

## ФОРМУВАННЯ НОВОГО НАУКОВОГО НАПРЯМУ – ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

*В. В. ПАНАСЮК*

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

Проаналізовано розвиток досліджень і наукові результати з фізико-хімічної механіки матеріалів, яка є сучасним науковим напрямком у матеріалознавстві. Розглянуто основні етапи розвитку цього напрямку в НАН України, висвітлена роль Г. В. Карпенка у формуванні та розвитку цієї галузі науки. Синтезовані найважливіші результати, проілюстровані деякі їх практичні застосування, а також сформульовані актуальні задачі перспективних досліджень.

**Ключові слова:** конструкційні матеріали; робочі середовища; міцність матеріалів, їх руйнування та втома.

У середині ХХ ст. у науці про міцність і руйнування матеріалів увага багатьох дослідників була спрямована на вирішення проблем, пов'язаних з розробленням методів оцінювання довговічності інженерних конструкцій авіаційної, космічної, енергетичної та морської техніки, що експлуатуються в екстремальних умовах: під дією високих навантажень, різких змін температури і, одночасно, під дією корозивних, поверхнево-активних, окрихчувальних та інших робочих середовищ. Інтенсивне вивчення впливу таких середовищ на фізико-механічні властивості матеріалів і розроблення технологій зміцнення поверхонь деталей машин для підвищення їх довговічності, виявлені при цьому (раніше невідомі) ефекти зниження міцності деформівних матеріалів через наявність у їх структурі дефектів типу тріщин і дію зовнішнього поверхнево-активного або корозивного середовищ обумовили формування в середині ХХ століття нового напрямку в науці про міцність матеріалів – фізико-хімічної механіки матеріалів (ФХММ).

Нижче наведено деякі теоретичні та прикладні результати досліджень у цій галузі науки в Україні, що пов'язані у першу чергу з творчою діяльністю академіка АН УРСР Г. В. Карпенка та очолюваного ним наукового колективу – Львівської школи механіків-матеріалознавців.

Успішний розвиток досліджень з ФХММ в Україні, зокрема у Фізико-механічному інституті НАН України (ФМІ), зумовлений, головню, науковою та організаційною діяльністю Г. В. Карпенка як багаторічного (1952–1971 рр.) його директора, а також постійною підтримкою цього напрямку з боку НАН України, в першу чергу її президента академіка Б. Є. Патона, створенням при Відділенні фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України Наукової ради з ФХММ. Цьому сприяла також організація в 50–60-ті роки ХХ століття у ФМІ під керівництвом Г. В. Карпенка унікальної експериментально-дослідної бази для вивчення різних аспектів взаємодії робочого середовища з деформованим металом, підготовка колективу науковців для виконання фундаментальних і прикладних досліджень у цій галузі науки, організація у 1965 р. при ФМІ науково-технічного журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”, головним редактором якого став Г. В. Карпенко.

**Предмет досліджень ФХММ та його формування.** Цей напрямок науки вивчає процеси деформування та руйнування конструкційних матеріалів і зварних з'єднань під дією навантажень і фізико-хімічних факторів довкілля. При цьому, очевидно, враховують характер зовнішнього навантаження (квазі-статичне, циклічне, довготривале тощо), температуру, фізико-хімічні властивості середовища, особливості структури матеріалу (наявність дефектів) тощо.

Мета досліджень з ФХММ – розробка теорії процесів деформування та руйнування матеріалів і методів для оцінювання ресурсу (надійної робото-здатності) технічного виробу в заданих умовах його експлуатації, створення ефективних технологій оброблювання матеріалів або формування матеріалу з високою опірністю до руйнування [1–3].

Зауважимо, що утвердженню цього наукового напрямку значною мірою сприяли успіхи в галузі механіки поширення тріщин в деформівних твердих тілах. Це пов'язано з наступним. Вплив середовищ на поширення тріщин у деформівних тілах має фундаментальне самостійне наукове і практичне значення для теорії поширення тріщин і, водночас, для ФХММ. У такому розумінні фізико-хімічну механіку матеріалів можна розглядати як механіку поширення тріщин у деформівних тілах з урахуванням дії зовнішніх середовищ (фізико-хімічна механіка руйнування матеріалів). Враховуючи це, стало доцільним включити до феноменологічних концепцій і підходів ФХММ нові детерміністичні положення механіки руйнування. Це стало важливим імпульсом у її формуванні та утвердженні як нового наукового напрямку в науці про матеріали [4].

**Деякі етапи розвитку.** ФХММ як науковий напрям започаткував П. О. Ребіндер. У 1928 р. він вперше встановив [1] факт зменшення міцності іонних кристалів, розтягваних у середовищі поверхнево-активних речовин (ПАР), порівняно з їх міцністю в інертному середовищі. Це зменшення міцності не пов'язане з корозією чи іншою хімічною взаємодією середовища та матеріалу. Причиною його виявилася фізична адсорбція середовища на поверхні кристала і зменшення поверхневої енергії твердого тіла. Це явище відоме тепер під назвою “ефект Ребіндера”.

