

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)

Відповідальні за випуск: чл.-кор., проф. В. І. Похмурський, чл.-кор., проф. М. С. Хома
Responsibles for issue: Corr.-member, Prof. V. I. Pokhmurskii,
Corr.-member, Prof. M. S. Khoma

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. Слейко**

Технічний редактор **І. В. Калинюк**

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

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

Підписано до друку 02.11.2020. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 051120 від 05.11.2020. 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, № 5, 2020

вересень – жовтень

ЗМІСТ

<i>Назарчук З. Т.</i> , Г. В. Карпенко і фізико-хімічна механіка матеріалів.....	5
<i>Звірко О. І., Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М., Кречковська Г. В.</i> Методи оцінювання корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів.....	7

Проаналізовано механічні, структурно-фрактографічні та електрохімічні методи оцінювання експлуатаційної деградації трубних сталей з урахуванням корозійно-водневого впливу агресивних середовищ. Механічні методи застосовують насамперед для визначення опору крихкому руйнуванню, однак під час оцінювання вальцьованих сталей слід враховувати їх можливе мікророзшарування в осьовому напрямі. Попереднє наводнювання посилює чутливість механічних методів через підвищення схильності деградованих сталей до водневого розтріскування. Зі структурних чинників виділено особливу роль текстури вальцювання, а з фрактографічних – частки низькоенергоємного руйнування типу відшарування та крізьзеренного відколу. Мікрофрактографічним аналізом встановлено внесок наводнювання у розвиток мікропошкодженості сталі. Електрохімічні методи дають можливість прогнозувати опір крихкому руйнуванню сталей за зміною поляризаційного опору та потенціалу поверхні руйнування, а також оцінити ступінь розсіяної пошкодженості та схильність до водневого розтріскування.

Ключові слова: *сталь, експлуатаційна деградація, мікроструктура, механічні властивості, мікрофрактографія, електрохімія, водневе розтріскування.*

<i>Похмурський В. І., Хома М. С., Чучман М. Р., Дацко Б. М.</i> Корозія та наводнювання сталі 17Г1С-У у сірководневих середовищах різної концентрації.....	15
--	----

Досліджено корозію, наводнювання та механічні властивості сталі 17Г1С-У у хлоридно-ацетатних розчинах з концентрацією сірководню 25, 100, 500 та 1500 mg/dm³. За $C_{H_2S} = 25$ та 100 mg/dm³ сталь впродовж 720 h кородує з середньою швидкістю ~ 0,5 g/(m²·h). У цих розчинах границі плинності та міцності змінюються несуттєво, а відносне звуження в ~ 6 та 10 разів, відповідно. За напружень $0,8\sigma_{0.2}$ у розчині з $C_{H_2S} = 100$ mg/dm³ розтріскування сталі не відбувається. Показано, що сталь за $C_{H_2S} \geq 500$ mg/dm³ кородує з утворенням поверхневих ініційованих воднем тріщин і наводнювання є більшим майже у два рази, ніж за менших концентрацій. Це є передумовою розвитку сірководневого корозійного розтріскування. Статичні та аси-

метричні навантаження на рівні порогових значень у розчині NACE збільшують наводнювання сталі у розчинах з $C_{H_2S} = 100 \dots 1500 \text{ mg/dm}^3$, яке стає практично однаковим $C_{H_2S} = 12,5 \dots 14,8 \text{ ppm}$. Враховуючи різну тенденцію в розвитку корозії сталі в розчині $C_{H_2S} = 100$ та 1500 mg/dm^3 , зроблено висновок, що на руйнування сталі в цих середовищах впливає не лише ступінь наводнювання металу, але й природа сформованих на поверхні сульфідів і їх захисні властивості.

Ключові слова: сірководень, корозія, наводнювання, напруження, механічні властивості, сірководневе корозійне розтріскування.

Корній С. А., Зінь І. М., Тимусь М. Б., Хлопик О. П., Даниляк М.-О. М.

Корозійний захист вуглецевої сталі композицією на основі природного полісахариду.....23

Встановлено, що ксантанова камедь інгібує корозію вуглецевої сталі в хлоридовмісному середовищі шляхом адсорбційного механізму. Калію натрію тартрат підвищує її захисну ефективність. Результати електрохімічної імпедансної спектроскопії свідчать про утворення захисного бар'єрного шару на сталі в середовищі, інгібованому камеддю з тартратом. Найбільше досліджуваній інгібіторній системі відповідає ізотерма адсорбції Ленгмюра. Ступінь захисту вуглецевої сталі інгібіторною композицією на основі камеді та тартрату перевищує 90%. Зростання тривкості до корозії металу в інгібованому композицією середовищі підтверджують результати оптичної мікроскопії.

Ключові слова: корозія, сталь, хлоридний розчин, ксантанова камедь, калію натрію тартрат, електрохімічна імпедансна спектроскопія, ступінь захисту.

Слободян З. В., Маглатюк Л. А., Купович Р. Б., Пацай І. О. Корозійна поведінка сталі 20, міді, латуні та алюмінію в інгібованих

кислотних розчинах.....28

Показано можливість використання екобезпечних речовин як інгібіторів корозії сталі 20, міді, латуні та алюмінію в 5% розчинах хлоридної та лимонної кислот, а саме: ксантанову камедь, уротропін, екстракт дубової стружки та технічний гліцерин. На основі екстракту дубової стружки, технічного гліцерину та уротропіну створена композиція з вираженим синергічним ефектом, яка за концентрації 2 г/л сповільнює швидкість корозії сталі 20 у 12 разів. Ця композиція достатньо ефективна і для міді, латуні та алюмінію не лише у 5% HCl, але і у 5% лимонній кислоті. Механізм захисної дії композиції адсорбційний з гальмуванням обох електродних реакцій.

Ключові слова: екобезпечні інгібітори, екстракт дубової стружки, технічний гліцерин, уротропін, ксантанова камедь, поляризаційна крива, швидкість корозії, компромісний потенціал, струм корозії.

Погрелюк І. М., Саввакін Д. Г., Мельник Х. Р., Стасюк О. О., Овчинников О. В., Ткаченко С. М., Осипенко О. О. Корозійна тривкість

у водних розчинах хлоридної кислоти титану VT1-0 та сплаву VT6, отриманих методом порошкової металургії.....33

Оцінено корозійну тривкість титану VT1-0 та сплаву VT6 (Ti-6Al-4V) зі залишковою поруватістю 1, 3 та 4%, отриманих холодним пресуванням та спіканням порошку гідриду титану у вакуумі, у 10-, 20- та 30%-их водних розчинах хлоридної кислоти. Одержані результати порівняно з даними про корозійну тривкість матеріалів, виготовлених за традиційною технологією. Виявлено, що титан та сплав, отримані за порошковою металургією, розчиняються швидше в концентрованих розчинах хлоридної кислоти, ніж традиційні. Інтенсивність корозійного розчинення зростає зі збільшенням залишкової поруватості спечених матеріалів та концентрації хлоридної кислоти. Корозійні характеристики титану та сплаву зі залишковою поруватістю 1 та 3%, незалежно від технології виготовлення, суттєво не відрізняються, хо-

ча тривкість до корозії сплаву дещо підвищується. Корозійна тривкість спеченого сплаву VT6 (Ti–6Al–4V) з 4% залишкової поруватості вдвічі вища, ніж титану.

