

УДК 539.4.01; 539.4.019.3

КОНЦЕПЦІЯ ДЕКОГЕЗИВНОГО ВПЛИВУ ВОДНЮ НА МЕТАЛИ

В. В. ПАНАСЮК

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

Розглянуто деякі концепції взаємодії водню з металами (заліза та його сплавів) за умов навантаження у водневому середовищі, зокрема, їх водневого окрихчення. Цій проблемі присвячена велика кількість досліджень [1–10], в яких запропоновано різні концепції-моделі для обґрунтування механізмів водневого окрихчення металів. Але на їх основі не вдається зрозуміти двоїстий характер дії водню на деформування металів, тобто полегшення їх пластичного деформування та окрихчення. Описано декогезивну концепцію взаємодії водню з металом, на підставі якої можна пояснити процеси пластифікування металу на початковій стадії деформування, а під час подальшого деформування – і окрихчення. Наведено огляд досліджень у цьому напрямку науковців Фізико-механічного інституту (ФМІ) ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Ключові слова: *металічні матеріали, водень, деформація, воднева декогезія між-атомних зв'язків, пластифікування та окрихчення металів, тріщиностійкість.*

Вступ. Елементи конструкцій і споруд під час експлуатації завжди контактують з навколишніми середовищами, у складі яких у багатьох випадках присутній водень. Такі водневмісні середовища використовують у хімічній, металургійній та енергетичній промисловості. Водень, що проникає в метал крізь поверхню, або знаходиться у ньому, змінює фізико-механічні характеристики металу. Наприклад, зменшує пластичність його макрооб'ємів, границі текучості або міцності, чи на початковій фазі деформування полегшує пластичне деформування металу. Тому важливо визначити вплив водню на фізико-механічні властивості металів і розробити методи розрахунку характеристик їх опірності руйнуванню (поширенню тріщин), щоб оцінити роботоздатність елементів конструкцій у заданих водневмісних середовищах.

У середині 20-го століття достатньо ґрунтовно проаналізовано [1–17] результати досліджень у цьому напрямку. Необхідно зауважити, що суттєвим імпульсом у розвитку цього матеріалознавчого напрямку стало використання досягнень механіки руйнування деформівних твердих тіл з дефектами типу тріщин (гострих концентраторів напружень) та розроблення концепції фізико-хімічної ситуації, яка виникає біля вершини тріщини, якщо деформівне тіло знаходиться у певному середовищі, що проникає в околі вершини [18, 19]. Оскільки під час експлуатації машин і споруд недопустимо нехтувати можливістю появи в матеріалі конструкцій дефектів типу тріщин, то згадана вище концепція фізико-хімічної ситуації біля вершини тріщини, тобто в зоні передруйнування, куди проник водень, набуває особливого значення. Саме зі зміною цієї ситуації за умов дії водневмісного середовища, порівняно з нейтральним, змінюється опірність матеріалу поширенню в ньому тріщини, тобто його тріщиностійкість, яка є визначальною характеристикою для оцінювання роботоздатності матеріалу під час тривалої експлуатації.

За впливу нейтрального середовища тріщини, що виникають у деформованому матеріалі, можуть рости до певних критичних розмірів, які визначають через характеристики тріщиностійкості матеріалу, розміри дефекту та параметри наван-

таження. Під дією водню критичний розмір тріщини зменшується внаслідок зниження тріщиностійкості матеріалу, що стає причиною прояву його крихкості та небезпеки крихкого руйнування. На початку 21-го століття вагомі результати про водневе окрихчення металів і ріст тріщин у наводнених металах одержали американські і японські учені [20–23], а також українські дослідники [10, 11, 24–30].

Нижче проаналізовано деякі концепції водневого окрихчення металів, зокрема і декогезивну концепцію взаємодії водню з металами, яка пояснює процеси пластифікування металу (заліза та його сплавів) на початковій стадії деформування, а у подальшому – і окрихчення. Розглянемо деякі відомі концепції водневого окрихчення металів, використовуючи літературні результати [2–30].

