

**ЗАСНУВАННЯ НАУКОВОГО НАПРЯМКУ  
«ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ» В УКРАЇНІ  
(до 110 річчя від дня народження Г.В.Карпенка)**

**INITIATION OF THE SCIENTIFIC DIRECTION «PHYSICO-CHEMICAL  
MECHANICS OF MATERIALS» IN UKRAINE  
(to the 110th anniversary of birth H.V.Karpenko)**

**ABSTRACT**

A brief overview of the main research on various aspects of physico-chemical mechanics of materials, in particular corrosion and corrosion-mechanical destruction of metals, initiated by H.V. Karpenko in Ukraine was described. The basic laws and mechanisms of corrosion cracking, corrosion fatigue, fretting corrosion of metals depending on their structure and conditions of interaction with the corrosive environment, and also inhibitory protection of metals, development of metal and nonmetallic protective coatings, creation of new research methods of influence working environments, in particular hydrogen, on the processes of deformation and destruction of structural materials, etc are established.

**KEY WORDS:** *corrosion, corrosion-mechanical destruction, corrosion cracking, corrosion fatigue, inhibitory protection, protective metal and non-metallic coatings.*

6 червня 2020 року виповнилося 110 років від дня народження видатного українського вченого, академіка АН УРСР - засновника наукового напрямку фізико-хімічна механіка матеріалів та багаторічного (з 1952 р. по 1971 р.) директора Фізико-механічного інституту АН УРСР (до 1964 р. Інститут машинознавства та автоматики АН УРСР) Георгія Володимировича Карпенка. Г.В. Карпенко – учень всесвітньо відомого ученого академіка П.О. Ребіндера, який у 1928 р. вперше відкрив явище зниження міцності іонних кристалів під дією поверхнево-активних речовин (ПАР) і встановив, що основною причиною цього феномену є фізична адсорбція середовища на поверхні кристала. Це явище відоме тепер під назвою “ефект Ребіндера” і широко застосовується у різних галузях техніки. Ним започатковано в Україні дослідження міцності металів і сплавів у поверхнево-активних та корозивних середовищах, зокрема адсорбційної, корозійної і водневої втоми і корозійного розтріскування та зробив вагомий внесок у розвиток цього наукового напрямку [1–4] та вперше запропонував адсорбційно-електрохімічну теорію корозійної втоми металів.

Враховуючи, що корозія металів є однією із найпоширеніших причин передчасного, часто аварійного виходу з ладу металевих конструкцій і спричиняє величезні матеріальні збитки в різних галузях промисловості, він найбільше акцентував свою увагу на розвитку теорії корозійно-механічного руйнування металів (КМРМ) та їх захисті від впливу агресивних робочих середовищ. Цей науковий напрямок досліджень отримав подальший розвиток у роботах його численних учнів і послідовників [5-11] і вивів ФМІ в число провідних дослідницьких центрів з цієї проблематики не тільки в Україні, але і в колишньому СРСР та не втратив актуальності по сьогоднішній день. Ним та його учнями встановлено, що найбільший опір корозійно-втомному руйнуванню чинять вуглецеві та низьколеговані сталі з троститною структурою, найменший – мартенситною. Перліт-феритна та сорбітна структури займають проміжне положення.

Пізніші наші з М.С. Хоною дослідження витривалості корозійнотривких сталей різних класів показали [11], що їх схильність до корозійної втоми залежно від класу зростає в такій послідовності: аустенітний < аустенітно-феритний < феритний < аустенітно-мартенситний < мартенситно-феритний < мартенситний. Отже, сталі, які мають мартенсит як структурну складову, найбільш схильні до корозійної втоми.

Починаючи з середини минулого сторіччя, у світі намітилася чітка тенденція до створення великотоннажних суден, турбін, генераторів та інших машин і агрегатів великої одиничної потужності, як більш економічних. Тому проблема дослідження масштабного

ефекту, який проявляється під час оцінки міцності великогабаритних деталей стала особливо актуальною. На той час масштабний ефект був достатньо вивчений для випадку, коли деталі експлуатуються у повітрі чи інертному до матеріалу середовищі. Науково обґрунтованої відповіді на питання: «Як впливає робоче середовище на прояв масштабного ефекту?», - не було, що створювало у машинобудівників певні проблеми під час вибору матеріалів для деталей, призначених для експлуатації в корозивному середовищі.

Вагомий внесок у дослідження масштабного ефекту під час корозійної втоми металів зробили Г.В. Карпенко та його учні. Для цього під його загальним керівництвом у ФМІ за підтримки ЦНДІ «Прометей» було створено унікальну експериментальну базу, що за своїми технічними характеристиками не мала аналогів у колишньому СРСР [11-14]. Вона давала можливість вивчати корозійну втому геометрично подібних зразків діаметром до 200 ... 250 mm загальною довжиною до 3000 mm (рис. 1).

