

РОЗВИТОК ДОСЛІДЖЕНЬ КОРОЗІЇ ТА КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ МЕТАЛІВ І МЕТОДІВ ЇХ ЗАХИСТУ (Огляд)

В. І. ПОХМУРСЬКИЙ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Подано стислий огляд основних досліджень різних аспектів корозії та корозійно-механічного руйнування металів, виконаних передовсім у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України. Зокрема, встановлено основні закономірності і механізми корозійного розтріскування, корозійної втоми, фретинг-корозії металів залежно від їх структури і умов взаємодії з корозивним середовищем. Наведено результати випробувань з інгібіторного захисту металів, а також з розробки металевих і неметалевих захисних покриттів тощо.

Ключові слова: *корозія, корозійно-механічне руйнування, корозійне розтріскування, корозійна втома, інгібіторний захист, захисні металеві і неметалеві покриття.*

Корозія металів – одна із найпоширеніших причин передчасного, часто аварійного, виходу з ладу машин, апаратів, інженерних комунікацій, будівельних конструкцій, транспортної техніки, що зумовлює величезні матеріальні збитки в різних галузях промисловості. Переважна більшість деталей машин, апаратів, металевих будівельних конструкцій експлуатуються за одночасної дії механічних навантажень і агресивних середовищ, що пришвидшує руйнування металу. Тобто виникає явище синергізму, яке проявляється у підсиленні корозії металу через вплив на нього механічних напружень і в полегшенні деформування і руйнування металу під впливом середовища. Небезпека такого виду руйнування у тому, що воно протікає переважно без помітних ознак макродеформації і зміни стану поверхні виробів.

Дослідження корозійно-механічного руйнування металів (КМРМ) в Україні, зокрема у Фізико-механічному інституті НАН України (ФМІ), започаткував Г. В. Карпенко у 50-х роках минулого сторіччя [1–4] і продовжили його учні та послідовники (Ю. І. Бабей, І. І. Василенко, А. Б. Куслицький, Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський, В. І. Ткачов, М. С. Хома та ін.).

Вони встановили загальні закономірності впливу різних робочих поверхнево-активних і корозивних, у тому числі наводнювальних, середовищ на корозійне розтріскування (КР), корозійну втому, фретинг-корозію, тобто на міцність та довговічність конструкційних матеріалів залежно від їх будови та умов навантаження. Це був перший важливий етап вивчення КМРМ, який вивів ФМІ в ряд провідних дослідницьких центрів з цієї проблематики не тільки в Україні, але і в колишньому СРСР.

Починаючи з 60-х років минулого століття, в Інституті з позицій механіки руйнування почали інтенсивно досліджувати механізми і закономірності розвитку корозійних тріщин у матеріалі, послабленому гострими концентраторами напружень та іншими тріщиноподібними дефектами (В. В. Панасюк, О. Є. Андрейків, І. М. Дмитрах, Г. М. Никифорчин, О. П. Осташ, Л. В. Ратич, О. М. Романів, С. Я. Ярема та ін.), що дало можливість по-новому прогнозувати ресурс безаварійної експлуатації металевих конструкцій.

Значну увагу тут приділяли дослідженню електрохімічними методами початкового періоду КМРМ; вивченню закономірностей впливу умов навантаження на зміну електродного потенціалу, струму корозії та опору. На основі одержаних результатів виявляли кінетику зародження і розвитку корозійних тріщин під час КМРМ (Г. В. Карпенко, І. І. Василенко, Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський, М. С. Хома, Г. М. Никифорчин, І. М. Дмитрах, О. Т. Цирульник).

Нижче подано стислий огляд досліджень різних аспектів корозії та КМРМ, виконаних в Інституті.

Корозійне розтріскування. На основі результатів комплексних досліджень механізму руйнування металів за їх статичного навантаження у різних корозивних середовищах Г. В. Карпенко вперше запропонував адсорбційно-електрохімічну гіпотезу КР металів [5], яку розвинули його учні і послідовники [6–9].

У 70–80-х роках минулого століття І. І. Василенко, Р. К. Мелехов, Г. М. Круцан та ін. [10–12], досліджуючи КР низько- та середньоміцних сталей, титанових і алюмінієвих сплавів, а також системи метал–середовище, встановили основні залежності їх схильності до КР та інтенсивності дифузії водню в метал від потенціалів поляризації та рН середовища. Виявили, що для більшості таких систем схильність до КР залежить від параметрів поляризації так:

- вуглецеві та низьколеговані пластичні сталі в лужних розчинах розтріскуються за потенціалів активно-пасивного переходу; метал практично не абсорбує водень [12, 13];

- опірність титанових сплавів КР у хлоридних розчинах різко знижується у вузькому діапазоні катодних потенціалів, що відповідають активно-пасивному переходу, а у вершині гострокінцевого дефекту або зародкової тріщини рН розчину зменшується до 2 [12];

- алюмінієві сплави у хлоридному розчині розтріскуються під час анодної поляризації, коли порушується стабільність пасивувальної плівки (в мікрodefекті або зародковій тріщині, де корозивне середовище локально підкиснюється, рН падає нижче 3, а потік водню у метал зростає) [6, 13].

Вже відомо понад 250 систем метал–середовище, для яких за певних умов можливе КР металу [13]. На початку 80-х років зафіксували численні крихкі бездеформаційні пошкодження елементів котлів ТЕС, випадки КР шпильок кріплення кришок та фланців колекторів парогенераторів блоків ВВЕР-440 АЕС, дисків та роторів парових турбін. Тому у ФМІ почали з'ясовувати причини та механізм цих пошкоджень і розробляти методи їх попередження [13, 14]. Виявили і пояснили неописаний на той час у літературі факт катастрофічного зниження тривкості хромонікелевої нержавкої аустенітної сталі у лужному розчині у присутності бісульфиду молібдену як складника високотемпературного мастила для різьбових з'єднань обладнання АЕС: сталь розтріскувалась навіть без напружень за декілька десятків годин [15].

У 1980 р. в Інституті спільно з “ЦНДІ технології машинобудування” (Москва) створено міжгалузеву лабораторію для вивчення корозійної тривкості конструкційних реакторних матеріалів АЕС у теплоносії за робочих тисків і температур. На сконструйованому автоклавному обладнанні одержано кількісні дані про вплив води борного регулювання високих параметрів (температура до 300°C, тиск до 18 МПа) на тріщиностійкість корпусних реакторних сталей [16–19].

Встановлено взаємозв'язок між електрохімічними характеристиками сталей та швидкістю росту корозійно-втомних тріщин. Виявлено, що температурні залежності різниць потенціалів між свіжооновленою (наприклад, вершини тріщини) та запасованою (її береги) поверхнями та струму тієї ж гальванопари задовільно корелюють із температурними залежностями швидкості росту корозійно-

втомних тріщин, яка з підвищенням температури до ~ 150...200°C збільшується, а далі монотонно знижується.