Концепція (гіпотеза) тиску водню в пошкодженнях структури металу (в колекторах), куди він проникає. Її висунули Цапффе і Сімс у 1941 році [31], стверджуючи, що водень, який знаходиться в металі, дифундує в місця пошкодження (структурні неоднорідності, дефекти структури) металу, молізується і створює там (у мікропорожнинах певного розміру) великий тиск. Такий тиск, у свою чергу, зумовлює біля пошкоджень об'ємний напружений стан, що є причиною інтенсивного нагромадження у цих зонах водню та гальмування пластичного деформування металу під час подальшого його навантаження, тобто це і є один із механізмів водневого окрихчення металу. На основі цієї концепції пояснюють зміну (пониження) деяких фізико-механічних характеристик наводнених сталей під час їх деформування, коли в їх об'ємі є певна концентрація водню. Це (вважають) свідчить про правильність концепції. Але поява високого тиску, зумовленого молізованим воднем у мікропорожнинах, ще недостатньо обґрунтована в межах законів дифузії, а пряме експериментальне підтвердження відсутнє.

Модифікація концепції “Тиск водню в колекторах”. У літературі є ряд її видозмін. Зокрема, деякі вчені вважають, що основним механізмом окрихчення металів під дією водню є дислокаційно-дифузійний. Він полягає ось у чому. Під час деформування наводненого зразка водень дифундує в площини ковзання і у “пошкоджених місцях металу” молізується, створюючи у таких колекторах тиск, а отже, зони об'ємного напруженого стану, через що гальмується рух дислокацій як первинних актів пластичного деформування металу. У цьому, вважають, і полягає фізична суть водневого окрихчення металів. Тут використовують також уявлення про водневі “хмаринки” Котрелла, які формуються біля дислокацій у наводненому металі (вважають, що водень у металічній ґратці знаходиться у вигляді атомів або іонів). Таке узагальнення розвинули французькі науковці [32] і воно фактично детермінує місця та причини появи локальних мікропошкоджень у структурі наводненого металу під час його навантаження та зводиться до твердження: водень у вигляді протонів у деформованому металі взаємодіє з дислокаціями і формує “хмаринки” Котрелла біля ядер дислокацій, які, рухаючись із цими “хмаринками”, наштовхуються на колектори (пошкодження). Тоді “хмаринки” або частково, або повністю переходять у колектор, в якому водень молізується та створює “тиск”. Важливо для цього узагальнення обґрунтувати, чому атомарний чи протонний водень, наблизившись до поверхні колектора, проникає у середину колектора, а не обходить його.

У праці [33] автори говорять про два механізми водневої крихкості металів, які діють одночасно. Перший не залежить від швидкості наводнювання і дифузії водню, який можна розглядати [11] як квазііони H^+ . Це т. зв. “незворотна воднева крихкість металів”. Цей механізм не пов'язаний з молекулярним тиском водню, але не пояснено його суті. Другий механізм полягає у наявності певного інкубаційного періоду, впродовж якого водень дифундує та його концентрація у пошкоджених місцях стає критичною, тобто необхідною для окрихчення металу. Фізична суть окрихчення все-таки не розкрита. Якщо скористатися результатами праці

[11], то цей водень можна розглядати як квазіон H^+ , який є дифузійно-рухливим і за деякої концентрації може призвести до окрихчення.

Адсорбційна теорія водневої крихкості металів. Цю концепцію висунули в працях [3, 34]. Згідно з нею наводнювання сталі починається з адсорбції водню на її поверхні. Далі він проникає у середину металу, в кристалічну ґратку та дефекти (колектори). Адсорбція водню, з одного боку, зменшує поверхневу енергію колекторів, тобто полегшує крихке руйнування, а з іншого – сприяє пластичному деформуванню та зародженню дислокацій. Але, як це відзначає Г. В. Карпенко [2], неможливо пояснити зниження пластичності сталі лише впливом внутрішнього тиску водню в колекторах структури матеріалу (сталі).