Ключові слова: порошкова металургія, титан, сплав Ti–6Al–4V, залишкова поруватість, швидкість корозії, хлоридна кислота.

Похмурська Г. В., Студент М. М., Веселівська Г. Г., Задорожна Х. Р.,
Гвоздецький В. М., Юськів В. М. Корозійно-електрохімічна поведінка
у нейтральних водних розчинах лазерно модифікованого карбідами
SiC алюмінієвого сплаву 707540

Встановлено вплив структури поверхневих шарів алюмінієвого сплаву, одержаних лазерним модифікуванням часточками SiC, на їх корозійно-електрохімічну поведінку в нейтральних водних середовищах. Для лазерного модифікування поверхні сплаву 7075 застосовано порошок SiC дисперсністю 80 μm , твердістю 2600 HV і температурою плавлення 2760°C. Порошок SiC вдували у поверхневий шар зразків, оплавлених лазером струменем аргону. Для збільшення глибини проникнення твердих часточок у поверхневі шари сплаву підкладку підігрівали до 100 та 250°C безпосередньо перед лазерним модифікуванням. Металографічним аналізом прокородованої поверхні встановлено, що на відміну від немодифікованого сплаву, в якому під впливом корозивного середовища розчиняються ділянки, збагачені MgZn₂ (гальванопара Al/MgZn₂), модифікування сплаву частинками SiC гальмує цей процес, уповільнюючи корозію, а розмір та глибина локальних дефектів суттєво зменшуються. Після модифікації очевидно виникає інша гальванопара Al/Al₄SiC₄ і корозійне руйнування відбувається локалізовано з утворенням пітингів у місцях, де є включення Al₄SiC₄. Потенціодинамічними дослідженнями встановлено, що підігрів підкладки до 250°C менш ефективний, ніж до 100°C, внаслідок більшого об'ємного вмісту включень Al₄SiC₄, які є причиною корозійного руйнування модифікованого шару. Виявлено, що незважаючи на те, що модифікований шар гетерогенний, його корозійна тривкість зростає в 2–6 разів залежно від середовища.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, лазерно модифіковані шари, карбід кремнію, корозійна тривкість.

Кітик А. А., Проценко В. С., Данилов Ф. Й., Павлік В., Боча М. Вплив
електрополірування металів і сплавів у низькотемпературному
евтектичному розчиннику на їх корозійні характеристики.....47

Продемонстровано, що електрохімічну анодну обробку сплавів (нержавної сталі, Al–Mg сплаву і бронз) в Ethaline (евтектичній суміші холін хлориду і етиленгліколю) можна використовувати як ефективний метод поліпшення не тільки зовнішнього вигляду (збільшення ступеня блиску і зменшення шорсткості поверхні) і деяких фізико-механічних показників (збільшення мікротвердості, зносостійкості тощо), але й корозійної стійкості. Аналіз сканівного електронного мікроскопа показав, що електропілірування в Ethaline приводить до помітного зменшення кількості дефектів (неоднорідностей, подряпин, дірок тощо) на поверхні сплавів. Доведено, що згладжування поверхні і зміна елементного складу поверхневого шару (за результатами EDX аналізу) для усіх протестованих сплавів після електрополірування в Ethaline викликають помітне зменшення швидкості корозії зразків. Таким чином, цей швидкий, доступний, ресурсозберігаючий та екологічно безпечний метод обробки поверхні може стати перспективною альтернативою найпоширенішим технологіям електрополірування, що базуються на використанні висококонцентрованих розчинів кислот та високих температур.

Ключові слова: електрополірування, низькотемпературні евтектичні розчинники, нержавна сталь, бронза, сплав алюмінію, корозійна стійкість.

Ненастіна Т. О., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Проскуріна В. О., Зюбанова С. І.

Корозійна тривкість композитних покриттів на основі сплавів кобальту з тугоплавкими металами.....52

Вивчено корозійну поведінку електролітичних композиційних покриттів на основі потрійних сплавів кобальту в різних умовах. Проаналізовано розподіл металів за товщиною покриттів та показники шорсткості поверхні. Виявлено, що в лужних і нейтральних середовищах потенціали корозії зміщуються в негативному напрямку проти вимірюваних у кислому середовищі, а тривкість до корозії суттєво не змінюється. Це можна пояснити тим, що оксиди вольфраму та молібдену, що утворюються на поверхні, нестійкі в лужному середовищі. Враховуючи те, що в нейтральному розчині приповерхневий шар внаслідок відновлення кисню залужується, а хлориди провокують локальне руйнування захисної плівки, можна констатувати, що легувальні метали синергетично впливають на швидкість корозії композитів. За розрахованими значеннями показника глибини швидкості корозії розглянуті покриття можна віднести до групи вельми тривких, а композит на основі сплаву $\text{Co}_{64}\text{Mo}_{33}\text{Zr}_3$ у нейтральному та лужному середовищах – до дуже тривких матеріалів, що відкриває перспективи для їх подальшого використання для захисту в агресивних середовищах.

Ключові слова: композитне покриття, кобальтові сплави, потенціал корозії, глибинний показник швидкості корозії.

Ниркова Л. І., Осадчук С. О., Коваленко С. Ю., Клименко А. В., Лабур Т. М.