Вперше експериментально виявлено феномен анодного наводнювання мало-вуглецевих трубних сталей у карбонат-бікарбонатних розчинах в області критичних потенціалів КР, запропоновано модель їх руйнування в цих розчинах із урахуванням дії водню [20–22]. Встановлено відмінність у механізмах руйнування під статичним навантаженням низьколегованих трубних сталей у сірководневих водних та вуглеводневих середовищах.

Розкрито особливості КР аустенітно-феритних сталей та їх зварних з'єднань у хлоридно-сірководневих електролітах. Виявлено, що корозійні тріщини в них зароджуються переважно від пітингів в аустенітній фазі, але розвиваються за крихким механізмом у високоміцному легованому фериті [23, 24].

Щоб підвищити корозійно-ерозійну тривкість деталей запірної та фонтанної арматури свердловин у сірководневих середовищах, обґрунтували вибір для них сплавів зі спеціальними властивостями. З'ясували, що з'єднання сталь–наплавлений метал на основі нікелю (кобальту) нечутливі до розтріскування, ініційованого воднем, та міжкристалітної корозії. Отримані результати стали підґрунтям для розробки та впровадження разом з ІЕЗ ім Є. О. Патона НАН України способу плазмового наплавлення деталей нафтогазової запірної арматури, розрахованої на тиск 35 МПа, за високого вмісту сірководню у видобувному продукті.

Корозійна втома. До цього небезпечного виду руйнування, яке відбувається за одночасного впливу на метал корозивних середовищ і циклічних навантажень, схильні практично усі конструкційні сплави на основі заліза, алюмінію, магнію, титану, міді тощо [3, 25–30]. Г. В. Карпенко встановив основні закономірності корозійної втоми та запропонував адсорбційно-електрохімічну теорію, яка пояснює вплив рідких середовищ різної агресивності з урахуванням адсорбції та наводнювання металу на зниження опору сталей втомі [2–4]. Встановили, що найбільший опір корозійно-втомному руйнуванню чинять вуглецеві та низьколеговані сталі з трооститною структурою, найменший – з мартенситною. Перлітно-феритна та сорбітна структури займають проміжне положення.

Відомо, що міцність деталей з одного і того ж металу зі збільшенням їх розміру знижується (прояв масштабного ефекту). Це явище детально вивчено для різних металів під навантаженням у повітрі. Систематичні дослідження масштабного ефекту під час корозійної втоми започаткували Г. В. Карпенко і його учні. Для цього в Інституті за підтримки ЦНДІ “Прометей” створили унікальну експериментальну базу, що не мала аналогів у колишньому СРСР [28]. Тут вивчали корозійну втому геометрично подібних зразків діаметром від 3 до 200...250 mm та товщиною від 2 до 100 mm під однаковим навантаженням. На цьому устаткування вперше встановили інверсію масштабного ефекту під час корозійної втоми зразків з вуглецевих, низьколегованих сталей та алюмінієвих сплавів у такому широкому діапазоні їх розмірів [3, 29, 30]. Виявили, що під циклічним навантаженням у корозивному середовищі зі збільшенням поперечного перерізу зразків умовна границя корозійної втоми підвищується, а у повітрі знижується. Якщо корозивне середовище різко зменшує умовну границю корозійної втоми, то чітко проявляється інверсія масштабного ефекту. Для високолегованих аустенітних сталей та титанових сплавів у цих середовищах такої інверсії не зафіксували, хоча дещо знижується умовна границя втоми проти випробувань у повітрі [30]. Тобто ступінь прояву інверсії масштабного ефекту під час корозійної втоми залежатиме від відносної агресивності корозивного середовища для конкретного металу: що негативніший вплив середовища на опірність металу втомному руйнуванню, то більша інверсія масштабного ефекту під час корозійної втоми металу і, навпаки.

За результатами ранніх комплексних досліджень, виконаних в Інституті, сформульовані такі загальні концепції корозійної втоми.

- Відсутня дійсна границя втоми. Зі збільшенням кількості циклів розмах руйнівного циклічного напруження постійно знижується, тому можна говорити тільки про умовну границю втоми, коли задана кількість циклів навантажень (рис. 1). Тут слід врахувати, що за високого циклічного навантаження корозивне середовище може як зменшувати, так і збільшувати кількість циклів навантаження зразків до руйнування. Останнє пов'язано з охолоджувальним впливом середовища на зразки, які помітно нагріваються за високих навантажень, а знеміцнювальний електрохімічний чинник за короткий час ще недостатньо проявляється.

- Відсутня кореляція між границями міцності і втоми у повітрі та умовною границею корозійної втоми (рис. 2).

- Не виявлено зв'язку між швидкістю корозії у ненапруженому стані та умовною границею корозійної втоми.

- Циклічна довговічність під час корозії суттєво залежить від частоти та форми циклів навантаження; тоді як у повітрі зміна частоти навантаження від 10^2 до 10^4 cycles/min відчутно не впливає на неї.

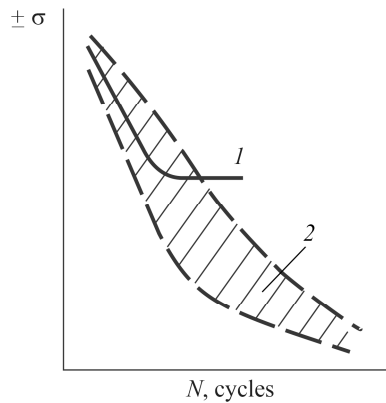


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Типові криві втоми сталей і сплавів у повітрі (1) та 3%-му розчині NaCl (2).

Fig. 1. Typical fatigue curves of steels and alloys in air (1) and in 3% NaCl solution (2).

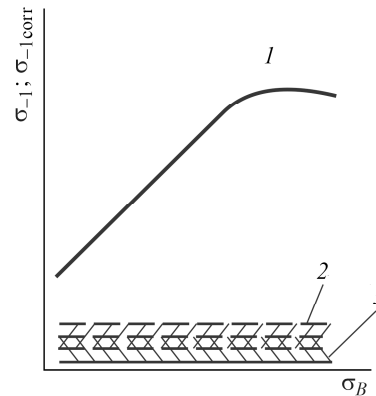


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Залежність границі втоми (σ_{-1}) та умовної границі корозійної втоми (σ_{-1corr}) від границі міцності (σ_B) у повітрі (1) та 3%-му розчині NaCl: 2 – нержавкі сталі; 3 – вуглецеві.

Fig. 2. Dependence of fatigue limit (σ_{-1}) and conditional corrosion fatigue limit (σ_{-1corr}) on ultimate strength of steels in air (1) and 3% NaCl solution: 2 – stainless steels; 3 – carbon steels.

Встановлено [31], що різні механічні обробки, забезпечуючи однакову мікрогеометрію поверхні деталі (силове та швидкісне точіння, шліфування різними абразивними кругами), суттєво змінюють структурний і напружений стани поверхневих шарів обробленої деталі та характеристики корозійної втоми.

За впливом зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД) на корозійну втому сталей отримали надзвичайно важливі практичні результати, що чітко вказують на обмеженість дії такого зміцнення під час циклічного навантаження деталей в корозивному середовищі, особливо за фретинг-корозії, зумовленої, наприклад, насадними деталями типу втулки на валах.