Концепція Г. В. Карпенка та Р. І. Крип'якевича [2]. Водень, який потрапляє в метал, є протонним газом, який може в ньому легко дифундувати. Інтенсивність дифузії залежить від температури, градієнтів його концентрації, градієнтів поля напружень тощо. Тому протонний водень у металі розподіляється дуже нерівномірно та концентрується в зонах тривісного розтягу. Досягнувши поверхні внутрішнього колектора і проникнувши в нього, молізується і створює там тиск. У результаті такі колектори ростуть до макророзмірів. Якщо колектор є концентратором напружень, то біля нього виникає тривісний напружений стан, що сприяє накопиченню водню біля концентратора (тріщини) на певній відстані від його вершини.

Г. В. Карпенко також аналізує розглянуту в працях [3, 33, 34] схему (два механізми окрихчення), але пояснення дає інше. Він стверджує, що механізм “незворотної” водневої крихкості пов’язаний не тільки з перенесенням водню в колектори і підвищенням тиску у них, а й з перерозподілом його концентрації в околі колектора за сприятливих для дифузії умов (мала швидкість деформування, середні температури). Тоді водень накопичується біля гострих вершин колекторів і замість пластифікувальної дії створює умови для блокування руху дислокацій, тобто для окрихчення. Таким чином, розчинений у металі водень, починаючи з деякого моменту, вже локально зміцнює метал або понижує пластичність у його мікрооб’ємах (а не в макрооб’ємах), що призводить до утворення мікротріщин за менших напружень, ніж за відсутності водню.

Формулювання концепції водневого окрихчення металу в монографії [2] зводиться до такого. “Водень понижує міцність тільки у мікрооб’ємах (біля вершини тріщин), а не по всьому перерізу зразка”. Цей висновок дуже важливий. Саме він і підтверджує ідею про те, що водневу крихкість необхідно оцінювати через локальну опірність (тріщиностійкість) конструкційного матеріалу (металу) у водневомісному середовищі. Концепція Карпенка–Крип’якевича є певним синтезом попередніх концепцій і важливих доповнень до аналізу взаємодії водню з мікрооб’ємами металу (на рівні елементів його структури) та на цій основі розкриває можливість формування підходів для оцінювання зміни фізико-механічних характеристик макрооб’ємів металу.

Підсумовуючи, необхідно сказати, що всі концепції водневого окрихчення загальноописові. У них не вибраний головний чинник явища водневого окрихчування і на цій основі не запропоновано відповідну розрахункову модель для оцінювання фізико-механічних характеристик металів залежно від концентрації водню в металі. Цей висновок співзвучний із трактуванням проблеми водневого окрихчення металів у працях [20–23].

Дослідження цієї проблеми у ФМІ у другій половині 20-го століття. Вагомим досягненням цього періоду в Інституті є організація (у 80-ті роки) Міжвідомчого центру “Протон” як складової частини його науково-технічного комплексу. Головне завдання Центру – вивчити роботоздатність конструкційних матеріалів у водневомісних середовищах за високих тисків водню (до 10^8 Па) та температур (до 1000°C). У 1988 р. під керівництвом К. Б. Кацова – директора Центру

підготовлено та опубліковано результати досліджень фізико-механічних властивостей низки конструкційних сталей і сплавів, що працюють у середовищах з воднем у нафтохімії та ракетній техніці. Їх оформлено у вигляді “Атласу фрактограм” [35], де наведено фізико-механічні параметри жароміцних сплавів ЭП666; ВЖЛ-14; ЭП915 та сталей 12Х18Н10Т; ВНС-25(ЭП810); ВНС-16; ЭК-49; ЭП288; ЭП56. Для них побудовані залежності стандартних характеристик міцності у заданих експлуатаційних (водневовмісних) середовищах від їх температури, тиску водню, виду навантаження тощо. Крім цього, виконано великий обсяг металографічних досліджень місць руйнування цих матеріалів під час випробувань у водні. В “Атласі”, однак, не висвітлені фізичні концепції механізмів водневого окрихчення чи пластифікування металів, не наведені критерії оцінювання їх робоздатності у заданих умовах експлуатації тощо.

