

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

## EDITORIAL BOARD

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

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

Прийняття до друку статей та коротких викладів здійснюється на підставі незалежного анонімного рецензування

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

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

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

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

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

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

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

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

---

Підписано до друку 30.10.2023. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.  
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 180 прим. Замовлення 101123 від 10.11.2023. Ціна договірна.  
Реєстраційне свідоцтво серія ДК № 5068 від 22.03.2016

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

---

© ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. Карпенка НАН УКРАЇНИ,  
“ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ”, 2023

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

# ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

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

**ТОМ 59, № 5, 2023**

вересень – жовтень

## ЗМІСТ

*Похмурський В. І., Хома М. С., Чучман М. Р., Василів Х. Б., Рацька Н. Б.*  
Вплив температури і тиску на корозію та наводнювання сталі  
у хлоридно-ацетатному середовищі за різних концентрацій  
сірководню і вуглекислого газу.....5

Досліджено швидкість корозії та наводнювання низьковуглецевої трубної сталі в хлоридно-ацетатному розчині з додаванням сумішей  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  за різних температури і тиску. Встановлено, що швидкість корозії та наводнювання залежить від концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  та властивостей корозійних плівок. У розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{CO}_2} : P_{\text{H}_2\text{S}} = 30:1$  та на початку витримки за їх пропорції 3:1 корозія сповільнюється через утворення плівки макінавіту  $\text{Fe}_{1+x}\text{S}$ . З часом макінавіт перетворюється на гексагональний троїліт  $\text{FeS}$  з голчастою структурою, а швидкість корозії зростає у  $\sim 2$  рази. Виявлено, що швидкість корозії сталі при  $60^\circ\text{C}$  і 5 МПа в розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{CO}_2} : P_{\text{H}_2\text{S}} = 3:1$  удвічі нижча, ніж при  $20^\circ\text{C}$  і 0,1 МПа. На поверхні утворюється щільний шар кубічних кристалів сульфиду заліза  $\text{FeS}$ , який уповільнює корозію. З підвищенням температури адсорбція водню сталлю зменшується в  $\sim 15$  разів.

**Ключові слова:** швидкість корозії, наводнювання, сталь 17Г1С-У, хлоридно-ацетатний розчин, сірководень, вуглекислий газ, температура, тиск.

*Звірко О. І., Греділь М. І., Цирульник О. Т., Венгринюк О. І., Никифорчин Г. М.*  
Методика оцінювання впливу газоподібного водню на корозію  
та наводнювання сталей.....10

Розроблено лабораторну методику дослідження впливу газоподібного водню на інтенсивність електрохімічних процесів на трубних сталях за дії модельного для внутрішньої поверхні газопроводу конденсованого середовища. Вона полягає у вимірюванні електрохімічних показників сталі за барботування газоподібного водню та модельних експлуатаційних умов насичення ним тонкого шару конденсату на внутрішній поверхні трубопроводу. На прикладі трубної сталі API 5L X70 встановлено суттєвий вплив водню за таких умов на її електрохімічну поведінку. Зроблено висновок, що насичення модельного середовища газоподібним воднем істотно пришвидшує корозію сталі та інтенсифікує її наводнювання.

**Ключові слова:** трубна сталь, водень, електрохімічні показники, корозійна тривкість.

Макаренко В. Д., Стогній О. В., Гоц В. І., Максимов С. Ю., Макаренко Ю. В. Корозійна деградація тривало експлуатованих сталевих каналізаційних труб.....	18
--	----

Наведено результати експериментальних досліджень деградації сталевих конструкцій каналізаційних підземних споруд. Зокрема, показано розподіл шкідливих газових елементів (сірки, водню, кисню) по товщині стінки каналізаційних труб уздовж корозійних дефектів у вигляді виразок, а також характер зміни мікротвердості металу залежно від вмісту водню і терміну експлуатації. Для підтвердження знеміцнення металу з підвищенням концентрації водню виміряно напруження кристалічної ґратки (напруження викривлень).

**Ключові слова:** корозія, напруження, кристалічність, деформація, мікротвердість, структура.

Ненастіна Т. О., Бережна К. В., Сахненко М. Д., Бугаєвський С. О. Деградація залізобетонних конструкцій мостових споруд: корозійний аспект.....	24
--	----

Розглянуто чинники, які спричиняють руйнування залізобетонних конструкцій мостових споруд, зокрема вплив протиожеледних матеріалів, які використовують для безпеки дорожнього руху в зимовий період. Проаналізовано український ринок протиожеледних хімічних реагентів та комбінованих природних і синтетичних засобів. Методом поляризаційного опору досліджено кінетику корозійного руйнування сталей 09Г2С та Ст3 як основних матеріалів арматури у нейтральних хлоридвмісних та лужних розчинах. З урахуванням кінетики корозійного руйнування досліджених сталей визначено швидкість їх корозії.