Результати, одержані за великої бази випробувань (рис. 3 і 4), свідчать про обмеженість застосування ППД для підвищення корозійної витривалості. За високих напруг час до руйнування зміцнених і незміцнених зразків відрізняється

несуттєво. При $N = 10^6 \dots 5 \cdot 10^7$ cycles (тобто за найчастіше застосовуваної у лабораторній практиці бази) ефект ППД максимальний. Зі збільшенням бази випробувань корозійна витривалість зміцнених зразків знижується, особливо за наявності сталевих контактуючих елементів (рис. 4), причому в міцнішій сталі (категорія міцності КМ 100) інтенсивність зниження вища, ніж менш міцної (КМ 35). Тому поверхню деталей, призначених для тривалої експлуатації в умовах прояву корозійної втоми металів, доцільно зміцнювати, поєднуючи пластичне деформування з протикорозійним захистом за допомогою покривів, катодної поляризації тощо.

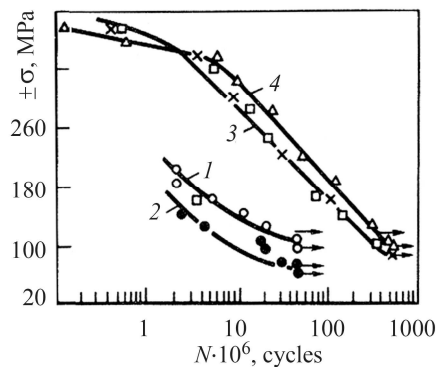


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Криві корозійної втоми зразків діаметром 60 mm зі сталі 35 у 3%-му розчині NaCl: 1 – без насадки і зміцнення; 2 – зі сталевими насадками без зміцнення; 3 – те ж саме, обкочування зі зусиллям 5,5 kN; 4 – без насадки, обкочування зі зусиллям 5,5 kN.

Fig. 3. Corrosion fatigue curves of a diameter of 60 mm made of steel 35 in 3%-NaCl solution: 1 – without top plate and strengthening; 2 – with steel top plates without strengthening; 3 – the same, running with force 5.5 kN; 4 – without top plate, running with force 5.5 kN.

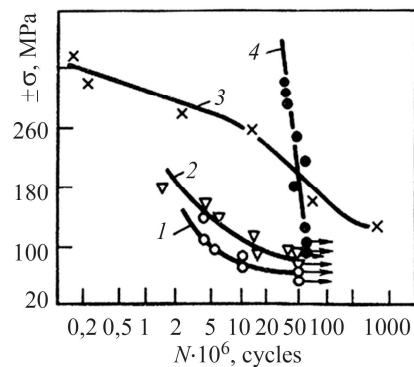


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Криві корозійної втоми зразків діаметром 50 mm зі сталі 38X2H2MA з насадками: 1 – без зміцнення (КМ 36); 2 – обкочування зі зусиллям 7 kN (КМ 36); 3 – без зміцнення (КМ 100); 4 – обкочування зі зусиллям 1,74 kN (КМ 100).

Fig. 4. Corrosion fatigue curves of the specimens of a diameter of 50 mm made of 38X2H2MA steel with top plates: 1 – without strengthening (KM 36); 2 – running with force 7 kN (KM 36); 3 – without strengthening (KM 100); 4 – running with force 1.74 kN (KM 100).

Одержані результати лягли в основу розробки і освоєння комплексу технологічних процесів виробництва великогабаритних валів для унікальних суден транспортного флоту та атомних криголамів.

У 1965 р. в Інституті на замовлення авіаційної промисловості почали досліджувати корозійну втоми нержавіжких сталей і титанових сплавів, призначених для виготовлення лопаток компресорів реактивних двигунів. Встановили, що незважаючи на високу корозійну тривкість у ненапруженому стані, опір цих сталей (особливо мартенситного класу) втомному руйнуванню за одночасного впливу корозивних середовищ суттєво знижується. Завдяки багаторічній співпраці ФМІ зі Всесоюзним інститутом авіаційних матеріалів вдалося оптимізувати режими термічної обробки і поверхневого зміцнення виробів з цих конструкційних сплавів і забезпечити необхідні корозійно-втомні характеристики.

Комплексні дослідження засвідчили, що схильність корозійнотривких сталей до корозійної втоми залежно від класу зростає в такій послідовності: аустенітний < аустенітно-феритний < феритний < аустенітно-мартенситний < мартенситно-феритний < мартенситний. Отже, сталі, які мають мартенситну структуру, найбільш схильні до корозійної втоми.

Виявили також, що зі збільшенням вмісту основних легувальних елементів, зокрема хрому та нікелю, а також їх еквівалентів в сталях одного класу схильність до корозійної втоми міняється менше, ніж за зміни структурного стану за практично однакової їх кількості. Висока корозійна витривалість сталей, що містять аустеніт, слабо залежить від концентрації елементів, які її стабілізують (Ni, Mn, N).

Найпоширенішим видом руйнування металоконструкцій є малоциклова втома, яка відрізняється від багаточислової високими напруженнями або деформацією, що зумовлює короткий час до руйнування металу (не більше 10^6 cycles) за низької частоти навантаження (менше 1 Hz). Дослідження впливу робочих середовищ на малоциклове руйнування металів також започаткували у ФМІ у 60-х роках минулого століття [32]. Експериментально встановили (Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, А. Б. Куслицький, В. І. Ткачов та ін.), що під високими навантаженнями ($\pm\sigma = \sigma_{0,2}$) вплив корозивного середовища на довговічність вуглецевих та малолегованих сталей несуттєвий або зовсім непомітний. Зі зниженням рівня циклічних навантажень такі середовища, як вода або 3%-й розчин NaCl, морська вода можуть на порядок і більше зменшувати час до руйнування зразків. При цьому довговічність металу суттєво залежить від форми циклу навантажень, вплив якої стає сильнішим майже на порядок зі зменшенням частоти навантаження від 1 до 10^{-5} Hz.

Для вивчення морської корозії напружених металевих конструкцій з урахуванням впливу продуктів життєдіяльності живих організмів, що осідають і живуть на поверхні металу, зумовлюючи його біокорозію, у 1969 р. ФМІ створив в Одесі відділ морської корозії металів під напруженням і разом з науково-дослідними установами колишнього Мінсудпрому СРСР ЦНДІ “Прометей” і ЦНДІТС заснував спеціальний дослідницький центр “Дельфін”. Тут одержали необхідні конструкторам і технологам для розроблення нової морської техніки порівняльні дані про кородування ненапружених і напружених сталей та їх зварних з’єднань у природній морській воді та 3%-му розчині NaCl, який у різних лабораторіях використовують як “штучну морську воду”.

Електрохімічні дослідження корозійно-втомного руйнування металів. У 1969 р. в Інституті вперше встановили кореляцію між зміною механічних напружень у металі і значенням його електродного потенціалу. На основі цього розробили спосіб визначення напружень у локальних ділянках поверхні металу шляхом мікроелектрохімічних випроб [33, 34]. Розвиваючи цей напрямок аналізу, виявили кореляцію між накопиченням незворотних змін структури поверхневих шарів металу під час його циклічного навантаження у корозивному середовищі та електрохімічними параметрами поверхні. Запропоновано новий метод пришвидшеного визначення опірності корозійно-втомному руйнуванню нержавіючих сталей і сплавів, здатних пасивуватися у заданих умовах експлуатації [25], а також вперше зафіксовано вплив циклічної деформації сплавів на їх селективне розчинення у корозивному середовищі.