Вплив термооброблення на корозійну тривкість зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи Al–Mg–Si–Cu.....59

Наведено результати комплексних досліджень впливу повного циклу термічного оброблення (ТО) (гартування та штучне старіння) на корозію та корозійно-механічну тривкість зварного з'єднання алюмінієвого сплаву системи легування Al–Mg–Si–Cu товщиною 1,2 mm. Зварні з'єднання отримані неплавким електродом вільною дугою в середовищі захисного газу аргону. За результатами електрохімічних досліджень встановлено, що ТО сприяє зниженню електрохімічної гетерогенності між основним металом та зварним швом, що призводить до зменшення різниці потенціалів від 18 до 9 mV та анодного струму розчинення. Крім того, ТО не погіршує стійкість до розшаровуючої корозії цього зварного з'єднання, яку оцінюють за балами (2–3) у вихідному стані та 1 після ТО. Ознака розшаровуючої корозії – потемніння поверхні та утворення локальних відшарувань діаметром $\leq 1,5$ mm, площа яких на кожній поверхні не перевищує 1%. Для основного металу спостерігали незначне погіршення стійкості до міжкристалітної корозії (збільшення глибини руйнування меж зерен від 0,84 до 0,209 mm), але середня глибина міжзеренного руйнування зварного з'єднання знизилася несуттєво з 0,3 до 0,25 mm. Загалом глибина міжкристалітної корозії після ТО не перевищувала допустимого значення (0,35 mm). Вплив ТО на тривкість до корозійно-механічного розтріскування за сталого навантаження за повного занурення в 3%-ий розчин NaCl неоднозначний: для основного металу спостерігали незначне зменшення часу руйнування в середньому від 73 до 66 h, для зварних з'єднань – збільшення приблизно до 35% (від 20 до 33 h). Це підтверджує зменшення гетерогенності зварного з'єднання в цілому. Показано, що зварні вироби після повного циклу термічного оброблення характеризуються стійкістю до міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування.

Ключові слова: алюмінієвий сплав B-1341T системи Al–Mg–Si–Cu, зварне з'єднання, корозійна тривкість, міжкристалітна корозія, розшаровуюча корозія, корозійно-механічні випроби.

Японцева Ю. С., Мальцева Т. В., Кублановський В. С. Корозійні властивості

електролітичних покриттів на основі сплавів CoW, CoRe та CoWRe.....66

Встановлено хімічний склад, вихід за струмом та корозійні властивості бінарних CoW, CoRe та тернарних CoWRe сплавів, отриманих з двох типів електролітів: цитратного та цитратно-пірофосфатного. Виявлено, що сплави, осаджені з цитратного

електроліту, містять значно більше тугоплавких металів (51,0 at.% Re та 46,2 W + Re) за тієї самої густини струму осадження ($10 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$), ніж з цитратно-пірофосфатного (13,5 Re та 23,9 at.% W + Re). Основна перевага використання цитратно-пірофосфатного електроліту – високий вихід за струмом (до 85,7%). Дослідженнями корозії в 3,5%-му розчині NaCl встановлено, що корозійна тривкість сплавів CoWRe вища, ніж CoRe, і становить 3,2 і 2,8 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ для цитратного електроліту та 5,4 і 3,6 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ – для цитратно-пірофосфатного. Вона пов'язана з фазовим складом покриттів, зокрема, з утворенням твердого розчину ренію у кобальті для сплаву CoRe та нанокристалічного покриття для сплаву CoWRe.

Ключові слова: корозія, кобальт, вольфрам, реній, електроосадження, сплав.

Васильєв Г. С., Герасименко Ю. С. Підвищення ефективності роботи пластинчатих теплообмінників за використання ультразвукової вібрації.....71

Досліджено вплив ультразвукової вібрації на локальну корозію та осадження карбонатних осадів на поверхні сталі AISI 304 за теплообміну. Показано, що за ультразвукової вібрації з частотою 27 kHz і потужністю 9 W вдається зсунути потенціал активації на 0,22 V в анодний бік до 0,42 V/SCIE. Запропоновано механізм репасивації пітингів під дією ультразвукової вібрації, що полягає у вилученні продуктів корозії над зонами пітингу через погіршення їх адгезії до віброуючої поверхні. Встановлено, що прикладання ультразвукової вібрації до поверхні із шаром карбонатного осаду дає змогу підвищити коефіцієнт теплопередачі у 3,8 рази, а за ультразвуку потужністю 190 W вдається попередити осадження накипу на чистій поверхні теплообміну.

Ключові слова: нержавна сталь, пітингова корозія, ультразвук, пластинчатий теплообмінник.

Корольов В. П., Гібаленко О. М., Корольов П. В. Методи управління корозійною захищеністю сталевих конструкцій промислових об'єктів.....77

Проаналізовано інноваційні аспекти формування і розвитку корозійної захищеності. Запропоновано ризик-орієнтований підхід до подолання невизначеності параметрів корозійної захищеності конструкцій і споруд згідно з вимогами розгортання функції якості *QFD*. Встановлено номенклатуру, показники і методи *off-line* та *on-line* контролю (оцінки відповідності) визначальних параметрів корозійного стану конструкцій та їх захисних покриттів. Доведено, що процедура прийняття і контролю збалансованих рішень протикорозійного захисту сприяє переходу від витратного до інноваційного управління ресурсозбереженням і технологічною безпекою промислових об'єктів.

Ключові слова: корозійна небезпека, визначальні параметри корозійного стану, корозійна захищеність, оцінювання відповідності, граничні стани, інноваційний потенціал, ризик-орієнтований підхід, збалансовані показники, ресурсозбереження, промислові об'єкти.

Зозуля Г. І., Кунтий О. І., Мерцало І. П., Мазур А. С. Одержання поруватого біметалу Cu/Ag гальванічним заміщенням знецинкованої латуні83

Досліджено одержання біметалу Cu/Ag-нано для відновлення CO_2 на каталітично активному катоді за схемою: формування поруватої міді анодним знецинкуванням сплаву Cu-Zn у розчині H_2SO_4 ; осадження наноструктур срібла гальванічним заміщенням. Показано, що на поверхні нанопоруватої міді у 0,01 M AgNO_3 у полі ультразвуку осаджуються нанорозмірні дендритні формування (70...100 nm). Встановлено, що основним чинником впливу на морфологію відновленого срібла на поруватій міді є тривалість гальванічного заміщення. Показано, що електроди з поруватою поверхнею Cu/Ag-нано характеризуються суттєво вищою каталітичною активністю порівняно з латунною фольгою та поруватою міддю.

Ключові слова: анодне знецинкування латуні, нанопорувата мідь, гальванічне заміщення, наноструктуроване срібло.

<i>Лопачак М. М., Хруцик Х. І., Дністрян В. В., Бойчишин Л. М., Решетняк О. В.</i> Корозійна тривкість аморфних металевих сплавів $\text{Co}_{77}\text{Si}_{11}\text{B}_{12}$ для електродів виділення водню з лужних розчинів.....	88
---	----

Корозійну тривкість аморфного сплаву (АМС) на основі кобальту досліджено методом циклічної вольтамперометрії (ВА) у водному середовищі 1 М КОН за різних температур – від 293 до 333 К. Встановлено, що внаслідок п'ятикратної циклічної поляризації електродів у межах $-1,5...+0,5$ V потенціал корозії зміщується в катодний бік, а в розчинах з температурою 313...333 К набуває майже однакових значень. Густина корозійного струму АМС збільшується у вісім разів із підвищенням температури розчину до 313 К. Корозійна тривкість АМС, що використовують у реакції виділення водню, зростає, на що вказують значення густини струму, які вдвічі нижчі, ніж у вихідних сплавів. Розрахована енергія активації корозії становить 18,65 та 17,86 kJ/mol для першого та п'ятого циклів на ВА-кривій, що вказує на дифузійну взаємодію гідроксильних йонів з поверхнею електрода АМС. Обчислено енергію активації утворення сполук на поверхні АМС. Встановлено, що хемосорбований комплекс $[\text{Co} - \text{O} - \text{H}_2\text{O}]_{\text{ads}}$ формується із вдвічі більшою енергією активації, ніж пасиваційні шари.

