-13CR-80 (I), JFE-13CR-95 (II), JFE-HP1-13CR-110 (III) and JFE-HP2-13CR-110 (IV) in the model seam water (MSW) under the CO₂ pressure of 1 and 6 atm is investigated. It has been established that the corrosion rate of I and II steels at $P_{CO_2} = 6$ atm is 4...40 times higher than of the III and IV steels depending on temperature. The highest corrosion rate of I and II steels is observed at 60°C: 0.11...0.16 g/(m²·h). Electrochemical studies at 20°C and $P_{CO_2} = 1$ atm showed that the III and IV steels are more resistant to pitting corrosion than I and II steel. Local corrosion of steels was not found at static stresses $\sigma = 0.6\sigma_{0.2}$ under at $P_{CO_2} = 6$ atm in MSW at a temperature of 20°C. Ulcers appear on the surface of deformed I and II

steels at higher temperatures, which can initiate cracks development. Local corrosion of the III and IV steels was not found at static stresses and higher temperatures. Mechanical properties of steels II, III, IV does not significant change at the slow tensile (velocity 10^{-6} s^{-1}) in the MSW under $P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$. The significant influence of corrosive environment on the mechanical properties of steel is related to the high concentration of corrosion-active non-metallic inclusions, which exceeds the permitted limits. The greatest propensity to low-cyclic corrosion fatigue was found for I and II steels. The life time of III and IV steels is reduced by 8... 9% at cyclic tension $\sigma = \pm 500 \text{ MPa}$.

Keywords: *martensitic pipeline steels, temperature, corrosion, carbon dioxide, mechanical properties.*

Zvirko O. I., Tsyurulnyk O. T., Dzioba I., Kret N. V., and Lipiec S. The influence of structure peculiarities of casing steels on their mechanical properties and hydrogen brittleness.....24

Mechanical properties of casing steels with different strength were analyzed. An atypically lower resistance to brittle fracture of the steel with lower strength, having a special ferrite-perlite structure with large grains of perlite and a narrow borders of ferrite around them, compared to that with higher strength, was shown. The basic mechanical properties of steels were analyzed using a special approach based on the usage of true tensile diagrams. It was shown that the more brittle steel had the true plasticity more than twice lower at the stage of the neck formation on the specimen than the other one and this factor was considered to be responsible for the low resistance to brittle fracture. A coarse-grain steel with lower strength had also a particularly low resistance to hydrogen cracking, as well as atypical combination of a nonlinear loading diagram under crack growth resistance testing with a macro-brittle fracture.

Keywords: *casing, microstructure of steels, mechanical properties, true stress-strain diagram, resistance to brittle fracture, hydrogen embrittlement.*

Hertsyk O. M., Kovbuz M. O., Hula T. H., Korniy S. A., Yezerska O. A., and Pandiak N. L. Corrosion resistance of modified amorphous Fe-based alloys in sulfuric.....30

Corrosion resistance of Fe-based alloys in aqueous solutions with different concentration of H_2SO_4 was studied by the methods of chronopotentiometry, cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy. It was shown that the corrosion potentials were shifted in the anodic direction under increasing scanning potential rate and duration of contact with the aggressive environment. Considering the results of electrochemical research, it was found that the alloys with addition of Cu, Nb, Ni, Cr and Mo were more corrosion resistant, and modification by the alternating magnetic field also caused an increase in the corrosion resistance properties.

Keywords: *amorphous alloys, corrosion resistance, electrochemical properties, sulfuric acid, alternating magnetic field.*

Zhigang Liu, Chepil O. Ya., and Sapuzhak Ya. I. Mathematical modeling of damage accumulation under conditions of creep and corrosion cracking of structural materials.....38

A mathematical model of damage accumulation under creep and corrosion cracking of structural materials was developed. The proposed model was tested to determine the life time of a rectilinear section of the heat exchange tubes of steam generators of nuclear power plants under complex loading. The influence of pipe thickness, pressure in the secondary circuit and chemical composition of the aggressive medium on the life time of structural elements was established.