Для розкриття механізму КМРМ оцінено електрохімічну мікрогетерогенність поверхні пластично деформованого металу [25, 35]. Встановлено, що накопичення поверхневих пошкоджень металу супроводжується зміщенням у негативний бік електродних потенціалів та збільшенням струмів корозії, що має певну стадійність (рис. 5).

За відсутності напружень відсутня поляризація і струм дорівнює нулю, а його зміна під час корозійної втоми пов’язана винятково із деформаційною активацією поверхні. На основі цих залежностей для сталей різних класів побудували типову криву $i_{\text{pol}}-N$ (рис. 5), на якій виділили окремі періоди (стадії) корозійно-втомного руйнування.

Виявили, що у найчастіше вживаних в експериментах хлоридвмісних розчинах для корозійнотривких сталей та сплавів, руйнування яких визначають пошкодження внаслідок пришвидшеного розчинення мікродеформованих ділянок поверхні, може існувати такий рівень циклічних напружень, який не викликає незворотних змін, що призводять до руйнування поверхні, тобто корозійно-втомне руйнування не відбуватиметься.

На основі цих досліджень розроблено методику пришвидшеного визначення границі корозійної втоми сталей та сплавів, руйнування яких ініціює розчинення мікродеформованих ділянок поверхні. Вона полягає в тому, що за границю корозійної втоми вважають максимальні напруження, за яких змінюється знак струму поляризації [36, 37].

Рис. 5. Типова крива залежності густини струму поляризації при $E_{pol} = E_{corr}$ від кількості циклів (часу) деформування нержавіжних сталей різних класів:
 P – прикладене циклічне навантаження;
 Q_{init} – кількість електрики, що відповідає деформаційному розчиненню металу впродовж періоду зародження тріщин;
 τ_{init} – час зародження корозійно-втомних тріщин; I – період зародження багатьох мікротріщин; II – їх підростання;
 III – ріст магістральної тріщини;
 IV – повне руйнування зразка.

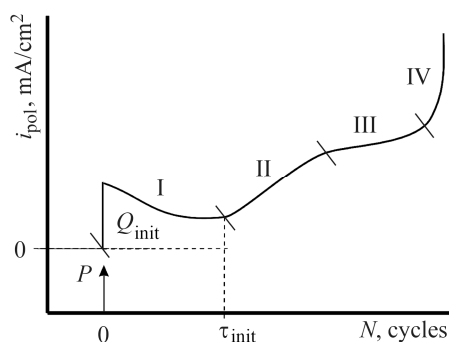


Fig. 5. Typical curves of the dependence of polarization current density $E_{pol} = E_{corr}$ on cycles (time) of the deformation of stainless steels of different grades: P – application of fatigue cyclic loading; Q_{init} – quantity of electricity which corresponds to deformational dissolution of metal for the crack initiation period; τ_{init} – time of corrosion-fatigue curves initiation; I – initiation period of many microcracks; II – their increment; III – growth of a main crack; IV – specimen final fracture.

Розпочаті у ФМІ дослідження закономірностей електрохімічних процесів під час корозійної втоми [27, 33] розвинули у своїх працях І. М. Дмитрах, Г. М. Никифорчин, В. В. Панасюк, В. І. Похмурський, А. М. Сиротюк, Л. В. Ратич, М. С. Хома, О. Т. Цирульник та ін. Їх результати дають можливість повніше розкрити природу взаємодії деформованих металів з агресивними середовищами, оцінити її активність під різними напруженнями, простежити кінетику руйнування та є основою для розробки нових методів оцінки ресурсу безаварійної експлуатації нафтохімічного та енергетичного обладнання, трубопроводного транспорту тощо [38–44].

У 80-х роках минулого століття в Інституті розпочали дослідження з комп'ютерного моделювання взаємодії металів із компонентами агресивного середовища з допомогою напівемпіричних квантово-хімічних методів у кластерному наближенні. Проаналізували особливості хемосорбції атомів та молекул водню, азоту, монооксидів азоту та вуглецю на алюмінії, залізі, нікелі, міді [45, 46] залежно від кристалографічної орієнтації поверхні, адсорбційних положень, виду адсорбції – молекулярної чи атомарної та дефектів кристалічної ґратки. Вперше теоретично встановили, що пружна деформація розтягу полегшує проникнення водню в об'єм цих металів. З подальшим розвитком розрахункових методів стало можливим моделювати складніші явища і процеси на поверхні металів, зокрема, послаблення міжатомних зв'язків поверхневих атомів, утворення поверхневих сполук, особливо оксидів металів [47]. Проаналізовано також процеси, що відбу-

ваються під час електрохімічної корозії на межі поділу метал–водний розчин електроліту (хлориду натрію), зокрема, руйнування пасивної плівки, селективне розчинення поверхні кластерів мідноцинкових та залізохромових сплавів [46–49].

Завдяки розширенню розрахункових можливостей нових доступних квантово-хімічних програм, а також удосконаленню існуючих квантово-хімічних методів вдалося змодельювати поверхневі процеси під час взаємодії металів як з газами, так і водним розчином електроліту [49]. Отримано результати, які на атомно-молекулярному рівні описують механізми фізичної адсорбції та хемосорбції, перенесення електрона з іонізацією поверхневих атомів металів та гідратації.

Захист металів від корозії та корозійно-механічного руйнування. Це важлива науково-практична проблема, розв’язанню якої в Інституті приділяють велику увагу. Тут опрацьовано методи захисту металокопункцій та продовження терміну їх безаварійної експлуатації, які базуються на створенні нових інгібіторів корозії, металевих та неметалевих покривів тощо.

Розроблені тут інгібітори ХОСП 10, КОРСОЛ тощо [50, 51] широко застосовують у різних галузях промисловості. Використано новий підхід до створення інгібіторів корозії комплексної дії, який ґрунтується на явищі внутрішньомолекулярного синергізму. Розроблено нові інгібітори на основі органічних похідних оксоаніонів d-елементів VI групи. Найефективніші них з 1,2,3-бензотриазол, тримолібдат, вольфрамат та біхромат для захисту сталей від корозії, солевідкладення та корозійно-втомного руйнування в нейтральних водних середовищах.

З відходів переробки деревини створено недорогі нетоксичні інгібітори ряду танінів, ефективні в середовищах з різним рН та перспективні в екологічних технологіях усунення солей твердості з поверхонь теплообміну енергетичних установок з їх подальшим пасивуванням, а також як модифікатори поверхні сталі перед нанесенням захисних покривів [52].

Опрацьовано нову методику оцінки захисної дії нового вітчизняного інгібітора сірководневої корозії, наводнювання та сірководневого КР Нафтохім-8, створеного НВО “Галичина”, який успішно застосовують для захисту обладнання Локачинського газового родовища, технологічний продукт якого містить домішки сірководню.