**Ключові слова:** деградація, корозійне руйнування, протиожеледні засоби, арматура залізобетонних конструкцій.

Герцик О. М., Гула Т. Г., Єзерська О. А., Носенко В. К., Корній С. А., Ташак М. С. Вплив складу аморфних сплавів на їх корозійну тривкість у різних за агресивністю середовищах.....	32
--	----

Досліджено вплив елементного складу стрічкових аморфних сплавів на основі заліза ( $Fe_{80,0}Si_{6,0}B_{14,0}$ ,  $Fe_{78,5}Ni_{1,0}Mo_{0,5}Si_{6,0}B_{14,0}$ ,  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$ ,  $Fe_{51,7}Ni_{21,7}Cr_{6,2}Mo_{0,6}V_{1,5}Si_{5,2}B_{13,1}$ ) на корозійну тривкість у 0,5 М водних розчинах NaCl; HCl та KOH при  $T = (293 \pm 1)$  К. Встановлено, що сплави  $Fe_{51,7}Ni_{21,7}Cr_{6,2}Mo_{0,6}V_{1,5}Si_{5,2}B_{13,1}$  і  $Fe_{73,1}Cu_{1,0}Nb_{3,0}Si_{15,5}B_{7,4}$  є корозійно тривкими в агресивних середовищах. Електрохімічні параметри, отримані як методом циклічної вольтамперометрії, так і електрохімічної імпедансної спектроскопії, вказують на формування на них поверхневих плівок у 0,5 М водному розчині калій гідроксиду. Експериментально доведено, що йони Cl<sup>-</sup> (особливо за низьких рН) за тривалої дії є помітно агресивнішими окисниками аморфних сплавів проти ОН<sup>-</sup>-іонів. Під час утворення пасивувальної плівки у сильних окиснювальних середовищах активно розчиняються ті елементи сплаву, що не задіяні у цьому процесі, а основні плівкотвірні нагромаджуються під плівкою, посилюючи її захисні властивості.

**Ключові слова:** аморфні металеві сплави, корозійна тривкість, електрохімічні характеристики.

Сухова О. В. Механічні та корозійні властивості сплавів системи Fe–B–C.....	39
---	----

Вивчено механічні та корозійні властивості сплавів системи Fe–B–C (0,1...9 wt% B; 0,2...4 wt% C; Fe – залишок). Визначено їх мікротвердість і міцність на стиск, опір абразивному і газоабразивному зношуванню за кімнатної температури. Гравіметричним методом виміряно швидкість корозії у водних розчинах 0,5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 5 М H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 0,8 М HNO<sub>3</sub>, 1 М HCl, 2 М CH<sub>3</sub>COOH, 3 М NaCl та 0,2 М Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Найбільший опір абразивному зношуванню мають сплави з підвищеною твердістю, а газоабразивному – з міцністю на стиск. У більшості кислих і нейтральних середовищ швидкість їх корозії зменшується з часом через накопичення на поверхні зразків продуктів корозії і підвищується з ростом вмісту евтектик та аустенітної фази в евтектичних колоніях, а також через утворення в структурі меж між первинною і перитектичною фазами. Найбільшу корозійну тривкість сплави мають у розчині натрій хлориду, а найменшу – в розчині нітратної кислоти.

**Ключові слова:** сплави Fe–B–C, механічні властивості, абразивна і газоабразивна зносотривкість, корозійна тривкість.

Галайчак С. А., Винар В. А., Дацко Б. М., Данильчук М. В. Отримання електрохімічних покриттів системи Ni–Mo із саморегулювальних електролітів.....46

Електрохімічним методом одержано покриття Ni–Mo на сталевих підкладках з комплексних саморегулювальних електролітів. Методами електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу визначено морфологію поверхні та елементний склад одержаних покриттів. Максимальний вміст молібдену (25,26 mass%) одержано за густини струму осадження 0,5 A/dm<sup>2</sup> (рН 9,2, 300 rpm, 22±2°C). Товщина таких покриттів 15...20 μm. Встановлено, що зі збільшенням вмісту молібдену їх мікротвердість зростає. Запропонований електроліт характеризується високою стабільністю, є технологічним та екологічно безпечним.

**Ключові слова:** електроосадження, покриття, морфологія, нікель–молібден, електроліт, молібдат стронцію, молібдат кальцію.

Силованюк В. П., Івантишин Н. А. Вплив включень на механічні характеристики структурно-неоднорідних матеріалів (Огляд).....51

Виконано короткий огляд досліджень про вплив включень на механічні характеристики конструкційних матеріалів. Насамперед згадані праці, де отримані аналітичні залежності для прогнозування механічних властивостей структурно-неоднорідних матеріалів (тріщиностійкості, границь міцності і втоми) залежно від форми, об'ємного вмісту і розмірів включень.