Починаючи з 30-х років ХХ століття, у Москві під керівництвом академіка П. О. Ребіндера і проф. В. Й. Ліхтмана, а пізніше проф. Є. Д. Щукіна виконано великий обсяг досліджень з фізики цього явища. Їх результати опубліковані в монографіях [2, 3, 5]. Московські вчені в основному вивчали “ефект Ребіндера” на монокристалах, а Г. В. Карпенко розпочав його дослідження на полікристалах (сталях). Це мало важливе значення для розвитку та утвердження ФХММ як інженерно-технічного аспекту цього наукового напрямку.

З 1947 р. цей напрямок починає розвиватися в Академії наук України. Перші дослідження здійснені в Інституті механіки АН УРСР (Г. В. Карпенко, І. І. Іщенко та ін.). Розвиваючи ідеї П. О. Ребіндера, Г. В. Карпенко встановив ефект зниження втомної міцності сталей під одночасною дією на сталевий зразок поверхнево-активного середовища (вазелинове мастило з додатками олеїнової кислоти) і знакозмінного навантаження порівняно з його витривалістю ( $\sigma_{-1}$ ) під таким же навантаженням, але в неактивному середовищі (сухе повітря, чисте вазелинове мастило). Результати досліджень [3] засвідчили зменшення на 15...20% границі втоми сталі 40Х у вазелиновому мастилі з додатками олеїнової кислоти. Це стало новим важливим здобутком науки про вплив поверхнево-активних середовищ на фізико-механічні характеристики конструкційних матеріалів. Цей ефект, названий ефектом адсорбційної втоми, Г. В. Карпенко зафіксував у 1949 р. [3].

Починаючи з середини 50-х років, в Україні центром наукових і прикладних досліджень з проблеми ФХММ став ФМІ АН УРСР у Львові (до 1964 р. – Інститут машинознавства та автоматики). У тісній співпраці з Інститутом фізичної хімії АН СРСР (тут працювали П. О. Ребіндер, В. Й. Ліхтман та їх учні і співробітники, які підтримували наукові контакти з вченими ФМІ), Інститутом механіки АН УРСР, Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона АН УРСР та іншими науково-дослідними установами і вузами країни\* у ФМІ під керівництвом Г. В. Карпенка в 1952–1960-х роках розпочато фундаментальні і прикладні дослідження у цій галузі науки.



Фото 1. Наукова сесія з проблем ФХММ у Києві в 1963 році.

У центрі проф. В. Й. Ліхтман (Москва), академік П. О. Ребіндер (Москва), член-кор. Г. В. Карпенко (Львів), проф. О. В. Карлашов і проф. Б. І. Костецький (Київ).

Photo 1. Scientific session on the problems of physicochemical mechanics of materials in Kyiv in 1963. In the center: Prof. V. I. Likhtman (Moscow), Academician P. O. Rebinder (Moscow), Cor.-Member H. V. Karpenko (Lviv), Prof. O. V. Karlashov and Prof. B. I. Kostetskyi (Kyiv).

Перший етап досліджень з проблем ФХММ завершився підготовкою і виданням двох монографій: В. Й. Ліхтман, П. О. Ребіндер і Г. В. Карпенко “Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов” ([2], 1954)\*\* і Г. В. Карпенко “Влияние активных жидких сред на выносливость стали” ([3], 1955). У монографії Г. В. Карпенка широко висвітлені результати досліджень, виконаних під його керівництвом у Львові та Києві.

Цими монографіями завершився перший етап формування ФХММ як нового науково-технічного напрямку. Роль Г. В. Карпенка у цьому дуже вагома.

Для ФМІ АН УРСР видання монографій [2, 3] стало важливим імпульсом інтенсифікації досліджень з теорії фізико-хімічної взаємодії поверхнево-активних і корозивних середовищ із деформівними металічними матеріалами, зокрема, вивчення особливостей цієї взаємодії з дефектами структури матеріалу (типу тріщин), а також із конструктивними концентраторами напружень [4, 6].

У 50-ті роки ХХ століття експериментальні дослідження з ФХММ зводилися здебільш до визначення границі статичної міцності, границі втоми і особливостей пластичного течіння конструкційних матеріалів залежно від структури матеріалу, рівня його навантаження і впливу середовища на ці характеристики. Зокрема, встановлено, що під статичним навантаженням мета-

\* Див. збірник “Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки” / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка, 2001. – 432 с.

\*\* За цю монографію її авторів відзначено премією Президії АН СРСР у 1954 р.

левих зразків (наприклад, розтягування сталевих циліндрів діаметром 10 mm) поверхнево-активне середовище на руйнівне навантаження (міцність матеріалу) практично не впливає. У той же час циклічне навантаження такого зразка і в тому ж середовищі знижує його витривалість (зменшує кількість циклів до руйнування за заданого навантаження) порівняно з витривалістю в інертному середовищі. Зазвичай це пояснювали тим, що час дії середовища в першому випадку недостатній для зміни властивостей матеріалу. Але таке загальне тлумачення адсорбційного зменшення міцності не можна вважати переконливим. Важливий поступ у розумінні цього явища зроблено вже пізніше. У 1962 р. опубліковані [7] результати досліджень міцності зразків матеріалу з тріщиною в поверхнево-активному, а також інертному середовищах. Міцність тіла з тріщиною, як відомо, залежить від здатності матеріалу чинити опір поширенню в ньому тріщини, тобто від його тріщиностійкості, що визначається енергією (роботою), яку витрачають на утворення нових поверхонь тіла під час поширення тріщини. Поверхнево-активне середовище, в якому розтягують (деформують) зразок із тріщиною, проникає в її вершину і, адсорбуючись на її поверхнях, міняє тріщиностійкість матеріалу незалежно від того, було навантаження статичним чи циклічним. Так вперше конкретно показано вплив адсорбції середовища (води) на міцність твердого тіла (скла). Встановлено, що в середовищі води (ПАР) руйнівне навантаження  $P^*$  ( $P^* < P$ , де  $P$  – руйнівне навантаження в сухому повітрі) зменшується, але після усунення середовища шляхом висушування зразка значення  $P$  відновлюється.