Використовуючи ефект синергізму, розробили нові екологічно чисті інгібувальні пігменти для лакофарбових матеріалів [53–56], які за ефективністю не поступаються широковживаним токсичним хроматам, від яких відмовляються у промислово розвинутих країнах. Ці дослідження лягли в основу міжнародного проекту, який ФМІ виконав спільно із НТУ “Харківський політехнічний інститут”, Університетом Манчестера (Великобританія), Інститутом хімії Угорської академії наук (Будапешт), Інститутом фізичної хімії та електрохімії ім. О. Н. Фрумкіна РАН (Москва) за програмою “ІНТАС”, а також окремого проекту на замовлення Європейського офісу аерокосмічних досліджень та розробок.

Увагу науковців привертають т.зв. “зелені” інгібітори, отримані з рослинної сировини або відходів її переробки [57–59]. Наприклад, розроблено інгібітори корозії сталі на основі екстракту шроту рапсу, що не містять токсичних сполук і відрізняються низькою вартістю за достатньо високого ступеня захисту [59]. Виділено з кори і стружки дуба екстракти та створено синергічні екологічно безпечні інгібіторні композиції на їх основі, які на 80...95% захищають вуглецеві сталі від корозії у воді [60]. Активними протикорозійними компонентами рослинних екстрактів є нетоксичні флавоноїди, алкалоїди та інші природні продукти. Таніни, целюлоза та поліциклічні сполуки в екстрактах сприяють формуванню захисної плівки на металі, зупиняючи його корозію. “Зелені” інгібітори ефективні в різноманітних корозивних середовищах на більшості металів, в тому числі і на алюмінієвих сплавах [61]. Вони діють переважно за адсорбційним механізмом, а неток-

сичність та біодеградабельність є їх головними перевагами [57]. Однак через нестабільність хімічного складу вихідної сировини їхні протикорозійні характеристики змінюються в широкому діапазоні, що обмежує їх застосування у промисловості.

Поверхнево-активні речовини (біоПАР), одержані мікробним синтезом, екологічно безпечні та економічно вигідні [62]. Через різноманітність фізико-хімічних та біологічних властивостей їх можна використовувати у нафтовидобувній, хімічній, фармацевтичній промисловості, сільському господарстві, а також для вирішення екологічних проблем. Ефективність біоПАР зумовлена здатністю за малих концентрацій суттєво знижувати поверхневий і міжфазний натяги водних розчинів, утворювати дрібнодисперсні та стабільні емульсії. За своїми основними характеристиками вони не поступаються синтетичним ПАР. Поверхнево-активний рамноліпідний біокомплекс (РБК) є продуктом біосинтезу бактеріального штаму *Pseudomonas sp.* PS-17 [63]. Це унікальна природна композиція позаклітинних рамноліпідів з полісахаридом альгінатної природи, яка ефективна за різних температур, у широкому діапазоні рН середовища і концентрацій солей, нетоксична та біодеградабельна. Встановлено протикорозійний ефект синтетичних (небіогенних) ПАР на вуглецевих сталях та алюмінієвих сплавах.

Виявили [64], що РБК та супернатант культуральної рідини штаму *Pseudomonas sp.* PS-17, який містить порівняно невеликі концентрації РБК, інгібують корозію алюмінієвого сплаву Д16Т (аналога АА 2024) у дистильованій воді та 0,1%-му розчині натрій хлориду. Ефективність інгібування збільшується з ростом їх кількості. За досягнення критичної концентрації міцелоутворення подальше підвищення вмісту біоПАР у корозивному середовищі суттєво не впливає на його захисний ефект. Зроблено припущення, що механізм інгібування корозії полягає в адсорбції молекул цих ПАР на поверхні алюмінієвого сплаву з подальшим формуванням бар'єрної плівки.

Починаючи з 60-х років минулого століття, у ФМІ вивчають вплив дифузійного насичення поверхні металів і сплавів сталей іншими елементами на структурно-напружений стан, корозійну тривкість і корозійну втому деталей [65, 66]. Уточнено механізм формування багатокомпонентних захисних шарів залежно від методів та умов насичення. Виявлено і пояснено ефект заліковування тріщиноподібних дефектів у сталях під час їх дифузійного насичення важкоплавкими металами. Покриви на основі бору вжито для захисту елементів геологорозвідувальних бурильних колон, бурових насосів, деталей сільськогосподарської техніки тощо, що експлуатуються за умов інтенсивного корозійно-абразивного зношування. Покриви на основі алюмінію впроваджені для захисту від високотемпературної газової корозії арматури термопар, деталей печей тощо.

Розроблено технологію одержання захисних дифузійних покривів з дорогоцінних металів та їх імітаторів з використанням розплавів легкоплавких металів як транспортувальних середовищ [67].

Останнім часом в Інституті виконують дослідження, спрямовані на підвищення зносо- та корозійної тривкості у сильноагресивних середовищах виробів з титанових сплавів [68, 69]. В їх основі – комплексне насичення поверхні виробів азотом, киснем, вуглецем та іншими елементами з контрольованої газової атмосфери. Цю технологію застосовують у літакобудуванні, а також для виготовлення різних імплантантів для людського організму [69].

Значну увагу тут приділяють розробці ефективних методів поверхневого зміцнення металовиробів та їх захисту від корозії і зношування, в основі яких – механоімпульсна термомеханічна обробка сталей [70, 71], плазмово-електролітична обробка поверхні алюмінію, магнію та їх сплавів [72, 73] тощо.

У 80-х роках минулого століття, вперше на той час в СРСР, у ФМІ розпочали вивчати можливості та ефективність використання порошкових електродних

дротів базової системи Fe–Cr–B–Al для створення захисних покриттів на сталевих виробках методом електродугової металізації [74, 75].

Сьогодні порошкові електродні дроти під маркою ФМІ випускають у багатьох організаціях (ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Дубровицьке РТП “Рай-агротехсервіс”, АТ “ВЕЛТЕК” та ін.) і використовують для відновлення геометричних розмірів та захисту штоків гідравлічних систем гірничошахтного обладнання, транспортної і комунальної техніки, енергетичного устаткування, деталей двигунів внутрішнього згоряння тощо [76].

Застосовуючи ці технології та обладнання, а також розроблені оригінальні матеріали, виробничі структури при ФМІ НАН України ДЦ “Львівантикор”, ДМП “Газотермік”, ДЦ “ТехноРесурс” та інші виконали низку важливих робіт з протикорозійного захисту мостів, резервуарів, трубопроводів та будівельних конструкцій, деталей транспортної та сільськогосподарської техніки [77].

РЕЗЮМЕ. Приведен сжатый обзор основных исследований разных аспектов коррозии и коррозионно-механического разрушения металлов, выполненных в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины. В частности, установлены основные закономерности и механизмы коррозионного растрескивания, коррозионной усталости, фреттинг-коррозии металлов в зависимости от их структуры и условий взаимодействия с коррозионной средой. Приведены результаты исследований ингибиторной защиты металлов, а также разработки металлических и неметаллических защитных покрытий и т. п.