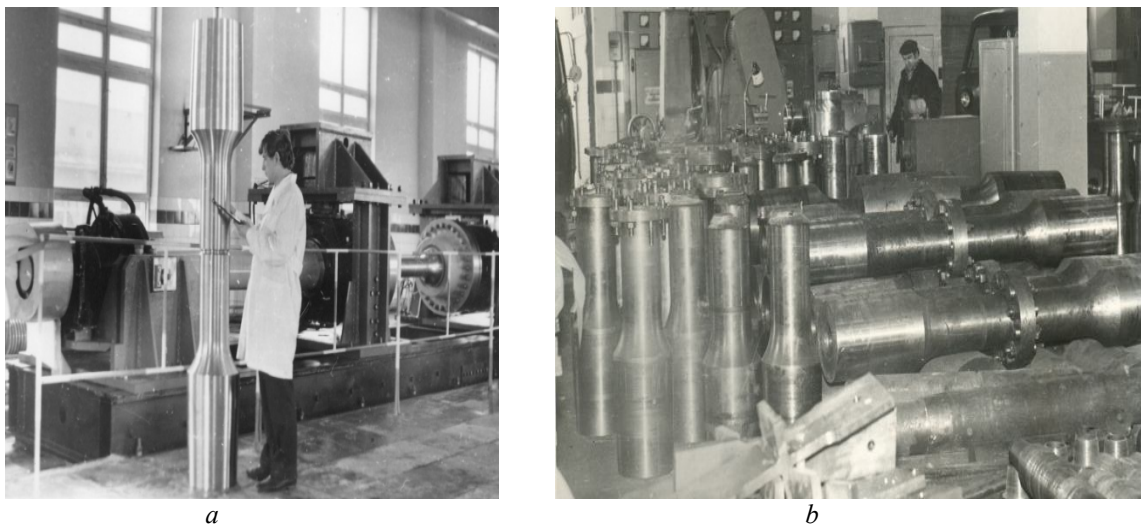


Рис. 1. Загальний вигляд унікальної установки УФМІ 200 для вивчення масштабного ефекту на зразках-моделях валів робочим діаметром 200...250 mm. На передньому плані оператор заміряє розміри зразка перед його випробуванням (а) та різні типи великогабаритних зразків-моделей, що зруйновані під час випробування (b).

Fig. 1. General view of unique equipment УФМІ 200 for study the scale effect on samples-models of shafts with a working diameter of 200...250 mm. In the foreground, the operator is measuring the dimensions of the sample before its test (a) and the different types of large specimens destroyed during the test (b).

Слід акцентувати, що проведені нами випробування були надзвичайно дорогавартісними і металоємними. Наприклад, для побудови однієї кривої втоми чи корозійної втоми за існуючою методикою потрібно було зруйнувати не менше 8-10 зразків. Маса заготовки одного зразка робочим діаметром 200...250 mm становила приблизно 2,5 ... 3 t, тобто для одержання однієї кривої втоми потрібно було 25...30 t металу. Без зацікавленості в одержаних результатах суднобудівників та їх фінансової підтримки провести такі дослідження було б не можливо.

Використовуючи це устаткування Г.В. Карпенком та ін. вперше встановлено інверсію масштабного ефекту під час корозійної втоми зразків з вуглецевих, низьколегованих сталей та алюмінієвих сплавів у широкому діапазоні їх розмірів [3, 11, 12]. Показано (рис. 2), що ступінь прояву інверсії масштабного ефекту під час корозійної втоми залежить від відносної агресивності корозивного середовища для конкретного металу. Що більш негативний вплив середовища на опірність металу втомному руйнуванню, то більшою буде інверсія масштабного ефекту під час корозійної втоми металу і навпаки. Одержані результати використані суднобудівниками під час створення конструкцій, які експлуатують у морській воді, зокрема великогабаритних валів для унікальних суден транспортного флоту та атомних криголамів.

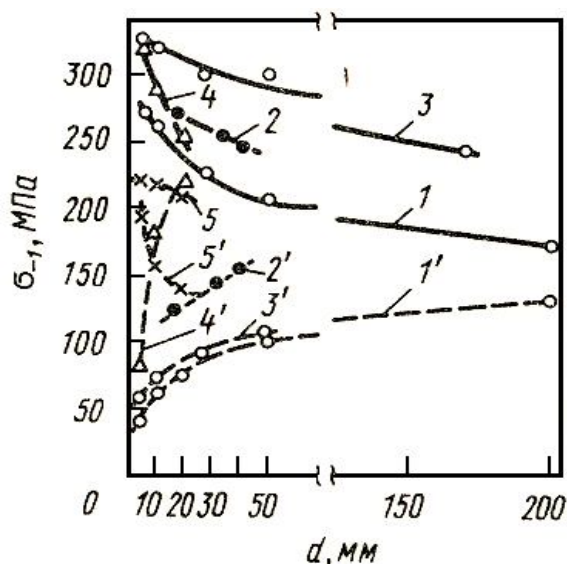


Рис. 2. Залежність границі втоми  $\sigma_{-1}$  (1-5) і границі корозійної втоми  $\sigma_{-1c}$  (1' - 5') зразків сталей під час випробування у 3 %-му розчині NaCl від їх діаметру: 1, 1' - сталь 35; 2, 2' - 20X; 3, 3' - 38X2H2MA; 4, 4' - 0X14H12M; 5, 5' - 12X18H10T.

Fig. 2. The dependence of the fatigue limit  $\sigma_{-1}$  (1-5) and the limit of corrosion fatigue  $\sigma_{-1c}$  (1' - 5') of steel samples during the test in 3% NaCl solution from their diameter: 1, 1' - steel 35; 2, 2' - 20X; 3, 3' - 38X2H2MA; 4, 4' - 0X14H12M; 5, 5' - 12X18H10T.

Враховуючи, що зі збільшенням кількості циклів навантаження розмах руйнівного циклічного напруження постійно знижується, тому можна говорити тільки про умовну границю корозійної втоми зразків при заданій кількості циклів навантажень (рис. 3). Нами було показано, що при високих рівнях циклічного навантаження корозивне середовище може як зменшувати, так і збільшувати число циклів навантаження зразків до їх руйнування. Останнє пов'язано з охолоджувальним впливом середовища на зразки, які помітно нагріваються при високих рівнях навантаження. Було також підтверджено відсутність кореляції між границею міцності ( $\sigma_B$ ) і границею втоми ( $\sigma_{-1}$ ) металевих зразків у повітрі та їх умовною границею корозійної втоми ( $\sigma_{-1c}$ ) (рис. 4). Тобто застосування високоміцних сталей без додаткового захисту ще не гарантує їх надійної роботоздатності в корозивних середовищах. Показано, що циклічна довговічність металевих зразків у корозивному середовищі суттєво залежить від частоти та форми циклів їх навантаження, тоді як у повітрі зміна частоти навантаження від  $10^2$  до  $10^4$  cycles/min помітно не впливає на неї.