**Ключові слова:** включення, тріщина, міцність, тріщиностійкість, витривалість.

Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Звягін Н. С., Любчак М. О. Визначення залишкової довговічності пластини зі системою тріщин за дії довготривалого статичного навантаження і корозивного середовища.....61

З допомогою енергетичного підходу побудовано розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту систем тріщин у металевих пластинах за дії довготривалого статичного розтягу і локальної електрохімічної корозії. Оцінено вплив корозивного середовища на залишкову довговічність пластини зі системою періодичних і двоперіодичних тріщин.

**Ключові слова:** математична модель, пластина, система тріщин, залишкова довговічність, корозивне середовище.

Лис С. С. Розрахунок міцності твелів у стаціонарному режимі експлуатації.....68

Встановлено, що за результатами розрахунків частини тепловидільної збірки активної зони реактора ВВЕР-1000 у стаціонарному режимі експлуатації можна оцінити механічний стан оболонок твелів, зрозуміти вплив методів керування реактором на міцність та проєктні критерії приймання. Наведено основні принципи визначення міцності механічних характеристик твелів з використанням коду СТАРТ-3. Наведено результати прогнозування механічних характеристик твелів ВВЕР-1000 чотирирічної кампанії у стаціонарному режимі за нормальних

умов експлуатації та з їх порушенням. Виявлено, що максимальні напруження в оболонці становлять 60...80 МПа, що не може викликати розгерметизації твела.

**Ключові слова:** міцність, напруження, реактор, твел, стаціонарний режим.

Саврук М. П., Кравець В. С., Онишко Л. Й., Кваснюк О. І. Визначення напруженого стану анізотропного тіла з гладкими криволінійними включеннями за поздовжнього зсуву.....74

Методом сингулярних інтегральних рівнянь розв'язано антиплоску задачу теорії пружності для пружного кусково-однорідного анізотропного тіла. Для одного анізотропного включення в ортотропній площині побудовану систему інтегральних рівнянь другого роду розв'язано числово методом квадратур. Досліджено вплив пружних сталих анізотропних матеріалів площини та включення, а також форми криволінійного включення на розподіли зсувних напружень на межі поділу матеріалів.

**Ключові слова:** антиплоска деформація, анізотропія, включення, концентрація напружень, метод сингулярних інтегральних рівнянь.

Козачок О. П. Вплив рідинних містків на контакт тіла з гідрофобною періодично текстурованою жорсткою основою.....83

Досліджено безфрикційний контакт пружного півпростору та текстурованої прямокутними виїмками жорсткої основи за наявності нестисливої рідини, що не змочує їх поверхні, у міжповерхневих просвітах. Під дією поверхневого натягу рідина формує містки на краях просвітів, а у внутрішніх частинах під сталим тиском знаходиться газ. Перепад тисків у рідині й газі описує формула Лапласа. Сформульовану контактну задачу для пружного півпростору зведено до сингулярного інтегрального рівняння з ядром Гільберта відносно похідної від висоти просвітів і трансцендентного рівняння для визначення ширини ділянки з газом. Проаналізовано залежності ширини ділянки з газом, форми просвітів і контактного зближення тіл від прикладеного навантаження, об'єму рідини та її поверхневого натягу.

**Ключові слова:** контактна взаємодія, прямокутні виїмки, міжповерхневі просвіти, рідинні містки, контактне зближення тіл.

Барановська О. В., Баглюк Г. А., Букетов А. В., Сапронов О. О., Барановський Д. І. Вплив дисперсного наповнювача системи Ti-Fe-Si-C на фізико-механічні властивості та структуру епоксикомпозитів.....89

Досліджено вплив дисперсного порошкового наповнювача, отриманого термічним синтезом зі суміші порошоків: 65% гідриду титану, 30% феросиліцію та 5% технічного вуглецю, на основні фізико-механічні властивості полімерного композита на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20. Вміст наповнювача варіювався в діапазоні від 5 до 40 mass%. Показано, що введення в склад полімеру наповнювача призводить до помітного підвищення основних механічних характеристик композита (максимальні значення за вмісту 10%, що забезпечує зростання міцності на згин у 1,6 раза, а ударної в'язкості – у 1,7 раза порівняно з вихідною матрицею). Подальше збільшення кількості дисперсного наповнювача 20...40% призводить до зменшення руйнівних напружень, рівень яких, однак, все ж перевищує міцність вихідної матричної фази. Максимальну адгезійну міцність та мінімальні залишкові напруження показали композити з 5% наповнювача. Відзначено, що за підвищення його вмісту понад 5...10%, у структурі композита утворюються конгломерати дисперсних частинок, кількість та розмір яких збільшуються зі зростанням концентрації порошку у суміші.