Фото 2. У лабораторії корозійної тріщиностійкості ФМІ. Керівник лабораторії к.т.н. Л. В. Ратич дає пояснення Президентові АН СРСР академікові А. П. Александрову (справа) про нові розробки з ФХММ.

Photo 2. In the laboratory of corrosion crack growth resistance of PhMI. Laboratory head Cand. Sci. (Eng.) L. V. Ratysh gives explanations to the President of the Academy of Sciences of USSR Academician A. P. Aleksandrov (on the right) on new institute's developments.

Виявлення цього ефекту стало етапним у розвитку ФХММ і дало імпульс для інтенсифікації досліджень гранично-рівноважних станів деформівних твердих тіл із тріщинами у різних середовищах, розроблення методів визначення статичної, циклічної та корозійної тріщиностійкості матеріалів з урахуванням дії середовищ, формування концепції фізико-хімічної ситуації біля вершини тріщини в системі “деформований матеріал–середовище”. Ці дослідження завершилися створенням сучасної концепції фізико-хімічної взаємодії середовища з деформівним матеріалом біля вершини тріщини [8].

**Масштабний ефект.** Вплив розмірів деталі (деформівного тіла) на характеристики міцності матеріалів проявляється, як відомо, за будь-яких видів навантаження, але особливо за циклічного та дії ПАР. Питання про вплив розмірів металевих деталей на їх витривалість під одночасною дією циклічних навантажень і поверхнево-активних та корозивно-агресивних середовищ стало предметом досліджень Г. В. Карпенка та його учнів у Києві та Львові [9, 10]. У ФМІ Г. В. Карпенко та його учні (Р. Г. Погорецький, В. І. Похмурський, К. Б. Кацов та ін.) створили унікальний експериментальний комплекс

устаткування для вивчення явищ масштабного ефекту міцності матеріалів у робочих середовищах на зразках матеріалів і зварних з'єднань діаметром перерізу від 1 до 200 mm [10] і листових матеріалів на зразках завтовшки від 1 до 100 mm (фото 3). Це устаткування використане для важливих досліджень корозійної втоми конструкційних матеріалів у суднобудуванні, хімічному і енергетичному машинобудуванні, буровій техніці тощо [11].

Досліди Г. В. Карпенка і О. В. Карлашова [9], Р. Г. Погорецького та інших [10] показали, що зі збільшенням абсолютних розмірів зразків їх витривалість у поверхнево-активному середовищі знижується (як і очікували), а в корозивному – зростає, тобто зразки більшого діаметра витриваліші, ніж меншого. Отже, виявлено, що в корозивному середовищі відбувається т. зв. інверсія масштабного фактора [9].

---

Фото 3. Загальний вигляд машини ФМІ-200 для дослідження втомного і корозійно-втомного руйнування зразків великого діаметра.

Photo 3. A general view of the machine ФМІ-200 for fatigue and corrosion-fatigue fracture of large.

---



---

Фото 4. Академіки А. П. Александров і Б. Є. Патон у лабораторії дослідження малоциклової втоми елементів конструкцій. Пояснення дає зав. лабораторією к.т.н. К. Б. Кацов.

Photo 4. Academicians A. P. Aleksandrov and B. Ye. Paton in the laboratory for investigation of structural materials low-cycle fatigue. Explanations are given by the laboratory head Cand. Sci. (Eng.) K. B. Katsov.

---



Подальші дослідження показали (див. літ. у [10–15]), що інверсія масштабного ефекту в умовах корозійної втоми характерна для вуглецевих, низьколегованих сталей та алюмінієвих сплавів. Для високолегованих сталей і титанових сплавів у воді та водних розчинах солей її не виявлено. Зафіксовано тільки кількісні зміни у значеннях границі їх корозійної втоми. (Цей аспект проблеми ще залишається недостатньо вивченим, зокрема, для поверхнево зміцнених деталей, виробів з покриттями тощо).

У результаті широкомасштабної науково-дослідної роботи багатьох науковців (Ю. І. Бабей, І. І. Василенко, Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, А. Б. Куслицький, Г. Г. Максимович, В. І. Похмурський, О. М. Романів, В. Т. Степуренко, А. Н. Тинний, В. І. Ткачов, М. Й. Чаєвський, В. Ф. Шатинський, Ф. П. Янчишин, А. І. Яцюк та ін.) вже впродовж 70-х років ХХ століття нагромаджено значний об'єм теоретичних і експериментальних даних про вплив рідинних і газових середовищ на статичну і втомну міцність конструкційних матеріалів, а також про засоби захисту металоконструкцій від корозії – нанесення різних покриттів, механічна і термо-механічна обробки, застосування інгібіторів корозії тощо [3, 11–25].