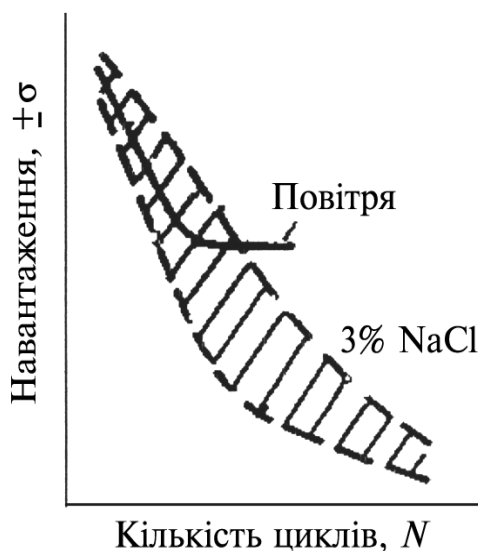


Рис. 3. Типові криві втоми сталей і сплавів у повітрі та 3%-му розчині NaCl.

Fig. 3. Typical fatigue curves of steels and alloys in air and 3% NaCl solution.

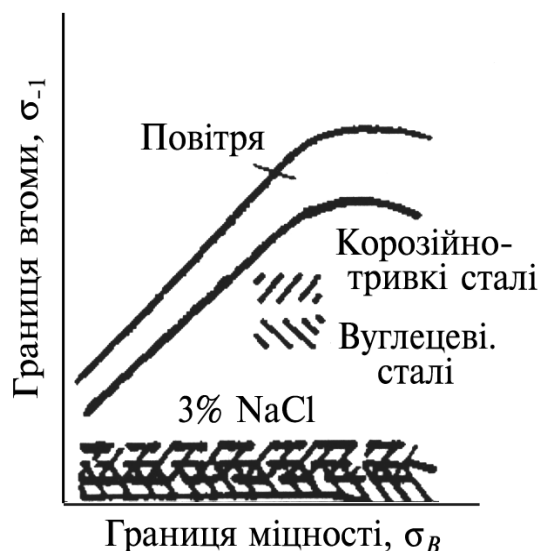


Рис. 4. Залежність границі втоми та умовної границі корозійної втоми від границі міцності сталей у повітрі.

Fig. 4. Dependence of fatigue limit and conditional corrosion fatigue limit on the strength limit of steels in air.

Г.В. Карпенком встановлено, що різні механічні обробки, забезпечуючи однакову мікрогеометрію поверхні зразків суттєво впливають на характеристики їх корозійної втоми через різну зміну структури і напруженого стану їх поверхневого шару. Розвиваючи цей напрямок досліджень, вони разом з Ю.І. Бабеєм та учнями [15, 16] розробили основи механо-імпульсної обробки сталевих виробів з утворенням на їх поверхні так званих «білих» корозійнотривких і зносостійких шарів, які помітно покращують експлуатаційні властивості деталей машин. В інституті і надалі продовжуються розробка ефективних методів поверхневого зміцнення металовиробів та їх захисту від корозії і зношування, в основі яких лежать плазмово-електролітична обробка поверхні алюмінію, магнію та їх сплавів [17, 18] тощо.

Виявлено також, що зміцнення деталей шляхом поверхневого пластичного деформування (ППД), яке широко застосовують на практиці, для підвищення опору металевих виробів втомному руйнуванню не завжди є ефективним під час корозійної втоми. Нами показано обмеженість дії такого зміцнення під час циклічного навантаження деталей в корозивному середовищі, особливо за умов фретинг-корозії, зумовленої, наприклад, наявністю на валах насадних деталей типу втулки.

Г.В. Карпенко з учнями [14] започаткував в інституті дослідження малоциклової корозійної втоми, яка відрізняється від багатоциклової високим циклічним напруженням або деформацією, що зумовлює короткий час до руйнування металу (не більше  $10^6$  cycles) за низької частоти навантаження (менше 1 Hz). Під високими навантаженнями ( $\pm \sigma = \sigma_{0,2}$ ) вплив корозивного середовища на довговічність вуглецевих та малолегованих сталей через відносно короткочасну взаємодію несуттєвий або зовсім непомітний. Зі зниженням рівня циклічних навантажень такі середовища, як водогінна вода, 3%-й розчин NaCl чи морська вода можуть на порядок і більше зменшувати час до руйнування зразків. При цьому довговічність металу суттєво залежить від форми циклу навантажень. Найбільше значення в циклі навантаження має фаза активного розтягу. Вплив форми циклу 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 році ФМІ створив в м. Одесі відділ морської корозії металів під напруженням під керівництвом Г.В. Карпенка і разом з науково-дослідними установами колишнього Мінсудпрому СРСР ЦНДІ «Прометей» і ЦНДІТС заснував спеціальний дослідницький центр «Дельфін». У центрі одержано порівняльні дані щодо кородування ненапружених і напружених сталей та їх зварних з'єднань у природній морській воді та 3 %-му розчині NaCl, який у різних лабораторіях приймають за «штучну морську воду».

У 1965 р. в інституті на замовлення авіаційної промисловості Г.В. Карпенко з співробітниками [13], розпочали перші дослідження корозійної втоми нержавіючих сталей і титанових сплавів, призначених для виготовлення лопаток компресорів реактивних двигунів. Встановлено, що незважаючи на високу корозійну тривкість у ненапруженому стані, нержавіючі сталі суттєво знижують опір втомному руйнуванню за одночасного впливу корозивних середовищ, особливо це стосується сталей мартенситного класу.