Ключові слова: аморфні металеві сплави, корозія, енергія активації, пасивація поверхні.

<i>Ледовських В. М., Вишневська Ю. П., Бражник І. В., Левченко С. В.</i> Механізм спільної дії окиснювальних та сольових пасиваторів у бінарних інгібувальних сумішах.....	93
--	----

Досліджено закономірності спільної дії додатків, які характеризуються різним механізмом інгібувальної дії, для захисту сталі у водно-сольових середовищах. Вивчено 14 інгібіторних сумішей за різних співвідношень концентрацій. Отримані результати захисної ефективності та спричинених морфологічних і структурних змін поверхні металу інтерпретовано з точки зору взаємодії окремих інгібувальних чинників. Розглянуто різні види їх взаємодії, які можуть спричинити синергетичні та антагоністичні ефекти. Наведено схематичне подання ефектів взаємного накладання інгібувальних механізмів. Теоретична модель, яка відображає спільну дію окремих додатків у багатокомпонентних інгібіторних системах, додатково розширена та вдосконалена.

Ключові слова: корозія, сталь, інгібувальні суміші, захист металів, ізомолярні серії, ефекти накладання механізмів.

<i>Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д.</i> Методи підвищення корозійної тривкості труб з низьколегованих сталей для нафтогазовидобувної галузі.....	99
---	----

Розроблено комплексну технологію виготовлення нафтогазових труб підвищеної корозійної тривкості, яка містить контрольоване вальцювання трубної заготовки зі сталі 06X1-U з регульованим вмістом хімічних елементів і термічне оброблення – гартування і подвійний короткочасний високий відпуск за температур, максимально наближених до температури фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення сталі. Встановлено, що труби з цієї сталі мають дрібнозернисту ферито-перлітну структуру з високим (до 23%) вмістом спеціальних низькоенергетичних меж $\alpha-\alpha$ і $\alpha-\gamma$; підвищену корозійну тривкість під час випробувань зразків у хлоридному і модельному хлоридно-ацетатному розчинах; не схильні до наводнювання за катодної поляризації у 1N H_2SO_4 + 1,5 g/l $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$, а також тривкі до сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) і водневого розтріскування порівняно з трубами зі сталі 20. Виявлено, що термічне оброблення за опрацьованою технологією підвищує тривкість проти СКРН ($\sigma_{gr} \geq 0,85 \sigma_{0,2}$) і поліпшує механічні властивості труб до класу міцності X 56 за стандартом американського нафтового інституту API 5L.

Ключові слова: низьколегована сталь, труби, технологія, зернограничне конструювання, термічна обробка, мікроструктура, спеціальні межі зерен, корозійна тривкість, механічні властивості.

- Білий О. Л., Гонсалес-Санчес Х., Алехандро де Леон Гомес К. Вплив зовнішнього електромагнетного поля на корозійну втому зварних з'єднань дуплексної нержавної сталі 2205..... 105

Дуплексна нержавна сталь 2205 (ДНС) – це сплав з 22% Cr і 5% Ni. Сталеві мікроструктури – матриця з вмістом *d*-фериту із ОЦК структурою із вкрапленнями грацецентрованої кубічної ґратки з *g*-аустенітом у співвідношенні 50:50. ДНС використовують у промисловості завдяки високій механічній міцності та корозійній стійкості, кращій, ніж у феритних або аустенітних нержавних сталях. Під час зварювання індукували електромагнетну взаємодію низької інтенсивності, застосовуючи осьові зовнішні електромагнетні поля 0; 3 і 12 мТ. Виконано мікроструктурний аналіз та оцінку локалізованої корозійної стійкості в умовах піттингової корозії. Стійкість до зародження та росту тріщин також оцінювали в малоцикловому режимі випробувань на корозійну втому для спостереження за поведінкою короткої тріщини. Встановлено, що електромагнетна взаємодія низької інтенсивності (3 мТ) поліпшує локалізовану корозійну стійкість, але за 12 мТ покращення не спостерігали порівняно із 0 мТ. Стійкість до зародження тріщин і в'язкість руйнування також посилювалися під час застосування зовнішніх електромагнетних полів завдовжки 3 мТ через модифікацію мікроструктурної еволюції за теплового циклу зварювання.

Ключові слова: корозійна втома, дуплексна сталь, коефіцієнт інтенсивності напружень, стійкість до руйнування.

- Полутренко М. С., Маруцак П. О., Біцак Р. Т., Андрусяк У. Б., Бабій А. В. Діагностування поверхні корозійно пошкоджених сульфатредуквальними бактеріями сталей 20 та 17Г1С-У..... 110

Розвинуто методи лабораторної дефектометрії біокородованих мікроділянок конструкційних сталей на основі кількісного аналізу зміни їх шорсткості. Встановлено вплив сульфатвідновлювальних бактерій на мікрогеометрію рельєфу зразків зі сталей 17Г1С-У та 20. Виявлено, що бактерії накопичуються у мікрозападинах рельєфу, що зумовлює утворення слизу та продуктів їх життєдіяльності на цих ділянках, з подальшим формуванням біоплівки на поверхні зразків. Ці ділянки піддаються найбільшому корозійному впливу із утворенням пітингів. Біокорозія збільшує шорсткість поверхні досліджених сталей у 4,5 разів, що в подальшому локалізує концентрацію напружень на цих ділянках.

Ключові слова: біокорозія, аналіз профілограм, діагностування, концентрація напружень.

- Силованюк В. П., Івантишин Н. А. Заліковування тріщин зсуву в анізотропних тілах..... 118

Отримано розв'язки плоскої задачі теорії пружності анізотропних тіл з тріщинами поперечного зсуву, “залікованими” за ін'єкційними технологіями, яку зведено до розв'язування сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь відносно переміщень поверхонь тріщини. Розглянуто випадки пружних і в'язко-пружних заповнювачів тріщин. Оцінено гранично-рівноважний стан тіл із залікованими тріщинами за енергетичним критерієм.

Ключові слова: заліковування тріщин, анізотропне тіло, міцність, пружність, в'язко-пружність.