**Ключові слова:** композит, полімер, порошок, наповнювач, структура, міцність, адгезія, епоксидна смола.

<i>Кречковська Г. В., Бакун Б. М., Студент О. З., Коней І. Б. Ударна в'язкість та фрактографічні особливості руйнування складників композитної насосної штанги.....</i>	<i>97</i>
---	-----------

Оцінено ударну в'язкість кожного із складників (скловолоконна оболонка та вуглець-пластикове осердя) композитної насосної штанги та досліджено фрактографічні особливості руйнування зразків, випробуваних на удар. Показано, що волокна в оболонці штанги руйнувались за крихким механізмом відколу, а полімерна матриця – за в'язким механізмом деструкції на дрібні фрагменти. Особливість осердя штанги – смуги з однонаправлених вуглецевих волокон з періодичною їх переорієнтацією, напрям поширення руйнування на переходах між якими змінювався. Така структурно обумовлена переорієнтація поверхні гальмувала руйнування і осердя, і штанги в цілому.

**Ключові слова:** *композитна насосна штанга, випроби на удар, фрактографічні особливості, механізм руйнування.*

<i>Труш В. С., Погрелюк І. М., Лук'яненко О. Г., Кравчишин Т. М., Федірко В. М., Корендій В. М., Ковальчук І. В. Кінетика газового науглецювання сплаву Zr-1%Nb.....</i>	<i>104</i>
--	------------

Досліджено кінетику науглецювання тонколистових зразків (~ 1 mm) зі сплаву Zr-1%Nb у вуглецевмісному газовому середовищі ( $P_{\text{Ar+C}_2\text{H}_6} = 0,106 \text{ Pa}$ ) за температур 650...850°C і тривалості 1; 5 і 10 h. Встановлено, що при 650 і 750°C науглецювання відбувається за законом, наближеним до лінійного ( $n \approx 1$ ), а при 850°C – за законом, наближеним до параболічного ( $n \approx 2$ ). Виявлено, що енергія активації науглецювання сплаву інтервалі 650...850°C за парціального тиску пропану  $p_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0,018 \text{ Pa}$  становить 2,21 kJ/mol. Визначено розподіл твердості та мікроструктуру приповерхневого шару сплаву після науглецювання. Наведено вміст фаз  $\alpha\text{-Zr}$  і ZrC на його поверхні після оброблення у вуглецевмісному газовому середовищі.

**Ключові слова:** *сплав Zr-1%Nb, науглецювання, приповерхневий шар, мікроструктура, кінетика зміни маси, мікротвердість, параметри кристалічної ґратки.*

<i>Гнатенко І. О., Андрєєв І. В., Лисовенко С. О., Роїк О. С., Цисар М. О., Косенчук Т. О. Зміна мікроструктури та властивостей твердого сплаву типу WC-Co внаслідок обробки за високих тиску та температур.....</i>	<i>111</i>
--	------------

Досліджено зміну структури та фізико-механічних властивостей твердих сплавів системи WC-6Co, WC-15Co в результаті дії на них високого тиску (8 GPa) та температури (НРНТ). Встановлено, що внаслідок оброблення за температур вищих температури плавлення цементуючої фази знижується коерцитивна сила дослідних сплавів через ріст карбідного зерна. У сплавах з більшим вмістом зв'язуючої фази утворюються інтерметалідні фази  $\text{Co}_3\text{W}$ ,  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  та оксид типу  $\text{Co}_2\text{O}_3$ . Твердість НРНТ оброблених зразків сплаву WC-6Co знижується внаслідок росту карбідного зерна, а зразків зі сплаву WC-15Co зростає через утворення інтерметалідних фаз.

**Ключові слова:** *твердий сплав, баротермічна обробка, апарат високого тиску, структура, твердість, рентгенофазовий аналіз.*

<i>Тєсля С. Ю., Кучер О. С., Богомол Ю. І., Лобода П. І., Солодкий Є. В. Індукційне зонне спікання твердого сплаву системи WC-8Co.....</i>	<i>119</i>
--	------------

Запропоновано новий метод консолідації твердого сплаву WC-8Co, який полягає у спіканні заздалегідь пресованої поруватої заготовки, що рухається зі заданою швидкістю через зону індукційного нагріву заданої температури. Дослідже-

но вплив температури спікання в діапазоні 1200...1380°C на мікроструктуру, локальний хімічний та фазовий склад твердого сплаву. Встановлено, що індукційне зонне спікання за присутності рідкої фази не призводить до росту розміру карбідних зерен. Виявлено, що розмір зерен карбіду вольфраму, спеченого в діапазоні 1240...1280°C за швидкості переміщення заготовки 3 mm/min, зменшується від 3,9 до 1,9  $\mu\text{m}$ , а з її збільшенням від 3 до 6 mm/min утворюється  $\eta$ -фаза, імовірно, через великий градієнт температури. Подрібнення структури спричиняє монотонне зростання твердості HV1 з 417 до 664.