Нашими дослідженнями з М.С. Хомою [11] виявлено залежність корозійної витривалості цих сталей від вмісту в них основних легувальних елементів, зокрема хрому та нікелю, і показано, що зі збільшенням концентрації цих елементів, як і їх еквівалентів у сталях одного класу, схильність до корозійної втоми змінюється менше, ніж при зміні структурного стану при практично однаковому вмісті компонентів. Висока корозійна витривалість сталей, що містять аустеніт, мало залежить від того, якими елементами він стабілізується (Ni, Mn, N). Ці результати дали змогу зробити висновок, що вплив хімічного складу корозійнотривких сталей на корозійну витривалість значно менший, ніж структури, і суттєво проявляється лише тоді, коли супроводжується зміною їх фазового складу.

Г.В. Карпенко з своїми учнями значну увагу приділили також дослідженню корозійного розтріскування металів [5-8, 19-21]. У 70–80-х роках І.І. Василенко, Р.К. Мелехов, Г.М. Круцан та ін. [7, 8], досліджуючи корозійне розтріскування низько- та середньоміцних сталей, титанових і алюмінієвих сплавів і на основі термодинамічного аналізу систем метал-середовище встановили основні залежності їх схильності до корозійного розтріскування та інтенсивності дифузії водню в метал від величини потенціалів поляризації та рН середовища.

Показано, що для більшості систем метал–середовище схильність до корозійного розтріскування залежить від параметрів поляризації. Наприклад, вуглецеві та низьколеговані пластичні сталі в лужних розчинах розтріскуються за потенціалів активно-пасивного переходу і метал практично не абсорбує водень [19-21]; опірність титанових сплавів корозійному розтріскуванню в хлоридних розчинах різко знижується у вузькому діапазоні катодних потенціалів, що теж відповідають активно-пасивному переходу, а у вершині зародкової тріщини рН розчину знижується до 2. Сьогодні відомо уже майже 300 систем “метал–середовище”, для яких, за певних умов, можливе корозійне розтріскування металів.

Результати цих досліджень були вкрай важливими для різних галузей промисловості, оскільки дозволяли точніше оцінювати довговічність їх обладнання та продовжувати термін його безаварійної експлуатації. Так, науковці ФМІ з початку 80-х років почали вивчати причини і механізм корозійного руйнування елементів парогенераторів блоків ВВЕР-440 АЕС, дисків та роторів парових турбін ТЕС та АЕС, розробили рекомендації щодо його попередження [20-23]. Виявлено і пояснено неописаний на той час в літературі факт катастрофічного зниження тривкості хромонікелевої нержавкої аустенітної сталі у лужному розчині у присутності бісульфіду молібдену, як складової високотемпературного мастила для різьбових з'єднань обладнання АЕС. Для вивчення корозійної тривкості конструкційних реакторних матеріалів АЕС у теплоносії за робочих тисків і температур у ФМІ спільно з «ЦНДІ технології машинобудування» (Москва) було створено міжгалузеву лабораторію. На сконструйованому нами з І.П. Гнипом [24, 26, 27], обладнанні одержано кількісні дані щодо впливу води борного регулювання високих параметрів (температура до 300°C, тиск до 18 МПа) на тріщинозміцність корпусних реакторних сталей. Встановлено взаємозв'язок між електрохімічними характеристиками сталей та швидкістю росту корозійно-втомних тріщин.

В інституті вперше експериментально виявлено феномен анодного наводнювання маловуглецевих трубних сталей у карбонат-бікарбонатних розчинах в області критичних потенціалів корозійного розтріскування, запропоновано модель процесу їх руйнування в цих розчинах із врахуванням дії водню [22, 23]. Встановлено відмінність у механізмах руйнування під статичним навантаженням низьколегованих трубних сталей у сірководневих водних та вуглеводневих середовищах. Розкрито особливості корозійного розтріскування аустенітно-феритних сталей та їх зварних з'єднань у хлоридно-сірководневих електролітах. Встановлено, що корозійні тріщини в цих сталях зароджуються переважно від пітінгів в аустенітній фазі, але їх ріст проходить за крихким механізмом у високоміцному легovanому фериті [25].

У 1969 р. Г.В. Карпенком з учнями [28, 29] встановлено кореляцію між зміною механічних напружень в металі і величиною його електродного потенціалу, на основі чого було розроблено спосіб визначення механічних напружень в локальних областях поверхні металу за допомогою мікроелектрохімічних досліджень [28]. Розвиваючи цей напрямок аналізу нами з М.С. Хомою встановлено зв'язок між накопиченням незворотних змін у структурі поверхневих шарів металу під час його циклічного навантаження у корозивному середовищі та їх електрохімічними параметрами. На цій основі запропоновано новий метод прискореного визначення опірності корозійно-втомному руйнуванню нержавких сталей і сплавів, здатних пасивуватися у заданих умовах експлуатації [29], а також вперше встановлено вплив циклічної деформації сплавів на їх селективне розчинення у корозивному середовищі [11].

Для розкриття механізму КМРМ оцінено електрохімічні властивості циклічно деформованого металу. Встановлено, що накопичення поверхневих пошкоджень металу супроводжується зміщенням у негативну область електродного потенціалу та збільшення струмів поляризації за потенціалу рівного потенціалу корозії і має певну стадійність (рис. 5). За відсутності напружень поляризації немає 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 побудована типова крива залежностей  $i_{пол} - N$  (рис. 5), на якій виділено окремі періоди (стадії) корозійно-втомного руйнування. Пізніше показано, що у широкоживаному в експериментах корозивному середовищі – хлоридвмісних розчинах – для корозійнотривких сталей та сплавів, руйнування яких визначається утворенням пошкоджень внаслідок прискореного розчинення мікродеформованих ділянок поверхні, може існувати такий рівень циклічних напружень, який не викликає незворотних змін, що приводять до руйнування зразків, тобто корозійно-втомне руйнування не проходить.