- Глотка О. А. Розподіл легувальних елементів у карбідах жароміцних нікелевих сплавів за рівновісної кристалізації..... 124

Вивчено специфіку розподілу легувальних елементів у вторинних карбідах у багатокомпонентній системі Ni–13,5Cr–5Co–3,4Al–4,8Ti–7,3W–0,8Mo–0,015B–0,12C. Методом CALPHAD змодельовано термодинамічні процеси кристалізації. Результати розрахунків хімічного складу карбідів порівняно з експериментальними, отриманими методом електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа РЕМ-106І зі систе-

мою енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Досліджено вплив легувальних елементів на температуру виділення вторинних карбідів.

Ключові слова: ливарні жароміцні нікелеві сплави, система легування, метод CALPHAD, структура, склад карбідів.

*Ленковський Т. М., Іваницький Я. Л., Мольков Ю. В., Дурягіна З. А.,
Кулик В. В., Тростянчин А. М., Шишковський Р. О.* Аналіз методом
скінченних елементів напружено-деформованого стану зразка
Бріджмана за осьового розтягу 132

Створено скінченно-елементну тривимірну модель зразка Бріджмана для дослідження його пружно-пластичного деформування за розтягу. Встановлено розподіл напружень у поперечному перерізі робочої частини зразка для широкого діапазону навантажень. Показано, що на етапі пружного деформування напруження в середині зразка менші, ніж на його поверхні, а на етапі пружно-пластичного, навпаки – більші. Для зразка зі сталі 40X встановлено зусилля розтягу, за якого нормальні напруження в його поперечному перерізі однакові.

Ключові слова: зразок Бріджмана, метод скінченних елементів, пружно-пластична деформація, сталь 40X, істинні напруження.

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, № 5, 2020

September – October

CONTENTS

Nazarchuk Z. T. H. V. Karpenko and physicochemical mechanics of materials.....5

Zvirko O. I., Kryzhanivskiy Ye. I., Nykyforchyn H. M., and Krechkovska H. V.

Methods for assessing corrosion hydrogen degradation
of oil-gas pipelines steels.....7

Mechanical, structural-fractographic and electrochemical methods for assessing the operational degradation of pipeline steels taking into account the corrosion-hydrogen effect of aggressive environments are analyzed. Mechanical methods are used primarily to determine the resistance to brittle fracture, however their possible microdelamination in the axial direction should be taken into account when evaluating rolled steels. Prior hydrogenation increases the sensitivity of mechanical methods by increasing the susceptibility of degraded steels to hydrogen assisted cracking. Among structural factors, the special role of the rolling texture is highlighted, and among structural-fractographic ones – the determination of the fraction of low-energy fracture, as delamination and transgranular cleavage. The contribution of hydrogenation into the development of steel microdamaging can be identified by microfractographic analysis. Electrochemical methods enable predicting the resistance to brittle fracture of steels by changes in polarization resistance and surface fracture potential, as well as assessing the degree of dissipated damaging and susceptibility to hydrogen assisted cracking.

Keywords: *steel, operational degradation, microstructure, mechanical properties, microfractography, electrochemistry, hydrogen assisted cracking.*

Pokhmurskiy V. I., Khoma M. S., Chuchman M. R., and Datsko B. M.

Corrosion and hydrogenation of 17Г1С-Y steel in hydrogen sulfide media
of different concentrations.....15

Corrosion, hydrogenation and mechanical properties of 17Г1С-Y steel in chloride-acetate solutions with hydrogen sulfide concentration of 25, 100, 500 and 1500 mg/dm³ are studied. At $C_{H_2S} = 25$ and 100 mg/dm³ the steel corrodes for 720 h at an average speed of ~ 0.5 g/(m²·h). In these solutions the yield and strength limits change insignificantly and the relative narrowing changes in 6 and 10 times, respectively. At stresses $0.8\sigma_{0.2}$ in a solution with $C_{H_2S} = 100$ mg/dm³ steel cracking does not occur. It is shown that corrosion of steel at $C_{H_2S} \geq 500$ mg/dm³ occurs with the formation of surface hydrogen-initiated cracks and hydrogenation is almost twice as large as that at lower concentrations. This is a prerequisite for the development of hydrogen sulfide corrosion cracking. Constant and

asymmetric loads at the threshold values in the NACE solution increase steel hydrogenation in solutions with $C_{H_2S} = 100 \dots 1500 \text{ mg/dm}^3$, which becomes almost the same $C_{H_2} = 12.5 \dots 14.8 \text{ ppm}$. Considering the different tendency in the development of steel corrosion in the solution $C_{H_2S} = 100$ and 1500 mg/dm^3 , it is concluded that the steel fracture in these solutions is affected not only by the degree of metal hydrogenation, but also by the nature of sulfides formed on the surface and their protective properties.

Keywords: *hydrogen sulfide, corrosion, hydrogenation, stress, mechanical properties, hydrogen sulfide stress cracking.*

Korniy S. A., Zin I. M., Tymus M. B., Khlopyk O. P., and Danyliak M.-O. M.

Corrosion protection of carbon steel by composition based on natural polysaccharide.....23

Xanthan gum inhibits corrosion of carbon steel in a chloride-containing medium by an adsorption mechanism. Potassium sodium tartrate enhances the protective effectiveness of xanthan gum. The results of electrochemical impedance spectroscopy indicate the formation of the protective barrier layer on steel in an environment inhibited with the composition of gum with tartrate. The most suitable for the investigated inhibitory system is the Langmuir adsorption isotherm. The degree of protection of the carbon steel by the gum and tartrate-based inhibitory composition exceeds 90%. The increase in corrosion resistance of the metal in the inhibited composition of the medium is confirmed by optical microscopy data.

Keywords: *corrosion, steel, chloride solution, xanthan gum, potassium sodium tartrate, electrochemical impedance spectroscopy, protection degree.*

Slobodian Z. V., Mahlatiuk L. A., Kupovych R. B., and Patsai I. O.

Corrosion behavior of 20 steel, copper, brass and aluminum in inhibited acid solutions.....28

The possibility of using environmental friendly substances as corrosion inhibitors of 20 steel, copper, brass and aluminum in solutions of 5% chloride and citric acids is shown: xanthan gum, urotropin, oak shavings extract and technical glycerin. On the basis of an extract of oak shavings, technical glycerin and urotropin, a composition has been developed with a pronounced synergistic effect, which slows down the corrosion rate of 20 steel in 12 times at a concentration of 2 g/l. This composition is quite effective in relation to copper, brass and aluminum not only in 5% HCl, but also in 5% citric acid. The mechanism of the composition protective action is adsorptive with inhibition of both electrode reactions.