**Ключові слова:** *твердий сплав, температурний градієнт, спікання, розмір зерен, твердість.*

*Сидорчук О. М., Гогаєв К. О., Радченко О. К., Гейбат Огли Аскеров М.,  
Бондарчук В. І.* Відпускна крихкість штампової сталі 4X4H5M4Ф2.....125

Досліджено термічно оброблену сталь 4X4H5M4Ф2 з регульованим аустенітним перетворенням у часі експлуатації і встановлено температурний діапазон (450...500°C), в якому проявилася її відпускна крихкість. Визначено ударну в'язкість зразків після різної температури відпуску та гартування сталі від 1100°C. Виявлено, що після відпуску 475°C досягається мінімальне значення ударної в'язкості за кімнатної температури (15 J/cm<sup>2</sup>). Проаналізовано роль нікелю як елемента заміщення типу Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub> та зафіксовані виділення вздовж меж зерен карбідної фази типу M<sub>6</sub>C у твердому розчині, що призводить до зниження ударної в'язкості та підвищення крихкості сталі.

**Ключові слова:** *сталь, термічна обробка, фазовий склад, кристалічна структура, механічні властивості.*

ЮВІЛЕЇ

**Василь Іванович Похмурський** (до 90-річчя від дня народження).....129



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 59, № 5, 2023**

September – October

---

---

## CONTENTS

- Pokhmurskii V. I., Khoma M. S., Chuchman M. R., Vasylyv Kh. B., and Ratska N. B.*  
Effect of temperature and pressure on corrosion and hydrogenation of steel  
in a chloride-acetate environment with different concentrations  
of hydrogen sulfide and carbon dioxide.....5

The corrosion rate and hydrogenation of low carbon pipe steel in a chloride-acetate solution with CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S mixtures at different temperatures and pressure is investigated. The corrosion rate and hydrogenation depend on the H<sub>2</sub>S concentration and the properties of corrosion films. In a solution with a pressure ratio of  $P_{CO_2} : P_{H_2S} = 30:1$  and at the beginning of exposure at a pressure ratio of 3:1 corrosion slows down due to formation of Fe<sub>1+x</sub>S mackinawite film. Over time, mackinawite transforms into hexagonal FeS troilite with a acicular structure, and the corrosion rate increases in ~2 times. The corrosion rate of steel at 60°C and 5 MPa in a solution with a pressure ratio of  $P_{CO_2} : P_{H_2S} = 3:1$  is twice as low as at 20°C and 0.1 MPa. A dense layer of cubic iron sulfide FeS crystals is formed on the surface, and reduces corrosion. As the temperature increases, the adsorption of hydrogen by the steel is reduced in ~15 times.

**Keywords:** *corrosion rate, hydrogenation, 17Г1С-V steel, chloride-acetate solution, hydrogen sulfide, carbon dioxide, temperature, pressure.*

- Zvirko O. I., Hredil M. I., Tsybulnyk O. T., Venhryniuk O. I., and Nykyforchyn H. M.*  
A method for assessing the influence of gaseous hydrogen on corrosion  
and hydrogenation of steels.....10

A laboratory method has been developed to investigate the molecular hydrogen effect on the intensity of electrochemical processes on pipe steels under the action of a model environment simulating condensate at the pipe inner surface. It is based on the measurement of electrochemical parameters of steel under conditions of gaseous hydrogen bubbling and simulates operational conditions when hydrogen saturates a thin layer of condensate inside the pipe. On the example of API 5L X70 pipe steel significant effect of hydrogen under such conditions on its electrochemical behaviour is established. It is concluded that the saturation of the model environment with hydrogen significantly accelerates corrosion of steel and its hydrogenation.

**Keywords:** *pipe steel, hydrogen, electrochemical indicators, corrosion resistance.*

<i>Makarenko V. D., Stogniy O. V., Gots V. I., Maksymov S. Yu., and Makarenko Yu. V.</i> Corrosion degradation of long-term operated steel sewage pipes.....	18
---	----

The results of experimental study of the degradation of steel structures of sewage underground constructions are presented. The distribution of harmful gas elements (sulfur, hydrogen, oxygen) over the wall thickness of sewage pipes along corrosion defects in the form of ulcers, as well as the character of changes in the microhardness of the metal depending on the hydrogen content and service life are shown. To confirm the metal softening with increasing hydrogen concentration, crystal lattice stresses (distortion stresses) were measured.

**Keywords:** corrosion, stress, crystallinity, deformation, microhardness, structure.

<i>Nenastina T. O., Berezhna K. V., Sakhnenko M. D., and Buhaievskiy S. O.</i> Degradation of reinforced concrete constructions of bridge structures: corrosion aspect.....	24
---	----

Factors which cause fracture of reinforced concrete constructions of bridge structures are considered. One of them is anti-icing material used for road safety in the winter period. The Ukrainian market of anti-icing chemical reagents and combined agents of natural and industrial origin was analyzed. The kinetics of corrosion fracture of 09Г2С and Сr3 steels as the main material of reinforcement in neutral chloride-containing and alkaline solutions was investigated using the method of polarization resistance. Taking into account the kinetics of corrosion fracture of the studied steels, the rate of their general corrosion was calculated.