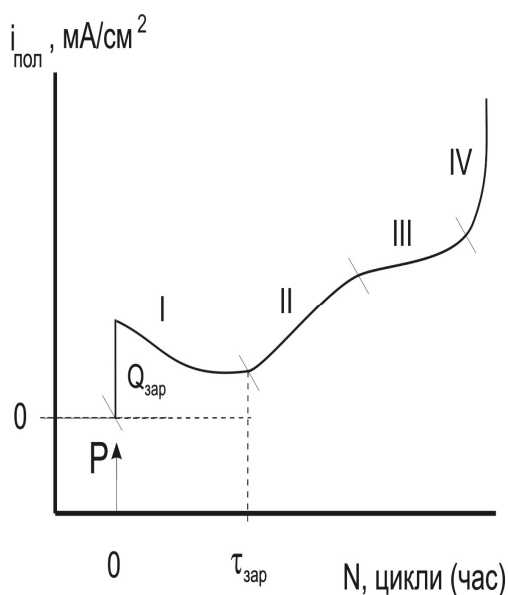


Рис. 5. Типова крива залежності густини струму поляризації при  $E_{\text{пол}} = E_{\text{кор}}$  від кількості циклів (часу) деформування нержавяк сталей різних класів.

$P$  – прикладання циклічного навантаження;

$Q_{\text{зар}}$  – кількість електрики, що відповідає деформаційному розчиненню металу протягом періоду зародження тріщин;

$\tau_{\text{зар}}$  – час зародження корозійно-втомних тріщин.

Періоди руйнування:

I – зародження багатьох мікротріщин;

II – підростання мікротріщин;

III – ріст магістральної тріщини;

IV – повне руйнування зразка.

Fig. 5. A typical curve of the dependence of the polarization current density at  $E_{\text{пол}} = E_{\text{кор}}$  on cycles number (time) of deformation of stainless steels, different classes.

$P$  – application of cyclic loading;  $Q_{\text{зар}}$  – the quantity of electricity number corresponding to the deformation dissolution of the metal during the period of crack formation;

$\tau_{\text{зар}}$  – the formation time of corrosion-fatigue cracks.

Periods of destruction:

I - the formation of many microcracks;

II - regrowth of microcracks;

III - growth of the main crack;

IV - complete destruction of the sample.

На основі цих досліджень розроблено методика пришивдшеного визначення границі корозійної втоми сталей та сплавів, руйнування яких ініціюється розчиненням мікродеформованих ділянок поверхні. Методика полягає в тому, що за границю корозійної втоми вважають максимальні значення напружень, за яких змінюється знак струму поляризації [11, 30]. Розвинуті нами електрохімічні дослідження дають можливість детальніше вивчати особливості першого етапу корозійної втоми металів.

Дослідження механізмів і закономірностей розвитку корозійних тріщин у металі, послабленому гострими концентраторами напружень та іншими тріщиноподібними дефектами (другий етап КМРМ) з позицій механіки руйнування та електрохімії набули в інституті інтенсивного розвитку починаючи з 60-х років завдяки працям В.В. Панасюка, О.Є. Андрейківа, І.М. Дмитраха, Г.М. Никифорчина, О.П. Осташа, Л.В. Ратича, О.М. Романіва, О.Т. Цирульника [31-34] та ін. Вони дають змогу повніше розкрити природу взаємодії деформованих металів з агресивними середовищами, прослідкувати розвиток руйнування, точніше прогнозувати ресурс безаварійної експлуатації металевих конструкцій зокрема, нафтохімічного та енергетичного обладнання, трубопровідного транспорту тощо. Останніми роками у ФМІ І.М. Дмитрахом [35-37], Г.М. Никифорчиним [38-41], та іншими науковцями інтенсифікувалися дослідження експлуатаційного старіння, тобто деградації сталей магістральних трубопроводів, резервуарних парків та інших споруд, які десятками років використовують за впливу на них робочих середовищ, зокрема нафтопродуктів, природного газу як чистого, так із додаванням до нього водню.

Над проблемою використання водню як енергоносія і транспортування його по магістральних трубопроводах сьогодні працюють фахівці багатьох промислово розвинутих країн, що підтверджує актуальність розвинутих у ФМІ досліджень.

Слід відзначити, що вивчення впливу водню на міцність металів в інституті також започаткував Г.В.Карпенко ще у 50-х роках минулого століття [42, 43] і з того часу ця проблема є предметом дослідження у багатьох підрозділах ФМІ. Причому, розвивається два основних напрямки досліджень: з однієї сторони вивчається вплив водню, як робочого середовища на міцність та інші характеристики металів, [34, 44-46]. З другої сторони досліджується використання водню, як технологічного середовища у різних процесах термічної або механічної обробки існуючих матеріалів [47].

Важливим є напрямок використання водню у синтезі нових гідридних матеріалів, як перспективних акумуляторів водню, над створенням яких успішно працює І.Ю. Завалій та ін.

Співробітниками відділу водневих технологій та гібридного матеріалознавства виконано великий об'єм структурних робіт, які підсумовані в монографічній роботі [48]. В останнє десятиліття роботи групи під керівництвом проф. І.Ю. Завалія присвячені питанням синтезу гідридних композитних матеріалів на основі магнію, які демонструють покращені параметрами сорбції-десорбції водню завдяки внесенню каталітичних додатків [49]. Останні роботи цієї ж групи присвячено використанню гідриду магнію та борогідриду натрію для ефективного одержання водню шляхом гідролітичних реакцій та живлення паливних комірок у ряді спеціальних застосувань [49].