Keywords: *eco-friendly inhibitors, oak extract, technical glycerine, urotropin, xanthan gum, polarization curve, corrosion rate, compromise potential, corrosion current.*

Pohrelyuk I. M., Savvakyn D. G., Melnyk Kh. R., Stasyuk O. O., Ovchynnykov O. V.,

Tkachenko S. M., and Osypenko O. O. Corrosion resistance of c.p. titanium and Ti-6Al-4V alloy prepared by powder metallurgy in aqueous solutions of hydrochloric acid.....33

Corrosion resistance of c.p. titanium and Ti-6Al-4V titanium alloy with the residual porosity of 1, 3 and 4% prepared by cold pressing and sintering of titanium hydride powder in a vacuum was estimated in 10; 20 and 30% aqueous solutions of hydrochloric acid. The given results were compared with corrosion resistance of c.p. titanium and alloy prepared by traditional technology. It is shown that c.p. titanium and alloy, prepared by powder metallurgy method, dissolves faster in concentrated solutions of hydrochloric acid than the ones prepared by traditional technology. The intensity of corrosion dissolution increases with increasing residual porosity of sintered materials and concentration of hydrochloric acid. The corrosion characteristics of c.p. titanium and Ti-6Al-4V alloy with a residual porosity of 1 and 3%, regardless of preparation technology, do not differ significantly, although there is a tendency to increase the corrosion resistance of the alloy compared to

c.p. titanium. The corrosion resistance of sintered Ti–6Al–4V alloy with 4% residual porosity is twice as high as c.p. titanium.

Keywords: powder metallurgy, c.p. titanium, Ti–6Al–4V alloy, residual porosity, corrosion rate, hydrochloric acid.

- Pokhmurska H. V., Student M. M., Veselivska H. H., Zadorozhna Kh. R., Gvozdetkii V. M., and Yuskiv V. M.* Corrosion-electrochemical behaviour of SiC laser modified 7075 aluminium alloy in neutral aqueous solutions.....40

The influence of the structure of the aluminum alloy surface layers formed by laser modification with silicon carbides on their corrosion-electrochemical properties in neutral aqueous media was established. The modification-reinforcement of the alloy surfaces was carried out both at room temperature and under heating the specimens to 100 or 250°C. The surface was strengthened by the laser melting of the alloy surface layers with the introduction of SiC disperse powders. For laser surface reinforcement of the 7075 alloy, a SiC powder of 80 µm dispersion, hardness of 2600 HV and a melting point of 2760°C was used. By metallographic analysis of the corroded surface, it was found that, unlike the unmodified alloy, in which under the corrosive medium influence, sections enriched with MgZn₂ (Al/MgZn₂ galvanic couple) were dissolved, the modification of 7075 alloy with SiC particles inhibited their dissolution, reducing corrosion, and the size and the depth of local defects significantly decreased. After the modification, another Al/Al₄SiC₄ galvanic pair obviously appeared and localized corrosion proceeded through the formation of pittings in places where Al₄SiC₄ inclusions were present. By potentiodynamic studies, it was found that heating the substrate to 250°C was less efficient than to 100°C. It was revealed that, although the modified layer was heterogeneous, its corrosion resistance increased by 2–6 times depending on the medium.

Keywords: aluminium alloy, laser modified layers, silicon carbide, corrosion resistance.

- Kityk A. A., Protsenko V. S., Danilov F. I., Pavlik V., and Boča M.* Effect of electropolishing of metals and alloys in a deep eutectic solvent on their corrosion characteristics.....47

It was shown that electrochemical anodic treatment of alloys (stainless steels, Al–Mg alloy and bronzes) in Ethaline (eutectic mixture of choline chloride and ethylene glycol) can be used as effective method for improving not only the surface appearance (to increase gloss and reduce roughness) and some physico-mechanical properties (to increase microhardness, wear resistance, etc.), but also corrosion resistance. SEM analysis showed that electropolishing in Ethaline resulted in a noticeable decrease in the amount of defects (inhomogeneities, scratches, holes, etc.) on the surfaces of alloys. It was proved that smoothing the surface and changing the composition of the surface layer (established by EDX) for all tested alloys after electropolishing in Ethaline led to a noticeable decrease in the corrosion rates of samples. Thus, this fast, affordable, resource-saving and environmentally friendly method of surface treatment can be a promising alternative to the most common electropolishing technologies based on using high concentrated acidic solutions and high temperatures.

Keywords: electropolishing, deep eutectic solvents, stainless steel, bronze, aluminium alloy, corrosion resistance.

- Nenastina T. O., Ved M. V., Sakhnenko M. D., Proskurina V. O., and Zubanova S. I.* Corrosion resistance of composite coatings based on cobalt alloys with refractory metals.....52

The corrosion behaviors of electrolytic composite coatings based on ternary cobalt alloys under different conditions are studied. The distribution of metals by coating thickness and surface roughness indices are analyzed. The results show that in alkaline and neutral environments, corrosion potentials are shifted in the negative direction relative to those measured in an acidic environment, and corrosion resistance does not change significantly. This can be explained by the fact that the oxides of tungsten and molybdenum formed on the surface are not stable in an alkaline environment. Considering the fact that in the neutral

solution there is alkalization of the near-surface layer due to the reduction of oxygen, and chlorides provoke local fracture of the protective film, it can be stated that alloying metals have a synergistic effect on the composites corrosion rate. The calculated values of the corrosion depth index allow considering the coatings in the group of very stable ones, and the composite based on $\text{Co}_{64}\text{Mo}_{33}\text{Zr}_3$ alloy in neutral and alkaline environment belongs to very stable materials, which opens prospects for their further use for protection in aggressive environments.

Keywords: *composite coating, cobalt alloys, corrosion potential, depth indicator of corrosion rate.*

Nyrkova L. I., Osadchuk S. O., Kovalenko S. Yu., Klymenko A. V., and Labur T. M.

The influence of heat treatment on corrosion resistance of the welded joint of the Al–Mg–Si–Cu aluminum alloy.....59

The results of complex studies of complete cycle heat treatment (HT) effect, (quenching and artificial aging), on the corrosion and corrosion-mechanical resistance of welded joints of the Al–Mg–Si–Cu aluminum alloy of a thickness of 1.2 mm is presented. Welded joints were prepared by a non-fusion electrode using a free arc method in the environment of the protective gas argon. By the results of electrochemical studies it has been found that HT promotes decreasing of electrochemical heterogeneity between the base metal and the weld, resulting in the reduction of open circuit potential difference from 18 to 9 mV, and anodic dissolution currents. In addition, HT does not deteriorate the resistance to exfoliation corrosion of this welded joint, which is estimated by the grade (2–3) in the initial state and grade 1 after HT. The evidence of exfoliation corrosion was surface darkening and local delaminations formation with a diameter not more than 1.5 mm, the area of which on each surface does not exceed 1%. Insignificant deterioration of the resistance against intergranular corrosion was observed for the base metal (increasing the breaking depth along the grain boundaries from 0.84 mm to 0.209 mm), but the average depth of the grain boundaries of the welded joint decreased slightly from 0.3 mm to 0.25 mm. In general, the depth of intergranular corrosion after HT did not exceed the permissible value (0.35 mm). The effect of HT on the resistance of the corrosion-mechanical cracking under constant load in fully immersion into 3% NaCl solution was ambiguous: for the base metal slight reduction of failure time in average from 73 to 66 h was noticed, and for welded joints – an increase in failure time up to about 35% (from 20 to 33 h). This confirms the reduction of heterogeneity of the welded joint in general. Comparative studies revealed that the corrosion-mechanical resistance of welded products after full cycle of HT as a whole would be determined by the resistance against intercrystalline corrosion and corrosion cracking.