SUMMARY. A brief review of the main investigations of the aspects of corrosion and corrosion-mechanical fracture of metals, carried out first of all in the Karpenko Physico-Mechanical Institute NAS Ukraine is presented. In particular, the main regularities and mechanisms of stress corrosion cracking, corrosion fatigue, fretting-corrosion of metals depending on their structure and conditions of interaction with corrosion environment are established. The results of researches on inhibitor protection of metals and also on the development of metallic and non-metallic protective coatings, etc. are presented.

1. Карпенко Г. В. Влияние активных жидких сред на выносливость стали. – К.: Изд-во АН УССР. 1955. – 208 с.
2. Карпенко Г. В. Коррозийна втома сталі. – К.: Вид-во АН УРСР, 1959. – 178 с.
3. Карпенко Г. В. Прочность стали в коррозионной среде. – М.; К.: Машгиз, 1963. – 188 с.
4. Карпенко Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – К.: Наук. думка, 1976. – 124 с.
5. Карпенко Г. В. Адсорбционно-электрохимическая гипотеза коррозии под напряжением // Физ.-хим. механика материалов. – 1972. – 8, № 6. – С. 34–38.
(Karpenko G. V. The adsorption-electrochemical hypothesis of stress corrosion // Soviet Materials Science. – 1972. – 8, № 6. – P. 676–679.)
6. Карпенко Г. В., Василенко И. И. Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Техніка, 1971. – 192 с.
7. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
8. Василенко И. И., Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Наук. думка, 1977. – 262 с.
9. Растрескивание углеродистых сталей в растворах щелочей / Г. В. Карпенко, И. И. Василенко, Р. К. Мелехов, О. Н. Чапля, Б. Т. Дядченко // ДАН СССР. – 1972. – 202, № 3. – С. 649–651.
10. Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание титановых и алюминиевых сплавов. – К.: Техніка, 1979. – 128 с.
11. Коррозионностойкие стали и сплавы для оборудования и трубопроводов АЭС / Под ред. Р. К. Мелехова. – К.: Наук. думка, 1983. – 144 с.
12. Электрохимические условия зарождения трещин в сталях, титановых и алюминиевых сплавах низкой и средней прочности / Р. К. Мелехов, И. И. Василенко, А. М. Круцан, М. В. Червоный // Физ.-хим. механика материалов. – 1987. – 23, № 3. – С. 3–13.

- (*Electrochemical conditions for crack origin in low- and medium-strength steels and titanium and aluminum alloys* / R. K. Melekhov, I. I. Vasilenko, A. M. Krutsan, and M. V. Chervonyi // *Soviet Materials Science*. – 1987. – **23**, № 3. – P. 231–240.)
13. *Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій* / В. І. Похмурський, Р. К. Мелехов, Г. М. Куцан, В. Г. Здановський. – К.: Наук. думка, 1995. – 262 с.
 14. *Вайнман А. В., Мелехов Р. К., Смян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1990. – 268 с.
 15. *Круцан Г. М., Мелехов Р. К.* Корозійні пошкодження енергетичного обладнання // *Новини енергетики*. – 1998. – № 7. – С. 15–25.
 16. *Установка для исследования электрохимических свойств поверхностей металла в коррозионных средах при высоких температурах и давлениях* / В. И. Похмурский, И. П. Гып, И. Н. Антошак, О. С. Калахан, И. З. Дуцяк, Э. И. Лычковский, Е. И. Мамаева // *Защита металлов*. – 1991. – № 1. – С. 516–518.
 17. *Похмурский В. И., Гып И. П., Антошак И. Н.* Электрохимические свойства сталей АЭС в реакторной воде при 90...300°C // *Защита металлов*. – 1994. – № 3. – С. 271–275.
 18. *Похмурський В. І., Антошак І. М.* Методи електрохімічних досліджень металів у високотемпературних водних середовищах. – Львів: Сполом, 2010. – 152 с.
 19. *Похмурський В. І., Гып І. П., Лычковський Е. І.* Вплив забруднення теплоносія на ресурс елементів блоків АЕС // *Фіз-хім. механіка матеріалів*. – 2000. – **36**, № 5. – С. 19–30.
(*Pokhmur'skyi V. I., Gyp I. P., and Lychkovs'kyi E. I.* Pollution of the heat carrier and its influence on the service life of power-generating units of nuclear power plants // *Materials Science*. – 2000. – **36**, № 5. – P. 653–668.)
 20. *Мелехов Р. К., Похмурський В. І.* Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: Наук. думка, 2003. – 382 с.
 21. *Гірний С. І.* Анодне наводнювання заліза в карбонат-бікарбонатному розчині // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2001. – **37**, № 3. – С. 103–110.
(*Hirnyi S. I.* Anodic hydrogenation of Iron in a carbonate-bicarbonate solution // *Materials Science*. – 2001. – **37**, № 3. – P. 491–498.)
 22. *Гірний С. І.* Електроабсорбція водню залізом, анодно поляризованим у карбонат-бікарбонатному розчині // *Вісник Львів. ун-ту ім. Івана Франка. Сер. хім.* – 2001. – Вип. 40. – 2001. – С. 276–279.
 23. *Мелехов Р. К., Тубілевич К., Гірний С. І.* Проблема сірководневого та карбонатного розтріскування магістральних трубопроводів // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2001. – № 1. – С. 37–45.
 24. *Вибір сталі для корпусних деталей фонтанної арматури, яка експлуатується в сірководневих середовищах* / Г. Круцан, В. Шевцов, О. Радкевич, Л. Пузрін, М. Чучман, М. Полещук // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій* / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 953–958.
 25. *Похмурський В. І., Хома М. С.* Корозійна втома металів та сплавів. – Львів: Сполом, 2008. – 302 с.
 26. *Степуренко В. Т.* Исследование коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности стали 45 в природной сероводородной воде Роздольского серного месторождения и других средах. – Львов: Изд. Ин-та машиноведения и автоматики АН УССР, 1958. – 84 с.
 27. *Похмурский В. И., Крохмальный А. М.* Электрохимические аспекты коррозионной усталости металлов // *Тр. I Сов.-англ. сем. "Коррозионная усталость металлов"*. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 101–120.
 28. *А.с. № 356512 (СРСР).* Машина для испытаний на усталость / Г. В. Карпенко, Р. Г. Погорецкий, В. И. Похмурский. – Опубл. 28.07.72; Бюл. № 32.
 29. *Похмурский В. И.* Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – К.: Наук. думка, 1974. – 188 с.
 30. *Похмурский В. И.* Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
 31. *Карпенко Г. В., Яцюк А. І.* Вплив обробки поверхні на втомну міцність сталі в активних рідинних середовищах. – К.: Вид-во АН УРСР, 1957. – 116 с.
 32. *Малоцикловая усталость стали в рабочих средах* / Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, И. В. Кокотайло, В. П. Руденко. – К.: Наук. думка, 1977. – 110 с.