Важливим етапом у розвитку досліджень у ФМІ з водневого матеріалознавства за останні 30 років є підготовка та публікація монографії В. І. Ткачова, В. І. Холодного і І. М. Левіної [14], де узагальнено інформацію про вплив водню підвищених тисків на фізико-механічні властивості (міцність, пластичність, утому, тертя та зношування) розглянутих в “Атласі” сталей і сплавів. Узагальнені припущення про механізми окрихчування металів, зокрема про те, що “явище воднеокрихчування зумовлено наявністю нових дислокацій, які ініційовані воднем і заблоковані певними бар’єрами”. Книга є цінним синтезом нових даних про взаємодію водню з металами та теорії водневого матеріалознавства. Тут виокремимо також статтю В. І. Похмурського [36], де проаналізовано розробки Інституту, а також результати досліджень структури наводнених сталей. Однак нема інформації про взаємозв’язок між елементами структури металу та концентрацією в ньому водню. У спеціальному розділі (главі) англomовного довідника [16] синтезовано результати досліджень, виконаних у ФМІ з водневого матеріалознавства. Зокрема, зосереджено увагу на вивченні поширення втомних тріщин у наводнених і деформованих металах. Особливо важливою є публікація О. П. Осташа і В. І. Витвицького [26], у якій йдеться про двоїстість дії водню на деформування металу – пластифікування та окрихчення.

Підсумовуючи досягнення ФМІ за минулі роки, слід відзначити, що в публікаціях недостатньо висвітлено такі питання водневого матеріалознавства:

1. Концентрація водню в зоні руйнування матеріалу та опірність металічного матеріалу поширенню в ньому тріщини.
2. Зміни тонкої структури матеріалу під дією водню перед самим руйнуванням, тобто в околі вершини тріщини.
3. Не сформульовано концепцію, яка б описувала двоїстий характер впливу водню на поведінку деформованих металів.

У наведених вище концепціях і дослідженнях розглядають у першу чергу явище окрихчення металу. Водночас відомі публікації [37, 38], в яких стверджують, що на початковому етапі деформування водень сприяє пластичному деформуванню металу, тобто зафіксовано позитивний його вплив на деформування, а тільки зі збільшенням концентрації водню виникає окрихчення, тобто його вплив має двоїстий характер [26]. Цю особливість слід враховувати, формуючи концепції взаємодії водню з деформованим металом. Важливі також дослідження про його використання як технологічного середовища [39]. Сформульовані концепції (твердження) про взаємодію водню в мікро- або мезооб’ємах металу дають можливість пояснити (якісно!) деякі результати, одержані для макрооб’ємів металу, про падіння фізико-механічних характеристик за умов дії водню (σ_B , σ_T , δ , ψ). Але нема поетапного опису водневого механізму окрихчення металу та не визначено головного чинника у взаємодії водню з металічною ґраткою, який є первинним для водневого окрихчення або пластифікації металів.