Фото 5. Г. В. Карпенко та його учні.  
Зліва направо: Г. В. Карпенко, А. Н. Тинний, А. І. Яцок, В. Т. Степуренко, Ф. П. Янчишин.

Photo 5. H. V. Karpenko and his pupils. From left to right: H. V. Karpenko, A. N. Tynnyi, A. I. Yatsuk, V. T. Stepurenko, F. P. Yanchyshyn.

**Базові положення ФХММ.** На основі теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних у ФМІ, та на підставі літературних даних Г. В. Карпенко уперше синтезував вихідні концепції ФХММ про вплив робочих середовищ на деформацію та руйнування матеріалів, запропонував деякі модельні схеми взаємодії робочого середовища з деформованим металом. Ці положення описані у його монографії “Про фізико-хімічну механіку металів” [16].

Починаючи з 80-х років ХХ століття, вчені ФМІ та інших наукових центрів значну увагу зосереджували на таких проблемах науки про вплив середовищ на міцність матеріалів: з одного боку, уточнення й підтвердження основних положень ФХММ, а з іншого – формування розрахункових схем-моделей, в які введено параметри, що характеризують фізико-хімічні властивості системи “матеріал–середовище”, для кількісного оцінювання роботоздатності матеріалу в конструкції. Особливу увагу науковці приділяють проблемам корозії металів і захисту їх від неї, а також впливу водневовмісних середовищ на міцність металів (В. І. Похмурський, Г. М. Никифорчин, М. С. Хома та ін.).

**Заснування журналу.** Великим внеском Г.В. Карпенка у розвиток наукових і прикладних досліджень з проблем ФХММ є заснування у 1965 р. на базі ФМІ АН УРСР першого в західних областях України академічного науково-технічного журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”. Журнал став об’єднувальним друкованим органом, що публікує результати досліджень у цій галузі науки як українських, так і зарубіжних учених та інженерів-практиків. Починаючи з першого випуску, його перевидають англійською мовою у зарубіжних видавництвах (спочатку в США, а тепер в Європі видавництвом “Springer”). Так науковий напрям утверджувався на світовому рівні. Від заснування журналу і до 1977 р. Г. В. Карпенко був його головним редактором.



Фото 6. Засідання редколегії журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів” (1975 р.). У центрі – головний редактор Г. В. Карпенко.

Photo 6. Meeting of the editorial board of the journal “Physicochemical Mechanics of Materials” (1975). In the center – the journal editor-in-chief H. V. Karpenko.

Враховуючи велику наукову та практичну актуальність розв’язання проблем ФХММ, зокрема корозійно-механічного руйнування металів і захисту

металофонду від корозії, Президія Академії наук УРСР у 1965 р. поклала на ФМІ функції головної академічної організації з цього питання в країні. Очевидно, що це рішення було прийняте з ініціативи директора інституту Г. В. Карпенка (фото 1). Воно дало новий імпульс для розширення теоретичних і прикладних досліджень із різних аспектів ФХММ, у тому числі з проблем корозійно-механічного руйнування металів і розроблення методів та технологій їх захисту від корозії.

**Корозійно-механічне руйнування металів.** У працях Г. В. Карпенка [12–15] закладені основи адсорбційно-електрохімічної теорії корозійної втоми металів. Суть її сформульовано так: корозійне втомлювання металів починається з адсорбційного полегшення виникнення мікротріщини під дією циклічного навантаження. Після цього розвивається корозійний процес (електрохімічна корозія) всередині тріщин, що утворилися, який може сприяти їх подальшому підростанню. Дифузійне проникнення водню на катодні ділянки металу та зменшення їх міцності є частиною електрохімічного процесу. На цій основі вченим сформульовано концепцію адсорбційно-електрохімічної теорії корозійної втоми та корозійного розтріскування металів і сплавів. Вона стала важливим узагальненням досліджень у галузі ФХММ.

У працях Г. В. Карпенка, Ю. І. Бабея, І. І. Василенка, Г. Г. Максимовича, В. І. Похмурського, Р. К. Мелехова, Л. М. Петрова, О. М. Романіва, М. Й. Чаєвського, В. Ф. Шатинського, А. І. Яцюка та інших авторів [12–35] досліджено корозійне розтріскування та корозійна втома багатьох вуглецевих і легованих сталей, що експлуатуються в різних корозивних середовищах. Вивчено особливості корозійно-механічного руйнування конструкційних металів і сплавів залежно від їх структури, механічної та термомеханічної обробки, швидкості навантажень тощо [27–35]. Показано, що корозійна втома відрізняється від втоми металів в інертних середовищах. На відміну від звичайної чи адсорбційної втоми в корозивному середовищі відсутня фізична границя втоми (див., наприклад, рис. 1), суттєве значення має також частота навантаження матеріалу, наприклад, з її пониженням довговічність металів у корозивному середовищі зменшується, тоді як для звичайної втоми частота навантажень не є настільки суттєва. Досліджено вплив структури вуглецевих сталей на границю корозійної втоми, а також залежність цієї границі від статичної міцності низько- й високовуглецевих і нержавних сталей [34]. Ґрунтуючись на експериментальних даних, зроблено важливий практичний висновок про те, що високоміцні низьколеговані та нержавні сталі не мають суттєвих переваг щодо корозійної втоми порівняно з низькоміцними вуглецевими. Це дуже важливо під час вибору матеріалів труб для морського буріння, виготовлення валопроводів морських суден тощо.