**Keywords:** degradation, corrosion fracture, anti-icing agents, reinforcement of reinforced concrete structures.

<i>Hertsyk O. M., Hula T. H., Yezerska O. A., Nosenko V. K., Korniy S. A., and Tashak M. S.</i> The influence of composition of amorphous alloys on their corrosion resistance in aggressive environments of different nature.....	32
--	----

The influence of the elemental composition of strip amorphous alloys  $Fe_{80.0}Si_{6.0}B_{14.0}$ ,  $Fe_{78.5}Ni_{1.0}Mo_{0.5}Si_{6.0}B_{14.0}$ ;  $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$ ;  $Fe_{51.7}Ni_{21.7}Cr_{6.2}Mo_{0.6}V_{1.5}Si_{5.2}B_{13.1}$  on corrosion resistance in 0.5 M aqueous solutions of NaCl, HCl and KOH at  $T = (293 \pm 1)$  K was investigated. Higher corrosion resistance in aggressive environments of  $Fe_{51.7}Ni_{21.7}Cr_{6.2}Mo_{0.6}V_{1.5}Si_{5.2}B_{13.1}$  and  $Fe_{73.1}Cu_{1.0}Nb_{3.0}Si_{15.5}B_{7.4}$  alloy was established. Electrochemical parameters obtained both by the method of cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy indicate the formation on them of more durable surface layers in a 0.5 M potassium hydroxide aqueous solution. The  $Cl^-$  ions (especially at low pH) under their long-term action are the more aggressive oxidizers of amorphous alloys to compare to  $OH^-$  ions. During the passive film formation in highly aggressive environments such alloy elements, which do not participate in this process, are dissolved, and the main film forming elements are accumulated under the film, thus improving its protective properties.

**Keywords:** amorphous alloys, corrosion resistance, electrochemical characteristics.

<i>Sukhova O. V.</i> Mechanical and corrosion properties of Fe–B–C alloys.....	39
--	----

Mechanical and corrosion properties of Fe–B–C alloys (0.1...9 wt% B; 0.2...4 wt% C; Fe – balance) were investigated. Microhardness and compressive strength, resistance to abrasive and gas-abrasive wear of the alloys were determined at room temperature. Corrosion rate was measured by gravimetric method in the following aqueous solutions: 0.5 M  $H_2SO_4$ , 5 M  $H_3PO_4$ , 0.8 M  $HNO_3$ , 1 M HCl, 2 M  $CH_3COOH$ , 3 M NaCl, and 0.2 M  $Na_2SO_4$ . The highest resistance to abrasive wear showed Fe–B–C alloys with high hardness and the highest resistance to gas-abrasive wear – with high compressive strength. In most acidic and neutral media, the corrosion rate of Fe–B–C alloys decreased with increasing holding time due to accumulation of corrosion products on

the surface of the samples. The corrosion rate increased with increase in the volume fractions of eutectics and austenite phase in the eutectics colonies or when interfaces between the primary and peritectic phases were formed in the structure. The Fe–B–C alloys demonstrated the highest corrosion resistance in the sodium chloride solution and the lowest one – in the nitric acidic solution.

**Keywords:** *Fe–B–C alloys, mechanical properties, abrasive and gas-abrasive wear resistance, corrosion resistance.*

*Halaichak S. A., Vynar V. A., Datsko B. M., and Danylchuk M. V.* Preparation of Ni–Mo electrochemical coatings from self-regulating electrolytes.....46

Ni–Mo coatings on steel substrates made of complex self-regulating electrolytes were obtained by the electrodeposition method. The surface morphology and elemental composition of the obtained coatings were determined by the method of electron microscopy and energy dispersive analysis. The maximum molybdenum content (25.26 mass%) was obtained at a deposition current density of 0.5 A/dm<sup>2</sup> (pH 9.2, 300 rpm, 22±2°C). The thickness of such coatings is 15...20 μm. The microhardness of coatings increases with an increase in the molybdenum content. The proposed electrolyte is characterized by high stability and is technologically and environmentally safe.

**Keywords:** *electrodeposition, coating, morphology, nickel–molybdenum, electrolyte, strontium molybdate, calcium molybdate.*

*Sylovaniuk V. P. and Ivantyshyn N. A.* The influence of inclusions on mechanical characteristics of structural-heterogeneous materials (Review).....51

A short review of studies on the influence of inclusions on mechanical properties of structural materials was done. The studies, where analytical dependences are obtained for predicting the mechanical properties of structurally heterogeneous materials (ultimate strength, fatigue limit and crack growth resistance) depending on the shape, volume content and size of inclusions, are mentioned.