Keywords: *aluminum alloy of the Al–Mg–Si–Cu system, welded joint, corrosion resistance, intercrystalline corrosion, exfoliating corrosion, corrosion-mechanical tests.*

Yapontseva Yu. S., Maltseva T. V., and Kublanovsky V. S. Corrosion properties

of electrolytic coatings based on CoW, CoRe and CoWRe alloys.....66

Chemical composition, current efficiency, and corrosion properties of CoW, CoRe binary alloys, and CoWRe ternary alloys obtained from two types of electrolytes: citrate and citrate-pyrophosphate are shown. It is found that alloys that are deposited from a citrate electrolyte contain significantly more refractory metals (51.0 at.% Re and 46.2 W + Re) at the same deposition current density (10 mA cm^{-2}) than alloys that are deposited from a citrate pyrophosphate electrolyte (13.5 at.% Re and 23.9 at.% W + Re). The main advantage of using citrate-pyrophosphate electrolyte is its high current efficiency (up to 85.7%). Corrosion studies in a solution of 3.5% NaCl show that the corrosion resistance of CoWRe alloys is higher than that of CoRe and is 3.2 and 2.8 $\text{k}\Omega\text{-cm}^2$ for citrate electrolyte and 5.4 and 3.6 $\text{k}\Omega\text{-cm}^2$ for citrate pyrophosphate electrolyte, respectively. The corrosion resistance of coatings deposited from citrate-pyrophosphate electrolyte is related to their phase composition, namely, the formation of a solid solution of rhenium in cobalt for CoRe alloy and the formation of a nanocrystalline coating for CoWRe alloy.

Keywords: *corrosion, cobalt, tungsten, rhenium, electrodeposition, alloy.*

- Vasyliiev G. S. and Herasymenko Yu. S. Improvement of plate heat exchangers performance with application of ultrasonic vibration.....71

The influence of ultrasonic vibration on local corrosion and carbonate scaling on the surface of AISI 304 stainless steel in heat exchanging conditions is investigated. It is shown that the application of ultrasonic vibration of 27 kHz frequency and 9 W power causes the shift of activation potential on 0.22 V to the anodic side from 0.20 to 0.42 V/SCIE. The mechanism of pitting repassivation under the influence of ultrasonic vibration is proposed. It consists in corrosion products removal over the pit regions due to their adhesion reduction to the vibrated surface. It is established, that the application of ultrasonic vibration to the scaled surface allows us to increase the heat transfer coefficient in 3.8 times. The application of ultrasound with the power of 190 W allows us to prevent any scale deposition on the clean heat exchange surface.

Keywords: *stainless steel, pitting corrosion, ultrasound, plate heat-exchanger.*

- Korolov V. P., Gibalenko O. M., and Korolov P. V. Methods for controlling corrosion protection of industrial facilities steel constructions.....77

The innovative aspects of the formation and development of corrosion protectability is analyzed as an important element of the state technical and economic policy in the field of quality and safety of industrial facilities. A risk-based approach is proposed to overcome the uncertainty of parameters of corrosion protectability of structures and installations according to the requirements of the quality function deployment (QFD). The nomenclature, indices and methods of the off-line and on-line monitoring (conformity assessment) of the determinative parameters of the corrosion state of structures and their protective coatings are established. It is proved that the procedure of making and checking the balanced decisions of corrosion protection promotes switch from the costly to innovative management of resource saving and technological safety of industrial enterprises.

Keywords: *corrosion hazard, determinative parameters of the corrosion state, corrosion protectability, conformity assessment, limit states, innovative potential, risk-based approach, balanced indices, resource saving, industrial facilities.*

- Zozulya G. I., Kuntiyi O. I., Mertsalo I. P., and Mazur A. S. Obtaining of porous bimetal Cu/Ag by galvanic substitution of galvanized brass.....83

Obtaining of Cu/Ag-nano bimetal for CO₂ reduction at the catalytically active cathode is studied according to the scheme: the formation of porous copper by selective anodic dezincification of Cu–Zn alloy in H₂SO₄ solution; deposition of silver nanostructures by galvanic replacement. It is shown that nanosized dendritic formation of silver (70...100 nm) are deposited on the surface of nanoporous copper in 0.01 M AgNO₃ in the ultrasound field. It is established that the main factor of the influence on the morphology of reduced silver on porous copper is the duration of the galvanic replacement. It is shown that electrodes with a porous Cu/Ag-nano surface are characterized by significantly higher catalytic activity compared to brass foil and porous copper.

Keywords: *anodic dezincification of brass, nanoporous copper, galvanic replacement, nanostructured silver.*

- Lopachak M. M., Khrushchuk Kh. I., Dnistryan V. V., Boichyshyn L. M., and Reshetnyak O. V. Corrosion resistance of amorphous metal alloys Co₇₇Si₁₁B₁₂ as electrodes of hydrogen evolution from alkaline solutions.....88

The corrosion resistance of cobalt-based amorphous alloy (AMA) was investigated by cyclic voltammetry (VA). Investigations were carried out in an aqueous medium of 1 M KOH at different temperatures from 293 to 333 K. It was shown that due to the five-fold cyclic polarization of the electrodes within the potentials –1.5...+0.5 V, the corrosion potential shifts to the cathodic side, and in solutions temperature of 313...333 K acquires almost identical values. The corrosion current of the AMA increases eightfold with in-

creasing the temperature of the solution to 313 K. The corrosion resistance of the AMA used in the hydrogen evolution reaction increases, as indicated by current density values that are two times lower than those of unused alloys. The corrosion activation energy is calculated to be 18.65 and 17.86 kJ/mol for the 1 and 5 cycles of the VA curve, respectively. Such values indicate the diffusion-controlled interaction of hydroxyl ions with the surface of the AMA. The activation energy of the formation of compounds on the AMC surface is calculated. It is shown that the formation of the chemisorbed complex $[\text{Co-O-H}_2\text{O}]_{\text{ads}}$ occurs with twice the activation energy than the formation of passivation layers.

Keywords: *amorphous metallic alloys, corrosion, activation energy, passivation of the surface.*

Ledovskyykh V. M., Vyshnevskaya Yu. P., Brazhnyk I. V., and Levchenko S. V.