Для глибшого розуміння процесів корозії нами з С.А. Корнієм та ін. у ФМІ розпочато дослідження з комп'ютерного моделювання взаємодії металів із компонентами агресивного середовища на атомно-молекулярному рівні, використовуючи квантово-хімічні методи функціоналу густини та напівемпіричні методи у кластерному наближенні [50-53]. Проаналізовано особливості хемосорбції атомів та молекул водню, азоту, монооксиду вуглецю, іонів хлору на алюмінії, залізі, нікелі, міді залежно від кристалографічної орієнтації поверхні, адсорбційних положень, виду адсорбції – молекулярної чи атомарної та наявності дефектів будови кристалічної решітки. Подальший розвиток розрахункових методів привів до можливості моделювання складніших явищ і процесів на поверхні металів, таких як послаблення міжатомних зв'язків поверхневих атомів, утворення поверхневих сполук, особливо оксидів металів. Ці дослідження важливі під час вивчення процесу зародження корозійно-механічних тріщин.

Під загальним керівництвом Г.В. Карпенка у ФМІ також започатковано розроблення методів захисту металокопункцій від корозії, які базуються на створенні нових інгібіторів корозії, металевих та неметалевих покривів, електрохімічного захисту тощо. Створені тут інгібітори [54-57] застосовують у різних галузях промисловості. Сьогодні посилену увагу науковців привертають так звані „зелені” інгібітори, отримані з рослинної сировини або відходів її переробки, над створенням яких успішно працюють З.В. Слободян, О.І. Сиза, О.Е. Чигиринець та ін. у ФМІ, НТУУ «Київський політехнічний інститут», Чернігівському національному технічному університеті та ін.

Останнім часом І.М. Зінь та О.М. Карпенко з Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України розвинули роботи з використання поверхнево-активних речовин (біоПАР), одержаних шляхом мікробного синтезу для створення екологічно безпечних інгібіторів корозії [58, 59]. Використовуючи ефект синергізму, І.М. Зінь та ін [60] розробляють нові екологічно чисті інгібувальні пігменти для лакофарбових матеріалів, які за ефективністю не поступаються широкоживим токсичним хроматам.

Починаючи з 60-х років Г.В. Карпенко започаткував у ФМІ дослідження дифузійного насичення поверхні металів і сплавів сталей алюмінієм, бором, ванадієм, хромом та іншими елементами і вивчення його впливу на структурно-напружений стан, корозійну тривкість і корозійну втому деталей [61, 62]. Цей напрямок був підтриманий Г.Г. Максимовичем, В.Ф. Шатинським та ін., які розробили технологію одержання захисних дифузійних покриттів з дорогоцінних металів та їх імітаторів з використанням розплавів легкоплавких металів як транспортних середовищ [63], В.М. Голубцем [64] зі створення гетерогенних евтектичних зносотривких покриттів. В.М. Федірком, І.М. Погрелюк створені методи підвищення зносотривкості та корозійної тривкості титанових сплавів у сильноагресивних середовищах [65, 66], в основі яких лежить комплексне насичення поверхні виробів азотом, киснем, вуглецем та іншими елементами з контрольованої газової атмосфери. Ця технологія знайшла практичне застосування в літакобудуванні і є перспективною для виготовлення різних імплантантів для людського організму.

У 80-х роках минулого століття, вперше на той час в СРСР, у ФМІ В.С. Піх, М.М. Студент та ін. розпочали досліджувати можливості та ефективність використання порошкових електродних дротів базової системи Fe–Cr–B–Al для створення захисних покривів на сталевих виробах методом електродугової металізації [67-69], які сьогодні використовують для відновлення геометричних розмірів та захисту штоків гідравлічних систем гірничо-шахтного обладнання, транспортної і комунальної техніки, енергетичного устаткування, деталей двигунів внутрішнього згорання, деталей транспортної та сільськогосподарської техніки тощо.