Значну увагу учні та послідовники Г. В. Карпенка приділяли корозійному розтріскуванню сплавів, тобто їх руйнуванню під дією агресивних середовищ і статичних довготривалих навантажень (рис. 2). Ця проблема має безпосереднє практичне значення для енергетичної, хімічної, нафтопереробної та інших галузей промисловості. В працях Ю. І. Бабея, І. І. Василенка, Г. М. Круцан, Р. К. Мелехова, Л. М. Петрова, В. І. Похмурського, О. І. Радкевича, Н. Г. Сопрунок та інших науковців ФМІ [15, 21, 22, 33] висвітлено феноменологію механізмів розтріскування сталей у розчинах кислот, лугів, різних солей, а також у водних середовищах, які використовують в атомній і традиційній тепловій енергетиці.

Виявлено, що корозійне розтріскування сталей і сплавів низької та середньої міцності у деяких кислотах зумовлене, у першу чергу, наводнюванням металу. У середовищах із пасивувальними властивостями тріщини розтріскування у металі зароджуються у місцях мікропластичної його деформації за потенціалів активно-пасивного переходу внаслідок селективного розчинення легувальних елементів та інших компонентів сплаву. Локальна депасивація поверхні зумовлює взаємодію середовища з ювенільним металом, яка супроводжується генерацією іонів водню, частина з яких у подальшому абсорбується сталлю і окрихчує її, а інша (після розряду та молізації) виділяється в розчин. Встановлено [33] понад 300 систем “метал–середовище”, для яких можливе за певних умов корозійне розтріскування металу. Особливу увагу приділено розтріскуванню сплавів під дією сірководню [21, 22]. Запропоновано у таких випадках використовувати економно-леговані і модифіковані РЗМ сталі, які тривкі до сірководневого розтріскування, а також ефективні інгібітори сірководневого розтріскування сплавів. На рис. 2 наведені залежності довготривалої корозійної міцності деяких сталей у сірководневому середовищі [22].

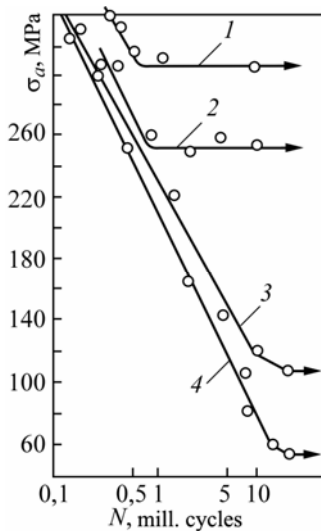


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Криві втоми сталі 45 [20]: 1 – у повітрі; 2 – адсорбційна втома; 3 – воднева; 4 – корозійна.

Fig. 1. Fatigue curves 45 steel [20]: 1 – in air; 2 – adsorption fatigue; 3 – hydrogen; 4 – corrosion.

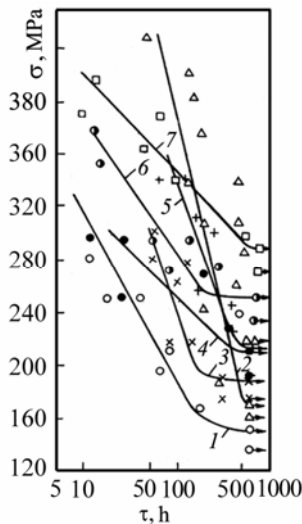


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Довготривала корозійна міцність сталей у розчині NACE (5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH, насичений H<sub>2</sub>S до концентрації 3 г/л): 1 – сталь 20; 2 – 12X1MФ; 3 – 20ЮЧ; 4 – 17ГС; 5 – 14ГБ (зварне з'єднання); 6 – 14ГБ (основний метал); 7 – 02X20H6M3.

Fig. 2. Fatigue curves of 45 steel in NACE solution ((5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH, saturated with H<sub>2</sub>S to concentration 3 g/l): 1 – 20 steel; 2 – 12X1MФ; 3 – 20ЮЧ; 4 – 17ГС; 5 – 14ГБ (welded joint); 6 – 14 ГБ (base metal); 7 – 02X20H6M3.

**Взаємодія водню з металами.** Водень – особливе середовище. Його взаємодія з деформівним металом проявляється по-різному: полегшення пластичного течіння, окрихчення та розтріскування металів, зокрема в зоні зварних швів, тощо. Отже, вплив водню на фізико-механічні властивості матеріалів є одна з актуальних проблем матеріалознавства, механіки руйнування ма-



теріалів і науки про надійність роботоздатності конструкцій тривалої експлуатації у водневовмісних середовищах.