Mechanism of the oxidative and salt passivators coaction within binary inhibitive mixtures.....93

The regularities of joint action of the additives that are characterized by a different inhibition mechanism for the protection of mild steel in aqueous saline media have been investigated. Total 14 inhibitive mixtures have been studied at different concentration ratio and the obtained results on the protective efficiency and produced morphological and structural changes of the metal surface have been interpreted in regard to a coaction of individual inhibitive factors. Different kinds of interaction that may result in synergistic and antagonistic effects have been discussed. The schematic representation of the inhibitor mechanism aliasing effects has been presented and the theoretical model that reflects the joint action of individual additives within multicomponent inhibitive systems has been further extended and refined.

Keywords: *corrosion, mild steel, inhibitive mixtures, metal protection, isomolar series, coaction, mechanism aliasing effects.*

Dergach T. O. and Sukhomlin G. D. Methods of improving corrosion resistance

of tubes made of low-alloy steels for the gas-and-oil producing industry.....99

The complex technology of production of oil and gas tubes of high corrosion resistance is developed, which includes controlled rolling of tubular billet of selected low-alloy 06X1-Y steel with regulated content of chemical elements; heat treatment – quenching and double short-term high tempering at temperatures as close as possible to the phase $\alpha \rightarrow \gamma$ -transformations of steel. It has been established that the obtained tubes made of 06X1-Y steel are characterized by fine-grained ferrite-pearlite structure with high content (up to 23%) of special low-energy boundaries of $\alpha-\alpha$ and $\alpha-\gamma$; high corrosion resistance when tested for samples in chloride and model chloride-acetate solutions; reduced tendency to hydrogenation during cathodic polarization in the solution of 1N $\text{H}_2\text{SO}_4 + 1.5 \text{ g/l CS}(\text{NH}_2)_2$ and increased resistance against SSCC and HR – compared to 20 steel tubes. It is shown that heat treatment according to the developed technology increases resistance to SSCC ($\sigma_{\text{gr}} \geq 0.85 \sigma_{0.2}$) and improves mechanical properties of tubes to the strength grade X 56 according to standard of American Petroleum Institute API 5L.

Keywords: *low-alloy steel, tubes, technology, grain boundary engineering, heat treatment, microstructure, special grain boundary, corrosion resistance, mechanical properties.*

Bilyy O. L., González-Sánchez J., and De León Gomez C. Effect of external electro-

magnetic field on corrosion fatigue of duplex stainless steel 2205 welded joints.....105

Duplex stainless steel 2205 (DSS) is an alloy containing 22% of Cr and 5% of Ni. The steel microstructure is a matrix of *d*-ferrite BCC with *g*-austenite FCC grain islands in a 50:50 ratio. DSS is used in industry due to its high mechanical strength and corrosion resistance, that are better than of ferritic or austenitic stainless steels. During the welding process an electromagnetic interaction of low intensity was induced by applying axial external electromagnetic fields of 0; 3 and 12 mT. Microstructural characterization and the assessment of localized corrosion resistance in terms of pitting corrosion were conducted. Resistance to nucleation and growth of cracks was also evaluated in the low-cycle regime

of corrosion fatigue test to observe the short crack behaviour. The electromagnetic interaction of low intensity (3 mT) was found to improve the localized corrosion resistance but the 12 mT one showed no improvement in this aspect, in comparison to 0 mT. The resistances to crack initiation and fracture toughness were also improved with the application of the 3 mT external electromagnetic fields due to the modification of the microstructural evolution during thermal cycle involved in the welding process.

Keywords: *corrosion fatigue, duplex steel, stress intensity factor, fracture resistance.*

- Polutrenko M. S., Marushchak P. O., Bishchak R. T., Andrusyak U. B., and Babii A. V.* Diagnostic of the surface of 20 and 17Г1С-Y steels corrosion damaged by sulfate reducing bacteria.....110

The methods of laboratory diffractometry of biocorroded microregions of structural steels based on quantitative analysis of their roughness variation are developed. The influence of sulfate-reducing bacteria on the morphology of the relief of 17Г1С-Y and 20 steel specimens is established. It is revealed that bacteria accumulate in the microdepressions of the relief, which leads to the formation of mucus and their metabolic products in these areas, followed by the formation of a biofilm on the surface of the samples. These areas are subjected to the most corrosive effects with pitting formation. It is revealed that biocorrosion increases the surface roughness of the studied steels up to 4.5 times, which subsequently leads to localization of stress concentration in these areas.

Keywords: *biocorrosion, analysis of profilograms, diagnostics, stress concentration.*

- Sylovaniuk V. P. and Ivantyshyn N. A.* Healing of shear cracks in anisotropic bodies.....118

Solutions to the plane problem of the theory of elasticity of anisotropic bodies with transverse shear cracks that are “damage-healed” by injection technologies are obtained. This problem is reduced to the solution of singular integro-differential equations with respect to the displacements of crack surfaces. The cases of elastic and viscoelastic crack fillers are considered. The limiting equilibrium states of bodies with damage-healed cracks according to the energy criterion are estimated.

Keywords: *crack healing, anisotropic body, strength, elasticity, viscoelasticity.*

- Glotka O. A.* Distribution of alloying elements in carbides of refractory nickel alloys of equiaxial crystallization.....124

The specific feature of the distribution of alloying elements in the secondary carbides in the multicomponent system Ni–13.5Cr–5Co–3.4Al–4.8Ti–7.3W–0.8Mo–0.015B–0.12C has been studied. The CALPHAD method is used to simulate the thermodynamic processes of crystallization. The results of thermodynamic calculations of the chemical composition of carbides are compared with the experimental ones obtained by electron microscopy using an REM-106I microscope with a system of energy-dispersive X-ray spectral microanalysis. The influence of alloying elements on the precipitation temperature of the secondary carbides is investigated.

Keywords: *cast nickel superalloys, alloying system, CALPHAD method, structure, composition of carbides.*

- Lenkovskiy T. M., Ivanytskyi Ya. L., Molkov Yu. V., Duriagina Z. A., Kulyk V. V., Trostianchyn A. M., and Shyshkovskiy R. O.* Analysis of the stress-strain state of the Bridgman specimen by the finite elements method under axial tension.....132

A three-dimensional finite element model of the Bridgman specimen for elastoplastic tensile deformation study is built. The stress distribution in the cross-section of the specimen working area for a wide load range is established. It is shown that in the elastic deformation conditions, the stresses inside the specimen are lower than near its surface, and vice versa, in the case of elastoplastic deformation, stresses are higher. For a specimen made of 40X steel, the tensile force at which the normal stresses in the cross-section are uniform was calculated.

Keywords: *Bridgman specimen, finite element method, elastic-plastic deformation, 40X steel, true stress.*