Майже пів сторіччя минає від часу як не стало Георгія Володимировича, але започаткований ним напрямок наукових досліджень в галузі фізико-хімічної механіки матеріалів, зокрема корозії та корозійно-механічного руйнування металів і надалі залишається актуальним, його успішно розвивають учні Вченого та молоді послідовники.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Карпенко Г.В. Влияние активных жидких сред на выносливость стали. – К.: Изд-во АН УССР. – 1955. – 207 с.
2. Карпенко Г.В. Физико-химическая механика конструкционных материалов. Избранные труды в 2-х томах. – К.: «Наукова думка», – 1985. – Т.1. – 226 с.
3. Карпенко Г.В. Работоспособность конструкционных материалов в агрессивных средах. Избранные труды в 2-х томах. – К.: «Наукова думка», – 1985. – Т.2. – 238 с.
4. Карпенко Г.В. Адсорбционно-электрохимическая гипотеза коррозии под напряжением // Физ.-хим. механика материалов. – 1972. – № 6. – С. 34–38.
5. Карпенко Г.В., Василенко И.И. Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Техніка, 1971. – 191 с.
6. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, – 1986. – 294 с.
7. Василенко И.И., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Наук. думка, – 1977. – 262 с.
8. Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание титановых и алюминиевых сплавов. – К.: Техніка, – 1979. – 128 с.
9. Похмурский В.И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, – 1985. – 206 с.
10. Похмурський В.І. Общие аспекты коррозионной усталости металлов и сплавов // Тр. I Сов.-англ. семинара «Коррозионная усталость металлов». – К.: Наук. думка, – 1982. – С. 86–101.
11. Похмурський В.І., Хома М.С. Корозійна втома металів та сплавів. – Львів: СПОЛОМ, – 2008. – 301 с.
12. О характере проявления масштабного эффекта при усталости стали для гребных валов с насадными деталями / В.И. Похмурский, Р.Г. Погорельский, Г.Н. Филимонов, Я.М. Сирак и др. // Технология судостроения. – 1983. – №2.
13. Об эффективности применения поверхностного наклепа для повышения усталостной и коррозионно-усталостной прочности некоторых нержавеющей сталей/ В.И. Похмурский, А.В. Болтарович, М.М. Швед, Г.В. Карпенко // Физ.-хим. механика материалов. – 1966. – № 6. – С. 661–663.
14. Малоцикловая усталость стали в рабочих средах / Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, И. В. Кокотайло, В. П. Руденко. – К.: Наук. думка, – 1977. – 110 с.
15. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: «Наукова думка», – 1988. – 238 с.
16. Упрочнение стали механической рботкой. / Г.В. Карпенко, Ю.И. Бабей, И.В. Карпенко, М. Гутман // – К.: «Наукова думка», – 1966. – 202.
17. Plasma Electrolytic Oxidation of Arc-Sprayed Aluminum Coatings / V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, A. Wank, // Journal of Thermal Spray Technology. – 2007. – Vol. 16, Is. 5–6. – P. 998–1004.
18. Juliet Ippolito "Electrochemical Characteristics of PEO Treated Electric Arc Coatings on Lightweight Alloys"/ H.M. Nykyforchyn, V.I. Pokhmurskii, M.D. Klapkiv, M.M. Student // Advanced Materials Research – 2010. – Vol. 138. – P. 55–62.
19. Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій / В.І. Похмурський, Р.К. Мелехов, Г.М. Круцан, В.Г. Здановський. – К.: Наук. думка. – 1995. – 261 с.
20. Круцан Г. М., Мелехов Р. К. Корозійні пошкодження енергетичного обладнання // Новини енергетики. – 1998. – № 7. – С. 15–25.
21. Вайнман А.В., Мелехов Р.К., Смиян О.Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, – 1990. – 268 с.
22. 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.
23. Мелехов Р.К., Похмурський В.І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: «Наукова думка», – 2003. – 382 с.
24. Похмурский В.И., Гнып И.П., Антошак И.Н. Электрохимические свойства сталей АЭС в реакторной воде при 90...300° С // Защита металлов. – 1994. – № 3. – С. 271–275.
25. Гірний С.І. Роль водню в карбонатному корозійному розтріскуванні низьковуглецевої сталі: автореферат дисертації для переатестації на науковий ступінь канд. техн. наук: спец. 05.17.14 «Хімічний опір матеріалів та захист від корозії» / Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. Львів, – 2008. – 35 с.



26. Похмурський В.І., Гнип І.П., Личковський Е.І. Вплив забруднення теплоносія на ресурс елементів блоків АЕС. // Фіз-хім. механіка матеріалів. – 2000. – Т. 36, № 5. – С. 19–30.
27. Похмурський В.І., Антошак І.М. Методи електрохімічних досліджень металів у високотемпературних водних середовищах. – Львів: Сполом, – 2010. – 151 с.
28. 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. – Т. 5, № 5. – С. 635–636.
29. Патент України № 50573А. Спосіб визначення границі корозійної втоми корозійностійких сталей / В.І. Похмурський, М.С. Хома, А.В. Залужець. – Опубл. 15.10.2002. Бюл. № 10.
30. 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. Довідниковий посібник «Технічна діагностика матеріалів і конструкцій» Т.6. за загальної редакції З.Т. Назарчука. – Львів: Вид. «Простір –М». – 2017. – 298 с.
31. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Методика определения электрохимического состояния в вершине трещины при испытаниях конструкционных материалов на трещиностойкость в коррозионных средах // Завод. лаб. – 1984. – Т. 50, № 7. – С. 56–59.
32. Панасюк В.В., Ратыч Л.В., Дмытрах И.Н. Зависимость скорости роста усталостной трещины в водной коррозионной среде от электрохимических условий в вершине трещины // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – № 4. – С. 33–37.
33. Романів О.М. Механіка корозійного руйнування: перші підсумки та перспективи // Вісн. АН УРСР. – 1981. – № 2. – С. 29–41.
34. Андрейків О.Є., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у воденьвмісних середовищах. – К.: «Наукова думка», – 2008. – 345 с.
35. Effect of hydrogen concentration on fatigue crack growth behaviour in pipeline steel / I.M. Dmytrakh, R.L. Leshchak, A.M. Syrotyuk, Barna R.A. // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. – Vol. 42. – P. 6401–6408.
36. Dmytrakh I.M., Leshchak R.L., Syrotyuk A.M. Effect of hydrogen concentration on strain behaviour of pipeline steel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Vol. 40. – P. 4011–4018.
37. Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel / I.M. Dmytrakh, O.D. Smiyan, A.M. Syrotyuk, O.L. Bilyu // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 50. – P. 26–32.
38. Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів. / Є.І. Крижанівський, О.П. Осташ, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, П.В. Ясній // Довідниковий посібник «Технічна діагностика матеріалів і конструкцій» Т.1. за загальної редакції З.Т. Назарчука. – Львів: Вид. «Простір –М». – 2016. – 360 с.
39. Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. / Науково-технічний посібник. Під ред. В.В.Панасюка. У 3-х томах. –Т.1. Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т. нафти і газу, 2011. – 457с. - Т.2. Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т. нафти і газу, 2011. – 447с. – Т.3. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т. нафти і газу, 2012. – 432с.
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 НАН України, – 2009. – С.29–32.
41. Zvirko O.I. Electrochemical methods for the evaluation of the degradation of structural steels intended for long-term operation // Materials Science. – 2017. – Vol. 52, № 4. – P. 588–594.
42. Карпенко Г.В. Вплив водню на механічні властивості сталі. Вид. АН УРСР, – 1960.
43. Карпенко Г.В., Крипякевич Р.И. Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургиздат. – 1962.
44. Похмурский В.И., Швед М.М., Яремченко Н.Я. Влияние водорода на процессы деформирования и разрушения железа и стали. К.: Наукова думка, – 1977. – 60 с.
45. К вопросу о механизме водородной хрупкости / Г.В. Карпенко, А.К. Литвин, В.И. Ткачев, А.И. Сошко // Физ.-хим. механика материалов. – 1965. – № 3. – С. 299–303.
46. Андрейків О.Є., Никифорчин Г.М., Ткачов В.І. Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневовмісних середовищах // Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки / Під ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка, – 2001. – С. 248–286.
47. Похмурський В.І., Федоров В.В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. - Львів: ФМІ НАН України, – 1998. – 206 с.