33. *Определение напряжений в микрообъемах металла с помощью электродного потенциала* / Г. В. Карпенко, И. Е. Замостяник, Ю. И. Бабей, В. И. Похмурский // Физ.-хим. механика материалов. – 1969. – 5, № 5. – С. 635–636.
(*Determination of stresses in metal microvolumes by electrode potential measurements* / G. V. Karpenko, I. E. Zamostyanik, Yu. I. Babei, and V. I. Pokhmurskii // Soviet Materials Science. – 1969. – 5, № 5. – P. 529–530.)
34. *А. с. 308315 (СССР), МПК G 01/ 1/20. Способ определения механических напряжений* / Г. В. Карпенко, И. Е. Замостяник, Ю. И. Бабей, В. И. Похмурский. – Оpubл. 01.07.71; Бюл. № 21.
35. *Похмурский В. И. Общие аспекты коррозионной усталости металлов и сплавов* // Тр. I Сов.-англ. сем. “Коррозионная усталость металлов”. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 86–101.
36. *О влиянии циклических напряжений на селективное растворение сплавов* / В. И. Похмурский, М. С. Хома, И. Н. Антошак, И. Я. Лапка // Защита металлов. – 1996. – № 3. – С. 246–251.
37. *Патент України № 50573А. Спосіб визначення границі корозійної втоми корозійно-стійких сталей* / В. І. Похмурський, М. С. Хома, А. В. Залужець. – Оpubл. 15.10.2002; Бюл. № 10.
38. *Панасюк В. В., Ратыч Л. В., Дмитрах И. Н. Методика определения электрохимического состояния в вершине трещины при испытаниях конструкционных материалов на трещиностойкость в коррозионных средах* // Завод. лаборатория. – 1984. – 50, № 7. – С. 56–59.
39. *Панасюк В. В., Ратыч Л. В., Дмитрах И. Н. Зависимость скорости роста усталостной трещины в водной коррозионной среде от электрохимических условий в вершине трещины* // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – 19, № 4. – С. 33–37.
(*Panasyuk V. V., Ratych L. V., and Dmytrakh I. M. Relationship of fatigue-crack growth rate in an aqueous corrosive medium to the electrochemical conditions at the crack tip* // Soviet Materials Science. – 1983. – 19, № 4. – P. 286–289.)
40. *Никифорчин Г. М., Цирульник О. Т., Греділь М. І. Чутливість механічних, корозійно-механічних та електрохімічних властивостей до експлуатаційної деградації сталей магістральних трубопроводів* // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: Ін-т електрозварювання ім. О. Є. Патона НАН України, 2009. – С. 29–32.
41. *Панасюк В. В., Романив О. Н. Механика коррозионно-усталостного разрушения* // Коррозионная усталость металлов. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 39–66
42. *Романив О. М. Механіка корозійного руйнування: перші підсумки та перспективи* // Вісник АН УРСР. – 1981. – № 2. – С. 29–41.
43. *Panasyuk V. V. and Dmytrakh I. N. Brittle fracture mechanics of materials in corrosive environments* // Vortage zur 17. Metalltagung “Umgebungsabhängiges Bruchverhalten”, Dresden, 29–31 Oct., 1990. – Dresden: Informationsgesellschaftsverlag, 1991. – P. 43–70.
44. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Довідн. пос. Т. 6: Електрохімічні методи моніторингу деградації матеріалу конструкцій* / В. І. Похмурський, І. М. Дмитрах, М. С. Хома, О. Т. Цирульник, І. М. Зінь, М. Д. Сахненко, Ю. С. Герасименко / За заг. ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Простір–М, 2017. – 298 с.
45. *Похмурский В. И., Копылец В. И., Ковальчук Е. П. Влияние деформации кристаллической решетки меди на адсорбцию атомарного водорода* // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – 20, № 3. – С. 39–41.
(*Pokhmur'skyi V. I., Kopylets' V. I., and Koval'chuk E. P. Influence of deformation of the crystalline lattice of copper on the adsorption of atomic hydrogen* // Soviet Materials Science. – 1984. – 20, № 3. – P. 237–239.)
46. *Похмурський В. І., Копилець В. І. Комп'ютерні дослідження хемосорбції на деформованих металах* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1993. – 29, № 6. – С. 7–15.
(*Pokhmur'skyi V. I. and Kopylets' V. I. Computer simulation of chemisorption on strained metals* // Materials Science. – 2004. – 29, № 6. – P. 559–568.)
47. *Дослідження впливу деформації металу на взаємодію з середовищем на атомному рівні* / В. І. Похмурський, В. І. Копилець, О. І. Балицький, С. А. Корній // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1996. – 32, № 3. – С. 16–19.

- (*Investigation of the effect of deformation of metals on their interaction with media on the atomic level / V. I. Pokhmur'skyi, V. I. Kopylets', O. I. Balyts'kyi, and S. A. Kornii // Materials Science. – 2004. – 32, № 3. – P. 267–271.*)
48. *Похмурський В. І., Копилець В. І., Корній С. А.* Квантово-хімічне моделювання селективного розчинення латуні та цинк-алюмінієвого сплаву // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – **34**, № 2. – С. 29–33.
(*Pokhmur'skyi V. I., Kopylets' V. I., and Kornii S. A. Quantum-chemical simulation of selective dissolution of brass and zinc-aluminum alloy // Materials Science. – 1998. – 34, № 2. – P. 174–179.*)
49. *Похмурський В. І., Корній С. А., Копилець В. І.* Моделювання взаємодії водного електроліту з металами: молекулярно-динамічний підхід // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 5. – С. 7–12.
(*Pokhmur'skyi V. I., Kopylets' V. I., and Kornii S. A. Modeling of the interaction of an aqueous electrolyte with metals: molecular-dynamic approach // Materials Science. – 2004. – 40, № 5. – P. 579–584.*)
50. *Гутман Э. М., Миндюк А. К., Карпенко Г. В.* Об эффективности некоторых ингибиторов коррозии под напряжением // Физ.-хим. механика материалов. – 1965. – **1**, № 5. – С. 535–538.
(*Gutman E. M., Mindyuk A. K., and Karpenko G. V. Efficiency of some stress-corrosion inhibitors // Soviet Materials Science. – 1965. – 1, № 5. – P. 371–373.*)
51. *Миндюк А. К., Гутман Э. М., Карпенко Г. В.* О роли органических ингибиторов в раздельном торможении процессов коррозии и наводороживания стали в серной кислоте // Физ.-хим. механика материалов. – 1966. – **2**, № 4. – С. 441–449.
(*Mindyuk A. K., Gutman E. M., and Karpenko G. V. The role of organic additives in inhibiting corrosion and hydrogen-charging of steel in sulfuric acid // Soviet Materials Science. – 1966. – 2, № 4. – P. 316–322.*)
52. *Слободян З. В., Купович Р. Б., Маглатюк Л. А.* Вплив екстрактів таніну на корозійну тривкість сталі 20 у водогінній воді та 5% HCl // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 4. – С. 120–121.
(*Slobodyan Z. V., Kupovych R. B., and Mahlatyuk L. A. Influence of tannin extracts on the corrosion resistance of 20 steel in tap water and in 5% HCl // Materials Science. – 2009. – 45, № 4. – P. 609–611.*)
53. *Комплексні модифікатори для поліпшення захисних властивостей кремнієорганічних покривів / В. І. Похмурський, І. М. Зінь, Л. М. Білий, М. Б. Ратушна, І. П. Гнип // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – 41, № 5. – С. 85–89.*
(*Complex modifiers for the improvement of protective properties of silicon-organic coatings / V. I. Pokhmur'skyi, I. M. Zin', L. M. Bilyi, M. B. Ratushna, and I. P. Gnyup // Materials Science. – 2005. – 41, № 5. – P. 660–665.*)
54. *The effect of inhibiting pigments on corrosion and environmentally assisted cracking of mild steel / V. I. Pokhmurskii, I. M. Zin, L. M. Bily, M. B. Ratushna // Inzynieria Powierzchni (Surf. Eng.). – 2005. – № 2A. – P. 177–181.*
55. *Contradictory effect of chromate inhibitor on corrosive wear of aluminium alloy / V. I. Pokhmurskii, I. M. Zin, V. A. Vynar, L. M. Bily // Corr. Sci. – 2011. – 53. – P. 904–908.*
56. *Дослідження інгібування локальної корозії дюралюмінієвого сплаву нехроматними пігментами / І. М. Зінь, В. І. Похмурський, С. Б. Лайон, Л. М. Білий, М. Б. Тимусь // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, № 4. – С. 5–11.*
(*A study of the inhibition of local corrosion of a duralumin alloy by nonchromate pigments / I. M. Zin', V. I. Pokhmur'skyi, S. B. Lyon, L. M. Bilyi, and M. B. Tymus' // Materials Science. – 2009. – 45, № 4. – P. 465–472.*)
57. *Green Inhibitors for Corrosion of Metals: A Review / Devarayan Kesavan, Mayakrishnan Gopiraman, Nagarajan Sulochana // Chemical Sci. Rev. and Let. – 2012. – 1, № 1. – P. 1–8.*
58. *Захисна дія композицій на основі фосфату та рамноліпідного біокомплексу на механічно активованій поверхні алюмінієвих сплавів // І. Зінь, О. Карпенко, О. Хлопик, М. Тимусь, Б. Литвин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – Спецвип. № 12. – С. 205–210.*
(*Increased stress-corrosion resistance of a carbon steel U8 as a result of surface decarburization / I. I. Vasilenko, N. Ya. Yaremchenko, V. I. Pokhmurskii, G. V. Karpenko // Materials Science. – 1968. – 4, № 1. – P. 38–40.*)