**Keywords:** *inclusion, crack, strength, crack growth resistance, endurance.*

*Andreikiv O. Ye., Dolinska I. Ya., Zviagin N. S., and Liubchak M. O.* Determination of the residual life of plates with systems of cracks under action of long-term static load and corrosive environment.....61

Using the energy approach, a calculation model was built to determine the period of subcritical growth of a system of cracks in metal plates that are subjected to long-term static tension and local electrochemical corrosion. The effect of corrosive environment on the residual life of a plate with a system of periodic and doubly periodic cracks was evaluated.

**Keywords:** *mathematical model, plate, system of cracks, residual life, corrosive environment.*

*Lys S. S.* Calculation of fuel rods strength under steady-state operating condition.....68

The results of thermal calculations of the part of the [fuel assembly](#) of the active zone of the VVER-1000 reactor in the stationary mode of operation make it possible to evaluate the mechanical state of the fuel rods cladding, to understand the influence of reactor control methods on the strength and the design acceptance criteria. The main principles of the evaluation of mechanical characteristics of VVER-1000 fuel rods using the START-3 code are presented. The results of the prediction of the mechanical characteristics of the VVER-1000 fuel rods during the 4-year campaign in stationary mode under normal operating conditions and under their violation are illustrated. In the stationary mode of operation, the maximum values of stress in the fuel rod are in the range of 60...80 MPa, that cannot cause depressurization of the fuel rod.

**Keywords:** *strength, stresses, reactor, fuel rod, stationary mode.*

- Savruk M. P., Kravets V. S., Onyshko L. Yo., and Kvasniuk O. I.* Determination of the stress state of an anisotropic body with smooth curvilinear inclusions under longitudinal shear.....74

The antiplane problem of the theory of elasticity for an elastic piecewise homogeneous anisotropic body was solved using the method of singular integral equations. For one anisotropic inclusion in the orthotropic plane, the constructed system of integral equations of the second kind is solved numerically by the quadrature method. The influence of the elastic constants of anisotropic materials of the plane and the inclusion, as well as the shape of the curvilinear inclusion on the shear stress distributions at the interface of the materials is studied.

**Keywords:** *antiplane deformation, anisotropy, inclusions, stress concentration, singular integral equation method.*

- Kozachok O. P.* The influence of liquid bridge on body contact with a hydrophobic periodically textured rigid base.....83

The frictionless contact of an elastic half-space and a rigid base textured with rectangular notches in the presence of an incompressible liquid which does not wet the body surface in the interface gaps was studied. Under the action of surface tension, the liquid forms bridges at the edges of the gaps, and the middle parts contain gas under constant pressure. Laplace's formula describes the pressure difference in liquid and gas. The formulated contact problem for an elastic half-space is reduced to a singular integral equation with a Hilbert kernel with respect to the derivative of the gaps height and a transcendental equation for determining the width of the area with gas. The dependences of the area width with gas, the shape of the gaps and the contact approach of the bodies on the applied load, the volume of the liquid and its surface tension are analyzed.

**Keywords:** *contact interaction, rectangular grooves, interface gaps, liquid bridges, contact approach of the bodies.*

- Baranovska O. V., Bagliuk G. A., Buketov A. V., Sapronov O. O., and Baranovskyi D. I.* The influence of the dispersed filler based on the Ti-Fe-Si-C system on the physicomechanical properties and structure of epoxy composites.....89

The effect of a dispersed powder filler obtained by thermal synthesis from a mixture of powders: 65% titanium hydride, 30% ferrosilicon and 5% technical carbon, on the main physicomechanical properties of a polymer composite based on ED-20 epoxy diene oligomer is investigated. The content of the filler varied in the range from 5 to 40 mass%. The introduction of the filler into the composition of the polymer leads to a noticeable increase in the main mechanical characteristics of the composite. Its maximum values are recorded at the content of 10% of the dispersed component, which ensure increase in bending strength in 1.6 times, and the impact toughness – in 1.7 times compared to the original matrix. A further increase in the content of dispersed filler in the composition of the composite to 20..40% leads to a decrease in the amount of fracture stresses, the level of which, however, still exceeds the strength of the original matrix phase. Composites with 5% filler demonstrate maximum values of adhesive strength and minimum values of residual stresses. When the content of dispersed filler increases by more than 5..10%, the formation of conglomerates of dispersed particles is observed in the composite structure, the number and size of which increase with the increase in the concentration of powder in the mixture.

**Keywords:** *composite, polymer, powder, filler, structure, strength, adhesion, epoxy resin.*

<i>Krechkovska H. V., Bakun B. M., Student O. Z., and Kopei I. B.</i> Impact toughness and fractographic peculiarities of fracture of a composite pump rod.....	97
---	----

The impact toughness of each component (fibreglass shell and carbon-plastic core) of the composite pump rod was evaluated, and the fractographic features of the fracture of the impact-tested samples were investigated. The fibres inside the rod shell failed by a brittle cleavage mechanism and its polymer matrix was destroyed by a ductile mechanism, with its fracture into small fragments. A specific feature of the rod core are strips of unidirectional carbon fibres with periodic reorientation, changing the direction of crack propagation at the transitions between adjacent strips. This structurally conditioned reorientation of the fracture surface inside the rod core retarded the fracture of both the core material and the rod as a whole.