Keywords: *corrosive environment, creep, deformation energy, damage, durability.*

<i>Skoblo T. S., Klochko O. Yu., Sidashenko O. I., Belkin Ye. L., Avtukhov A. K., Maltsev T. V., Deryabkina Ye. S., and Kolpachenko N. M.</i> The signs of carbide phase degradation in cast irons at temperatures of forming rolls.....	45
--	----

The causes and signs of cementite degradation in chromium-nickel cast iron for the production of massive rolling rolls and the features of structure formation in cementite under the influence of operating temperatures and local deformations in the rolls during their operation are investigated. The high-temperature vacuum etching to detect dislocations, scanning electron microscopy and an optical-mathematical description of the phases and their heterogeneity were used during studies. It is shown that the degradation of cementite is associated with the formation of a dislocation structure and diffusion, which contribute to the formation of new types of carbide phases of the non-stoichiometric composition, quasicrystalline graphite, as well as ferrite and bainite. Possible combinations of newly formed phases have been identified that also affect the stability of carbides. Based on studies of the degradation of cementite, as a component of the structure that determines the hardness of cast iron during operation, recommendations are made to increase the stability of its structure and reduce the level of stresses in the rolls.

Keywords: *carbides, degradation, structural heterogeneity, dislocation, diffusion, chromium-nickel cast iron, carbide stabilization.*

<i>Konovalenko I. V. and Maruschak P. O.</i> Classification of surface technological defects of metal roll in metal-roll by means of deep neuron network.....	52
---	----

An automated method for detecting and classifying three types of rolled metal defects has been developed and investigated. The method is based on the ResNet50 neural network classifier, which allows three classes of damage to be recognized on images of flat surfaces with a total accuracy of 95.8%, calculated on the basis of analysis of test data with an unbalanced number of images of various types. 88 thousand images were used to train the classifier. It is shown that the use of the developed model based on the ResNet50 neural network provides high recognition quality, high speed and accuracy, which makes this classifier an effective tool for identifying and classifying defects on metal surfaces.

Keywords: *rolling strip, surface defects, recognition, classifier, damage.*

<i>Blikharskyi Ya. Z. and Maksymenko O. P.</i> Assessment of strength and deformation of heat-strengthened reinforcement.....	60
---	----

The strength characteristics of different structural layers of heat-strengthened rebar steel A500C are studied. The analysis of the true fracture diagrams are received in experiments for specimens with different diameters, which contain a combination of different structural layers of the investigated rebar steel showed a change in their strength by 25% and deformability by 34%. The coefficient of transverse narrowing is calculated in the neck area, that varied depending on the diameter of the specimen from 0,3 for a solid rebar to 0,48 for grinded rebar with a diameter of 10 mm, which does not contain heat-strengthened and transition layers.

Keyword: *heat-strengthened rebar steel A500C, true deformation, true stress, digital image correlation.*

<i>Usov V. V., Shkatulyak N. M., Savchuk O. S., and Rybak N. I.</i> The effect of the type of deformation and texture on the damageability and mechanical properties of magnesium ZE10 alloy.....	65
---	----

The effect of extrusion with subsequent rolling in combination with annealing and a change in rolling direction after each pass (original sheet) and reversible bending (RB)

in the amount of 0.5; 1, 3 and 5 cycles, as well as texture on the elastic properties, damage parameter D , tensile strength σ_B , yield strength $\sigma_{0.2}$ and relative elongation $\Delta l/l$ of the magnesium alloy with zinc, zirconium and ZE10 rare earth metals were investigated. Damage parameters that characterized damage accumulation were determined by the change in the elastic modulus after the corresponding number of the RB cycles relative to its values in different directions of the investigated alloy original sheet. Damage parameters were calculated using the models of equivalent deformation and equivalent elastic energy. It was established that the values of the elastic modulus, tensile strength, conditional yield strength, and relative elongation averaged over all directions in the alloy sheets decreased, and the corresponding values of damage parameters, on the contrary, increased with increase in the number of RB cycles according to parabolic laws, as shown by correlation and regression analysis. The anisotropy of the above characteristics also decreased under reverse bending. It was found that there were strong correlation relationships between the Kearns texture parameters, on the one hand, and the elastic modulus, damage parameters, tensile strength, conditional yield strength, and elongation, on the other. The corresponding quad-ratic regression equations with high values of the approximation reliability coefficients were obtained. Thus, it was shown that the aforementioned changes in the studied properties with a change in the number of the RB cycles were caused mainly by the crystallographic texture change.