59. Чигиринец Е. Э., Воробьева В. И., Бережницкая А. С. Исследования химического состава спиртового экстракта шрота рапса // Химия растительного сырья. – 2014. – Вып. 1. – С. 209–214.
60. Композиції на основі екстрактів з кори та стружки дуба – інгібітори корозії середньо-вуглецевих сталей у воді / З. В. Слободян, Л. А. Маглатюк, Р. Б. Купович, Я. М. Хабурський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 5. – С. 58–66.
(Compositions based on the extracts of oak bark and chips as corrosion inhibitors for medium-carbon steels in water / Z. V. Slobodyan, L. A. Mahlatyuk, R. B. Kupovych, and Ya. M. Khaburs'kyi // Materials Science. – 2014. – 50, № 5. – P. 687–697.)
61. Novel plant extracts as green corrosion inhibitors for 7075-t6 aluminium alloy in an aqueous medium / A. Howida Fetouh, Tarek M. Abdel-Fattah, Mohamed S. El-Tantawy // Int. J. Electrochem. Sci. – 2014. – 9. – P. 1565–1582.
62. Assessment of toxicity of biosurfactants produced by *Pseudomonas* PS-17 // Ekotoksykologia w ochronie srodowiska / B. Kolwzan Biazik J., A. Czarny, E. Zaczynska, E. Karpenko // Wyd. PZITS nr 884. – 2008. – P. 191–196.
63. Карпенко Е. В., Шульга А. Н., Туровский А. А. Поверхностно-активные соединения культуры *Pseudomonas species* PS-17 // Микробиол. журн. – 1996. – 58, № 5. – С. 18–24.
64. Інгібувальна дія біогенних поверхнево-активних речовин у корозивних середовищах / В. І. Похмурський, О. В. Карпенко, І. М. Зінь, М. Б. Тимусь, Г. Г. Веселівська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 3. – С. 122–127.
(Inhibiting action of biogenic surfactants in corrosive media / V. I. Pokhmurs'kyi, O. V. Karpenko, I. M. Zin', M. B. Tymus', and H. H. Veseliv'ska // Materials Science. – 2014. – 50, № 3. – P. 448–453.)
65. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий / Г. В. Карпенко, В. И. Похмурский, В. Б. Далисов, В. С. Замиховский. – К.: Наук. думка, 1971. – 168 с.
66. Похмурский В. И., Далисов В. Б., Голубец В. Д. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. – К.: Наук. думка, 1980. – 188 с.
67. Максимович Г. Г., Шатинский В. Ф., Гойхман М. С. Диффузионные покрытия драгоценными металлами. – К.: Наук. думка, 1978. – 168 с.
68. Федірко В. М., Погрелюк І. М. Азотування титану та його сплавів. – К.: Наук. думка, 1995. – 222 с.
69. Федірко В. М., Погрелюк І. М., Яськів О. І. Термодифузійне багатоконпонентне насичення титанових сплавів. – К.: Наук. думка, 2009. – 166 с.
70. Бабей Ю. И., Сопрунюк Н. Г. Защита стали от коррозионно-механического разрушения. – К.: Техніка, 1981. – 126 с.
71. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наук. думка, 1988. – 238 с.
72. Juliet Ippolito “Electrochemical Characteristics of PEO Treated Electric Arc Coatings on Lightweight Alloys” / Н. М. Nykyforchyn, V. I. Pokhmurskii, M. D. Klapkiv, M. M. Student // Adv. Mat. Res. – 2010. – 138. – P. 55–62.
73. Plasma Electrolytic Oxidation of Arc-Sprayed Aluminum Coatings / V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, A. Wank // J. of Thermal Spray Technology. – December 2007. – 16, Issue 5–6. – P. 998–1004.
74. Похмурский В. И., Студент М. М., Пух В. С. Основы формирования защитных и восстановительных покрытий электродуговым напылением из порошковых проволок // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1986. – 22, № 6. – С. 11–16.
(Pokhmur'skyi V. I., Student M. M., and Pikh V. S. Fundamentals of the formation of protective and repair coatings by electric arc spraying of powder wires // Soviet Materials Science. – 1986. – 22, № 6. – P. 548–553.)
75. Електродугові відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Г. В. Похмурська, І. Й. Сидорак. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. – 192 с.
76. Похмурська Г. В., Студент М. М., Похмурський В. І. Газотермічні покриття: Навч. пос. – Львів: Простір-М, 2017. – 180 с.
77. Похмурський В. І., Сидорак І. Й., Студент М. М. Реалізація наукових розробок у сучасних умовах. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2013. – 60 с.

Одержано 12.06.2018