Взаємодії водню з металами значну увагу приділяли в межах досліджень з ФХММ. У 50-ті роки ХХ століття під керівництвом Г. В. Карпенка у ФМІ розпочали вивчати різні аспекти цієї проблеми. Він та його учні вперше у Львові отримали важливі наукові результати у цій галузі, які синтезовано та узагальнено у монографіях Г. В. Карпенка [36], а також Г. В. Карпенка і Р. І. Крип'якевича [37], зокрема, наведено багато відомостей про наводнювання металів під час електрохімічних процесів, про вплив стану поверхні металу, складу середовища та інших чинників на інтенсивність наводнювання. Узагальнено (на той час) теоретичні положення про механізми взаємодії водню з деформованим металом, які мають важливе значення для оптимізації режимів нанесення електролітичних покривів, розроблення відповідних інгібіторів тощо. У працях Г. В. Карпенка, К. Б. Кацова, А. К. Литвина, В. І. Ткачова експериментально показано [38, 39], що за певних умов навантаження металів у водневому середовищі їх пластичне течіння не зменшується, а навпаки, посилюється. Це явище пізніше стало предметом додаткового вивчення, оскільки використання водневовмісних середовищ є важливим для полегшення оброблення металевих виробів [39–41].

У 70–80-ті роки минулого століття у ФМІ досліджували вплив водню на процеси деформування і руйнування заліза та сталей (В. І. Похмурський, М. М. Швед, В. В. Федоров та ін. [42, 43]), а також високотемпературну водневу проникливість металів (Р. І. Крип'якевич, Р. Г. Пархета, І. Й. Сидорак та ін. [44, 45]).

Починаючи з другої половини 70-х років минулого століття, в Інституті інтенсивно розвиваються теоретичні дослідження взаємодії водню з металами на базі концепцій механіки крихкого руйнування [46–53]. З цією метою та для розв'язання актуальних науково-технічних проблем водневого окрихчення конструкційних матеріалів космічної техніки у першій половині 80-х років ХХ століття за підтримки Академії наук України та авіакосмічних підприємств СРСР, зокрема Конструкторського бюро “Хімавтоматика” (О. Д. Конопатов), у ФМІ створюють спеціальну експериментальну базу – Центр комплексних досліджень взаємодії водню з металами “Протон” (К. Б. Кацов, В. В. Панасюк, В. І. Ткачов та ін.). Діяльність Центру спрямована на дослідження роботоздатності конструкційних матеріалів у водневовмісних середовищах для потреб авіакосмічної техніки. Тут виконані роботи щодо вибору матеріалів для водневих двигунів і елементів конструкцій програми СРСР “Енергія–Буря”.

Досягнення науковців Інституту в галузі водневого окрихчення металів (водневої деградації металів), розробки нових композицій матеріалів-поглиначів водню, механоводневих технологій диспергування магнетних матеріалів тощо одержали загальне наукове визнання і у 1996 р. послужили основою для створення в рамках Європейського товариства з цілісності конструкцій (ESIS) спеціального підкомітету “Воднева деградація металів” (голова підкомітету – проф. Г. М. Никифорчин). Базовою організацією підкомітету є ФМІ НАНУ.

**Розвиток досліджень з проблем ФХММ у наукових центрах України.** Науково-організаційна та наукова діяльність Г. В. Карпенка впродовж перших двох десятиріч після створення ФМІ підняла науковий авторитет установи. Інститут став центром в Україні з вивчення проблем фізико-хімічної механіки матеріалів. Тут під керівництвом Г. В. Карпенка, М. Я. Леонова, Г. М. Савіна сформувався колектив молодих науковців (Ю. І. Бабей, І. І. Ва-

силенко, Г. Г. Максимович, Р. К. Мелехов, К. Б. Кацов, Р. І. Крип'якевич, А. Б. Куслицький, В. В. Панасюк, Р. Г. Погорецький, В. І. Похмурський, Я. С. Підстригач, О. М. Романів, А. Н. Тинний, М. Й. Чаєвський, Ф. П. Янчишин, С. Я. Ярема та ін.), який активно працював над розв'язанням актуальних задач ФХММ, зокрема започатковано дослідження впливу поверхнево-активних речовин на міцність і тріщинотривкість матеріалів (Г. В. Карпенко, В. В. Панасюк), корозивних середовищ на втому та розтріскування металів і сплавів (Г. В. Карпенко, Ю. І. Бабей, І. І. Василенко, Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський), наводнювальних середовищ на міцність заліза і сталей (Г. В. Карпенко, Р. І. Крип'якевич, В. І. Ткачов, М. М. Швед та ін.), розплавів легкоплавких металів на міцність і повзучість сталей та тугоплавких металів (Г. Г. Максимович, М. Й. Чаєвський) та ін. Уже у 70–80-ті роки ХХ століття ці науковці досягли немалих успіхів у розв'язанні фундаментальних і прикладних завдань щодо оцінювання надійності та довговічності машин і об'єктів нової техніки з урахуванням реальних умов їх експлуатації (одночасної дії робочих середовищ і зовнішніх навантажень), були закладені основи Львівської школи механіків-матеріалознавців.

*РЕЗЮМЕ.* Дан анализ развития исследований и научных результатов по физико-химической механике материалов как современном научном направлении в материаловедении. Рассмотрены основные этапы развития этого направления в НАН Украины, показана роль Г. В. Карпенко в формировании, а также утверждении этой области науки. Синтезированы важнейшие научные результаты, проиллюстрированы некоторые практические их применения, а также сформулированы актуальные задачи перспективных исследований.

*SUMMARY.* The analysis of the development of investigations and scientific results concerning physicochemical mechanics of materials – a contemporary trend in the field of materials science – are given. Main stages in the development of this trend in the National Academy of sciences of Ukraine are considered. The role of G. V. Karpenko in the formation and strengthening of this branch of science is shown. Most important scientific results are synthesized; their practical application is illustrated here too. Actual problems for prospective investigations have also been formulated.