Keywords: *extrusion, rolling, reverses bending, texture, anisotropy, Young's modulus, damage parameter, correlation.*

Ghazvinloo H. R. and Honarbakhsh-Raof A. The numerical modeling of heat-affected zone in GMAW process.....76

Low-carbon steel St37-2 is widely used in the bus production industry. The gas metal arc welding (GMAW) is strongly applied to join steel components due to its ease and low cost. Heat-affected zone (HAZ) is the area between the weld and base metal where can have the lowest toughness in a welding joint and hence it has always been a matter of interest for many researchers. This work aims to study the effects of GMAW parameters on HAZ width. The Taguchi orthogonal array, signal-to-noise (S/N) ratios, and analysis of variance (ANOVA) are employed to investigate and analyze the effect of the welding parameters on the HAZ width.

Keywords: *St37-2 steel, gas metal arc welding, heat-affected zone, analysis.*

Babachenko O. I., Kononenko G. A., Podolskyi R. V., and Safronova O. A. Steel for railway rails with improved performance properties.....82

The influence of chemical composition, hot plastic deformation and heat treatment on the structure and properties of experimental steels intended for the manufacture of railway rails has been studied. The influence of the primary dendritic structure on their final pearlitic structure is established. Recommendations for chemical composition and heat treatment regimes have been developed, which allow us to obtain high strength and hardness of steel.

Keywords: *rail steel, hot plastic deformation, heat treatment, microstructure, hardness.*

Student M. M., Pohrelyuk I. M., Chumalo H. V., and Hvozdet'skyi V. M. Improvement of the functional characteristics of the coatings obtained by the method of hard anodizing of aluminum.....87

Ways to improve the functional properties of coatings on aluminum alloys obtained by hard anodizing are considered. It is shown that the protective properties of the hard anode coating are closely related to its porosity. Under pulse anodizing caused by the effective heat dissipation (removal) at low current density, the pore diameter decreases compared to the process at DC, though their number remains the same. This causes a higher wear resistance and a more uniform hardness profile over the thickness of the

coating. It is established that at very low current the oxide dissolution prevails over its formation. Hardness and wear-resistance deteriorate. It is shown that the most important mechanical property of a hard anode coating is not hardness but wear resistance. The most common electrolyte for aluminum anodizing is aqueous solution of sulfuric acid. The use of electrolytes based on sulfuric and oxalic acids is becoming more common. Various additives to electrolytes are used to reduce the dissolution of oxides: glycolic acid and glycerin, sulfates. The use of ozone-air mixture for bubbling electrolyte in the anodizing of aluminum alloys increases the oxide coating thickness by 30%. With increasing concentration of ozone, the microhardness of the coating increases, and the anodized samples wear decreases. It is found that the thickness and hardness of the oxide film can be increased by preliminary heat treatment of the cast aluminum alloy and the use of electrolyte with aluminum sulfate, which promotes the formation of small crystals of Al_2O_3 in the film and also increases hardness.

Keywords: *aluminum alloy, pulse anodizing, anode oxide layer, electrolyte, wear resistance.*

Nesterenkov V. M., Motrunich S. I., Berdnikova O. M., Klochkov I. M., and Polovetskyi Ye. V. Fatigue life improvement of the electron beam welds made from aluminum 7056-T351 alloy.....96

Welded joints of heat-strengthened 7056-T351 aluminum alloy with high zinc content obtained by electron beam welding (EBW) in as-welded state and after high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment are studied. It is shown that EBW forms a sound welded joint with high characteristics of strength and fatigue resistance. The effective parameters of HFMI are determined and their influence on the microstructure, fracture behavior and microhardness of metal is analyzed. The HFMI treatment of EBW joints, gives fine grain structure, increase of microhardness, and changes the fracture behavior due to dispersion of microrelief elements at the fracture surface.

Keywords: *high-strength aluminum alloys, electron beam welding, high-frequency mechanical sliding, microstructure, fatigue resistance.*

Stechyshyn M. S., Skyba M. Ye., Stechyshyna N. M., Solariov O. O., and Kalnaguz O. M. Physicochemical properties of carbonitrided XBF steel.....102

The results of researches of physicochemical properties of XBF steel depending on a way and modes of carbon nitriding in a glow discharge are presented. The best option for carbon nitriding in the glow discharge is the simultaneous saturation of the metal surface with nitrogen and carbon. A composite layer is formed on the steel surface, which consists of an outer carbonitride zone (15 μm) with a microhardness of 7480 MPa and a developed diffusion (55 μm) without separation of the ϵ -phase at the grain boundaries, which reduces the resistance to abrasive and adhesive wear, and also corrosion fatigue.