**Keywords:** *composite pump rod, impact test, fractographic features, fracture mechanism.*

<i>Trush V. S., Pohrelyuk I. M., Luk'yanenko A. G., Kravchyshyn T. M., Fedirko V. M., Korendii V. M., and Kovalchuk I. V.</i> Kinetics of gas carburizing of Zr–1% Nb alloy.....	104
--	-----

The kinetic characteristics of thin-sheet (~ 1 mm) Zr–1%Nb alloy samples after treatment in a carbon-containing gas medium ( $P_{Ar+C_3H_8} = 0.106$  Pa) in a wide temperature range of 650...850°C and time 1; 5 and 10 h are investigated. It is determined that the carburizing of the alloy at temperatures of 650 and 750°C occurs according to a law close to linear ( $n \approx 1$ ), and at 850°C according to a law close to parabolic ( $n \approx 2$ ). It was established that the activation energy of carburization of the alloy in the temperature range of 650...850°C at the partial pressure of propane  $p_{C_3H_8} = 0.018$  Pa is 2.21 kJ/mol. The distribution of microhardness and structure of the near-surface layers of the alloy is shown. The microstructure of the near-surface layers of the alloy after carburizing is determined. The content of  $\alpha$ -Zr and ZrC phases on the alloy surface after treatment in a carbon-containing gas medium is presented.

**Keywords:** *Zr–1%Nb alloy, carburization, surface layer, microstructure, mass change kinetics, microhardness, crystal lattice parameters.*

<i>Hnatenko I. O., Andreiev I. V., Lysovenko S. O., Roik O. S., Tsysar M. O., and Kosenchuk T. O.</i> Change of microstructure and properties of WC–Co hard alloy as a result of high-pressure and high-temperature treatment.....	111
--	-----

The change in the structure and physicommechanical properties of sintered binding WC–6Co, WC–15Co carbides as a result of action of high pressure (8 GPa) and high temperature (HPHT) in the Toroid installation is investigated. It is established that as a result of HPHT treatment at temperatures above the melting point of the metal binding phase there is a decrease in the coercive force of the experimental alloys due to the growth of the carbide grain of the alloy. In alloys with a higher content of the binding phase,  $Co_3W$ ,  $Co_6W_6C$  intermetallic phases and oxide of the  $Co_2O_3$  type are formed. The hardness of the treated of WC–6Co alloy samples decreases due to the growth of the alloy carbide grain, and the hardness of the treated WC–15Co samples increases due to the formation of intermetallic phases.

**Keywords:** *hard alloy, barothermal treatment, high pressure installation, structure, hardness, X-ray phase analysis.*

<i>Teslia S. Yu., Kucher O. S., Bogomol Yu. I., Loboda P. I., and Solodkyi Ye. V.</i> Induction zone sintering of WC–8Co hard alloy.....	119
--	-----

A new method of the WC–8Co hard alloy sintering is proposed, which consists in sintering a pre-pressed, porous billet moving with a given speed through an induction heating zone of a given temperature. The effect of the sintering temperature in the range of 1200... 1380°C on the microstructure, local chemical and phase composition of the carbide is studied. It is found that induction zone sintering in the presence of a liquid phase does not cause the growth of carbide grains. It is shown that the grain size of tungsten carbide sintered in the temperature range of 1240...1280°C and movement speed of 3 mm/min decreases from 3.9 μm to 1.9 μm, and an increase in the workpiece displacement rate from 3 to 6 mm/min promotes the formation of the η-phase, presumably due to a large temperature gradient. The grinding of the structure causes a monotonic increase in the HV1 hardness from 417 to 664.

**Keywords:** *hard alloy, temperature gradient, sintering, grain size hardness.*

*Sydorchuk O. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Geybat Oglu Askerov M., and Bondarchuk V. I. Temper brittleness of die 4X4H5M4Φ2 steel.....125*

Heat-treated 4X4H5M4Φ2 steel with adjustable austenitic transformation during operation was studied. The temperature range (450...500°C) in which the tempering brittleness of this steel was manifested was established. The impact toughness of the samples after different tempering temperatures and after steel hardening from 1100°C was determined and it was shown that after tempering at 475°C the minimum value of the impact toughness at room temperature (15 J/cm<sup>2</sup>) was reached. The role of Ni as a Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub> replacement element was analyzed, and the segregation along the grain boundaries of the M<sub>6</sub>C carbide phase in the solid solution, which caused a decrease in the impact toughness and an increase in the brittleness of steel was recorded.

**Keywords:** *steel, heat treatment, phase composition, crystal structure, mechanical properties.*

#### JUBILEES

**Vasyl Ivanovych Pokhmurskii** (to the 90<sup>th</sup> birthday).....129