1. *Ребиндер П. А.* Материалы IV съезда русских физиков. – Москва, 1928; Юбилейный сборник АН СССР к XXX-летию Великой Октябрьской революции. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – Т. 1.
2. *Лихтман В. И., Ребиндер П. А., Карпенко Г. В.* Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 208 с.
3. *Карпенко Г. В.* Влияние активных жидких сред на выносливость стали. – К.: Изд-во АН УРСР, 1955. – 208 с.
4. *Панасюк В. В.* О важнейших задачах исследований по физико-химической механике конструкционных материалов // Физ.-хим. механика материалов. – 1974. – № 4. – С. 3–12.
5. *Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А.* Физико-химическая механика металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 303 с.
6. *Карпенко Г. В., Янчишин Ф. П.* До питання про одночасний вплив на витривалість сталі корозійного середовища і концентрації напруги // Доп. АН УРСР. – 1955. – № 6. – С. 525–528.
7. *Панасюк В. В., Ковчик С. Е.* Влияние поверхностно-активной среды на поверхностную энергию хрупкого разрушения тела // Докл. АН СССР. – 1962. – **146**, № 1. – С. 82 – 85.
8. *Панасюк В. В., Ратыч Л. В., Дмытрах И. Н.* О некоторых задачах исследования циклической трещиностойкости материалов в жидких средах // Физ.-хим. механика материалов. – 1982. – № 6. – С. 42–49; *Panasyuk V. V., Ratych L. V., Dmytrakh I. M.* Fatigue Crack Growth in Corrosive Environments // Fatigue Fract. Eng. Mater. and Struct. – 1984. – **7**, № 1. – Р. 1–11.
9. *Карпенко Г. В., Карлашов А. В.* Влияние абсолютных размеров образцов на адсорбционную и коррозионную усталость стали // Докл. АН СССР. – 1953. – **92**, № 3. – С. 603 – 605.
10. *К вопросу об инверсии масштабного фактора при коррозионной усталости стали / Р. Г. Погорецкий, К. П. Табинский, Н. Н. Ткаченко, Г. В. Карпенко // Физ.-хим. меха-*

- ника материалов. – 1966. – № 3. – С. 357–358; А. с. 356512 СССР. МКИ.G01n3/34. Машина для испытания на усталость / Г. В. Карпенко, Р. Г. Погорецкий, В. И. Похмурский и др. – Опубл. 23.10.72; Бюл. № 37.
11. *Малоцикловая усталость стали в рабочих средах* / Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, И. В. Кокотайло, В. П. Руденко. – К.: Наук. думка, 1977. – 112 с.
  12. *Карпенко Г. В.* Корозійна втома сталі. – К.: Вид-во АН УРСР, 1959. – 177 с.
  13. *Карпенко Г. В., Яцюк А. І.* Вплив обробки поверхні на втомну міцність сталі в активних середовищах. – К.: Вид-во АН УРСР, 1958. – 115 с.
  14. *Карпенко Г. В.* Прочность стали в коррозионной среде. – М.; К.: Машгиз, 1963. – 188 с.
  15. *Карпенко Г. В., Василенко И. И.* Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Техніка, 1971. – 191 с.
  16. *Карпенко Г. В.* Про фізико-хімічну механіку металів. – К.: Наук. думка, 1973. – 176 с.
  17. *Похмурский В. И.* Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы ее повышения. – К.: Наук. думка, 1974. – 186 с.
  18. *Бабей Ю. И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наук. думка, 1988. – 238 с.
  19. *Тынный А. Н.* Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред. – К.: Наук. думка, 1975. – 203 с.
  20. *Карпенко Г. В.* Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – К.: Наук. думка, 1976. – 125 с.
  21. *Василенко И. И., Мелехов Р. К.* Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Наук. думка, 1977. – 265 с.
  22. *Мелехов Р. К.* Коррозионное растрескивание титановых и алюминиевых сплавов. – К.: Наук. думка, 1979. – 128 с; О стойкости отечественных конструкционных сталей против сульфидного растрескивания / Р. К. Мелехов, А. И. Радкевич, А. М. Круцан, Л. М. Карвацкий // Защита металлов. – 1977. – № 5. – С. 493–497.
  23. *Чаевский М. И., Шатинский В. Ф.* Повышение работоспособности сталей в агрессивных средах при циклическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1970. – 312 с.
  24. *Шатинский В. Ф., Збожняя О. М., Максимович Г. Г.* Получение диффузионных покрытий в среде легкоплавких металлов. – К.: Наук. думка, 1976. – 204 с.
  25. *Максимович Г. Г., Шатинский В. Ф., Гойхман М. С.* Диффузионные покрытия драгоценными металлами. – К.: Наук. думка, 1978. – 168 с.
  26. *Похмурский В. И., Далисов В. Б., Голубец В. М.* Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. – К.: Наук. думка, 1980. – 187 с.
  27. *Бабей Ю. И., Сопрунюк Н. Г.* Защита стали от коррозионно-механического разрушения. – К.: Наук. думка, 1981. – 125 с.
  28. *Карпенко Г. В.* Избр. тр.: в 2-х т. – К.: Наук. думка, 1985. – Т. 1: Физико-химическая механика конструкционных материалов. – 226 с.; Т. 2: Работоспособность конструкционных материалов в агрессивных средах. – 240 с.
  29. *Высокотемпературная работоспособность тугоплавких металлов и сплавов в агрессивных средах* / Г. Г. Максимович, В. Ф. Шагинский, Е. М. Лютый и др. – К.: Наук. думка, 1982. – 224 с.
  30. *Максимович Г. Г., Шатинский В. Ф., Копылов В. И.* Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1983. – 260 с.
  31. *Термическая обработка титановых и алюминиевых сплавов в вакууме и инертных средах* / Г. Г. Максимович, В. Н. Федирко, Я. И. Спектор, А. Т. Пичугин. – К.: Наук. думка, 1987. – 184 с.
  32. *Шатинский В. Ф., Нестеренко А. И.* Защитные диффузионные покрытия. – К.: Наук. думка, 1988. – 271 с.
  33. *Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій* / В. І. Похмурський, Р. К. Мелехов, Г. М. Круцан, В. Г. Здановський. – К.: Наук. думка, 1995. – 260 с.
  34. *Похмурский В. И.* Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.
  35. *Петров Л. Н., Сопрунюк Н. Г.* Коррозионно-механическое разрушение металлов. – К.: Наук. думка, 1991. – 216 с.