Keywords: *carbonitriding, microhardness, structure.*

Podhurska V. Ya., Vasylyv B. D., Ostash O. P., Danilenko I. A., Shylo A. V., and Burkhovetski V. V. The influence of the reducing environment on the structure and physicomechanical properties of ceramics of the ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 - NiO - CuO108

The regularities of changes in microstructure, strength and electrical conductivity, and also fracture micromechanism of 50% (ZrO_2 -8 mol% Y_2O_3 -2 wt.% Al_2O_3) + 50% (NiO -5 wt.% CuO) ceramics and the corresponding cermet after reduction in high-temperature (600°C) gas mixtures Ar-5% H_2 and N_2 -10% H_2 -5% CO_2 , intended for anodes-substrates of solid oxide fuel cells, have been studied. It is found that the investigated cermet has higher strength and electrical conductivity when the calcination temperature of the source powders is reduced from 900°C to 700°C, and their sintering

temperature is reduced from 1450°C to 1400°C. No signs of contamination of this material with carbon compounds, and no decrease in strength and electrical conductivity after its reduction at 600°C in N₂-10% H₂-5% CO₂ gas mixture are revealed as compared to the material reduced in Ar-5% H₂ mixture.

Keywords: *ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃-NiO-CuO ceramics, hydrogenous environment, carbon dioxide, structure, strength, electrical conductivity.*

- Mechnik V. A., Kolodnitskyi V. M., Zakiev I. M., Zakiev V. I., Ignatovich S. R., and Isonkin A. M.* The CrB₂ powder influence on physicomechanical properties of Fe-Cu-Ni-Sn composites sintered by vacuum hot pressing.....116

The effect of CrB₂ powder additives on the mechanical (microhardness H , modulus of elasticity E) and tribological (wear resistance) properties of composite materials based on iron, copper, nickel and tin sintered by cold pressing and subsequent vacuum hot pressing was studied. Initial powders had a dispersion of 5...50 μm. It was shown that increase in the CrB₂ amount led to increase in hardness and elastic modulus. The wear rate decreased with an increase of CrB₂ amount up to 2 mass% and then increased. The values of material resistance to elastic fracture deformation (H/E) and resistance of material to plastic deformation (H^3/E^2) well correlated with the values of the wear resistance. The reasons of physicomechanical and operational properties changes of sintered composite materials were discussed.

Keywords: *structure, temperature, wear, nanohardness, modulus of elasticity, friction force.*

- Kublii V. Z., Utkin S. V., Bondar A. A., and Remez M. V.* Properties of Mo-Ni-B phases and alloys in the Ni-MoNi-Mo₂NiB₂-Ni₂B region.....125

Composition dependences of crystal structure parameters for phases of the Mo-Ni-B system in the region Ni-MoNi-Mo₂NiB₂-Ni₂B for samples annealed at subsolidus temperatures, as well some as-cast alloys were studied, and obtained values of Vickers microhardness were analyzed. As shown for the majority of phases, the lattice parameters increase with rise in the Mo content in them. Compression strength and ductility of the hypoeutectic 13Mo-81Ni-6B (at.%) alloy were examined in the temperature interval from 20 to 700°C. As found this alloy possesses low plasticity but high heat-resistance up to 600°C.

Keywords: *alloy, system, phase composition, lattice parameters, dependence, microhardness, plasticity, strength.*

- Masyuk A. S., Levytskyi V. E., Kysil Kh. V., Katruk D. S., Bilyi L. M., and Humenetskyi T. V.* The influence of calcium phosphates on morphology and properties of polylactide composites.....132

Polylactide composite materials with calcium-containing fillers, in particular calcium orthophosphate and calcium hydroorthophosphate, are developed. An increase in the degree of crystallinity of filled and heat-treated polylactide materials is noted. Based on the modular-deformation method of calculation, the elastic-plastic properties of the developed polylactide materials and the structure coefficient are determined. The change of their modulus of deformation, the modulus of elasticity, surface hardness and thermomechanical characteristics of polylactide composites is revealed.

Keywords: *polylactide, calcium phosphates, composite, surface hardness, crystallinity, heat resistance.*

- List of papers published in "Physicochemical Mechanics of Materials" in 2020.....139*
Authors' index.....145