48. Яртись В.А., Рябов О.Б., Лотоцький М.В. Матеріалознавство та структурна хімія інтерметалічних гідридів. – Львів: Сполом. – 2006. – 288 с.
49. I.Yu. Zavaliy, V.V. Berezovets', R.V. Denys. Nanocomposites based on magnesium for hydrogen storage: achievements and prospects (a survey) // *Materials Science*. – 2019. – Vol. 54/5. – P. 9–20.
50. Похмурський В. І., Копилець В. І. Комп'ютерні дослідження хемосорбції на деформованих металах // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1993. – № 6. – С. 7–15.
51. Похмурський В.І., Корній С.А., Копилець В.І. Дослідження взаємодії компонентів водного хлоридовмісного середовища з поверхнею інтерметаліду  $\text{CuAl}_2$ : квантово-хімічний кластерний підхід // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2006. – Т.7, № 2. – С. 297–302.
52. Pokhmurskiy V.I., Kopylets V.I., Kornii S.A. Modeling of the Interaction of an Aqueous Electrolyte with Metals: Molecular-Dynamic Approach // *Materials Science*. – 2004. – Vol. 40, Is. 5. – P. 579–584.
53. Pokhmurskii V., Korniy S., Kopylets V. The Theoretical Study of Interaction of Water Chloride Containing Environment Components with  $\text{CuAl}_2$  Intermetallic Surface // *Journal of Cluster Science*. – 2010. – Vol. 21, Is. 1. – P. 35–43.
54. Гутман Э.М., Миндюк А.К., Карпенко Г.В. Об эффективности некоторых ингибиторов коррозии под напряжением // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1965. – Т. 1, № 5. – С. 535–538.
55. Слободян З.В., Купович Р.Б., Маглатюк Л.А. Вплив екстрактів таніну на корозійну тривкість сталі 20 у водогінній воді та 5%  $\text{HCl}$  // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – № 4. – С.120–122.
56. Композиції на основі екстрактів з кори та стружки дуба – інгібітори корозії середньовуглецевих сталей у воді / З.В. Слободян, Л.А. Маглатюк, Р.Б. Купович, Я.М. Хабурський // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – Т.50, №5. – С.58–66.
57. Комплексні модифікатори для поліпшення захисних властивостей кремнієорганічних покриттів / В.І. Похмурський, І.М. Зінь, Л.М. Білий та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2005. – Т. 41, № 5. – С.85–89.
58. The effect of inhibiting pigments on corrosion and environmentally assisted cracking of mild steel / V.I. Pokhmurskii, I.M. Zin, S.B. Lyon et al. // *Inzynieria Powierzchni (Surface Engineering)*. – 2005. – № 2A. – P.177–181.
59. Дослідження інгібування локальної корозії дюралюмінієвого сплаву нехроматними пігментами / І.М. Зінь, В.І. Похмурський, С.Б. Лайон та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – Т. 45, № 4. – С. 5–11.
60. Inhibiting Action of Biogenic Surfactants in Corrosive Media /V.I. Pokhmurs'kyi, O.V. Karpenko, I.M. Zin', M.V. Tymus' and N.H. Veselivs'ka // *Materials Science*. – 2014. – V.50, No. 3. – P.448–453.
61. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий / Г.В. Карпенко, В.И. Похмурский, В.Б. Далисов, В.С. Замиховский // – К.: «Наукова думка», – 1971. – 168 с.
62. Похмурский В.И., Далисов В.Б., Голубец В.Д. Повышение долговесности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. – К.: «Наукова думка», – 1980. – 188 с.
63. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Гойхман М.С. Диффузионные покрытия драгоценными металлами. – К.: «Наукова думка», – 1978. – 168 с.
64. Голубец В.М. Долговечность эвтектических покрытий в коррозионных средах. – К.: «Наукова думка», – 1990. – 125 с.
65. Федірко В.М., Погрелюк І.М. Азотування титану та його сплавів. – К.: «Наукова думка», 1995. – 222 с.
66. Федірко В.М., Погрелюк І.М., Яськів О.І. Термодифузійне багатоконцентне насичення титанових сплавів. – К.: «Наукова думка», – 2009. – 166 с.
67. Похмурский В.И., Пих В.С., Студент М.М. Основы формирования защитных и восстановительных покрытий электродуговым напылением из порошковых проволок // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1986. – № 6. – С. 11–16.
68. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак // *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка*. – Львів, Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, – 2005. – 192 с.
69. Похмурський В.І., Сидорак І.Й., Студент М.М. Реалізація наукових розробок у сучасних умовах. – Львів: ФМІ НАН України, – 2013. – 60 с.

**Василь ПОХМУРСЬКИЙ**  
**Vasyl POKHMURSKII**