36. Карпенко Г. В. Вплив водню на механічні властивості сталі. – К.: Вид-во АН УРСР, 1960. – 72 с.
37. Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И. Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 196 с.
38. Карпенко Г. В., Литвин А. К., Ткачев В. И. К вопросу о механизме водородной хрупкости металлов // Физ.-хим. механика материалов. – 1973. – № 4. – С. 6–11; А. с. 654062 СССР. Способ обработки металлов / Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, А. К. Литвин, В. И. Ткачев. – Опубл. 05.07.77; Бюл. № 25.
39. Литвин А. К., Ткачев В. И. Явление облегчения деформирования и разрушения металла в присутствии водорода // Физ.-хим. механика материалов. – 1976. – № 2. – С. 27–34.
40. А. с. 609021 СССР. Способ уменьшения коэффициента трения металлов / Г. В. Карпенко, К. Б. Кацов, А. К. Литвин, В. И. Ткачев. – Опубл. 30.05.78; Бюл. № 20.
41. Житомирский В. Н., Возный Т. Д., Ткачев В. И. Влияние водорода на деформирование поверхностных слоев металла // Физ.-хим. механика материалов. – 1982. – № 3. – С. 115–116.
42. Похмурский В. И., Швед М. М., Яремченко Н. Я. Влияние водорода на процессы деформирования и разрушения железа и стали. – К.: Наук. думка, 1977. – 60 с.; Швед М. М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – К.: Наук. думка, 1985. – 118 с.
43. Похмурский В. И., Федоров В. В. Некоторые особенности влияния водорода на магнитные и структурные превращения в переходных металлах и сплавах на их основе // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 1. – С. 3–11.
44. Методические рекомендации по определению высокотемпературной водородопроницаемости металлов / В. И. Похмурский, И. И. Сидорак, Р. Г. Пархета и др. – Львов, 1983. – 22 с. – (Препр. / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 117; Отраслевой стандарт. Металлы. Методы определения высокотемпературной водородопроницаемости: ОСТ 92–4949–84 (Москва, 1984).
45. Похмурський В. І. Дослідження впливу водню на метали у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – **29**, № 4. – С. 25–38. (Pokhmurs'kyi V. I., Investigations of the Influence of Hydrogen on Metals Carried out in the Karpenko Physicomechanical Institute // Materials Science. – 1997. – **29**, № 4. – P. 421–435.)
46. Андрейкив А. Е., Панасюк В. В., Харин В. С. Теоретические аспекты кинетики водородного охрупчивания металлов // Там же. – 1978. – № 3. – С. 3–23.
47. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Харин В. С. Модель роста трещины в деформированных металлах при воздействии водорода // Там же. – 1987. – № 2. – С. 3–17.
48. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Обухивский О. И. Расчетная модель роста трещины в металлах при воздействии водорода // Там же. – 1984. – № 3. – С. 3–6.
49. Андрейкив А. Е., Голяня О. М. Докритический рост усталостных трещин в металлах при воздействии водорода // Там же. – 1985. – № 4. – С. 5–8.
50. Водородное растрескивание металлов и сплавов и его акустико-эмиссионный контроль / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, В. Р. Скальский и др. // Там же. – 1992. – **28**, № 4. – С. 63–69. (Andreikiv A. E., Lysak N. V., Skal'skii V. R., Parasyuk I. L., and Sergienko O. N., Acoustic-Emission Monitoring of Hydrogen Cracking in Metals and Alloys // Soviet Materials Science. – 1992. – **28**, № 4. – P. 378–382.)
51. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у воденьвмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
52. Influence of hydrogen containing elements on cyclic crack growth resistance of metals / V. V. Panasyuk, O. Ye. Andrejkiv, O. I. Darchuk, N. V. Kuznyak // Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures / Ed. A. Carpinteri. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – P. 1205–1242.
53. Федоров В., Булик І., Панасюк В. Використання водню як технологічного середовища для виготовлення сталих магнетів на основі сплавів РЗМ // Зб. пр. 4-ої Міжнар. конф. “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів: ФМІ, 2009. – С. 603–608.

Одержано 06.04.2010