Дислокаційно-декогезивна модель утворення мікротріщини у наводненому та деформованому металі. У середині 80-х років 20-го століття у ФМІ сформульовано [40, 41] розрахункову модель утворення мікротріщини у наводненому і деформованому металічному тілі, коли рух крайових дислокацій у ньому зупиняє певний бар'єр (наприклад, границя зерна кристалічного тіла), а зовнішнє навантаження зростає. На рис. 1 зображено схему задачі про утворення мікротріщини у заблокованому бар'єром лінійному ряду крайових дислокацій під дією зовнішніх навантажень. Тут вперше враховано декогезивну дію водню на сили зчеплення в кристалітній ґратці металу, зокрема в ядрах дислокацій. Зауважимо, що в такому ядрі водень не може молізуватися, оскільки ядро не є пошкодую зі сформованою поверхнею тіла і її можна лише умовно розглядати як субмікротріщину, протилежні "береги" якої взаємодіють з інтенсивністю $g_0(u_i)$.

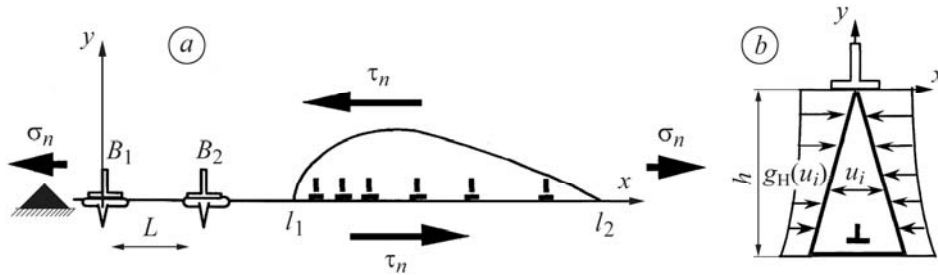


Рис. 1. Схема дискретно-континуальної моделі заблокованого ряду крайових дислокацій (а) і декогезивної дії водню в ядрі дислокації (b); ▲ – бар'єр.

Fig. 1. A discrete-continuum model of blocked series of edge dislocations (a) and decohesive hydrogen effect in the dislocation core (b); ▲ – barrier.

Отже, розглянуто задачу, коли водень, що знаходиться в металі, потрапив у ядра дислокацій і там відбулося явище водневої декогезії, тобто зменшилися сили зчеплення між протилежними "берегами" (стінками) дислокаційного ядра (рис. 1b). На рисунку зображено ядро крайової дислокації, в якому накопичився водень і в результаті його декогезивної дії послабились сили притягання між протилежними берегами атомних площин ядра. Це фіксує функція $g_H(u_i)$, де u_i – відстань між протилежними берегами дислокаційного ядра (функція $g_H(u_i)$ менша за функцію $g_0(u_i)$, що характеризує силу притягання між берегами ядра лінійної дислокації, коли водень в її ядрі відсутній). Враховуючи це, проаналізуємо ситуацію, коли перша дислокація (B_1 на рис. 1a) наштовхнулася на бар'єр і зупинилася. На неї під дією напруження τ_n тисне дислокація B_2 , а також решта дислокацій ($n-2$). Тоді для заданого напруження τ_n і σ_n між цими головними дислокаціями (B_1 і B_2), які знаходяться на відстані L , встановиться певна напружено-деформована рівновага. Силу взаємодії $F_{B_1 B_2}(L)$ між цими дислокаціями можна встановити із гранично-рівноважного стану такого (загальмованого) лінійного ряду крайових дислокацій. Цю задачу розв'язали в працях [40, 41]:

$$F_{B_1 B_2}(L) = \frac{E}{4\pi(1-\mu^2)} \cdot \frac{B_1 B_2}{L} \cdot \left[1 - \frac{f(B_1, B_2, \tau_n, \sigma_n, g_H, n)}{L^2} \right],$$

де E – модуль Юнга матеріалу; μ – коефіцієнт Пуассона; B_1 і B_2 – потужності перших двох дислокацій; $g_H = g_H(u_i)$ – функція взаємодії між берегами ядра лінійних дислокацій ($g_H < g_0$); n – їх кількість; τ_n і σ_n – напруження, які виникають у тілі в площині ковзання під час його навантаження. На рис. 2 розв'язок цієї задачі описує суцільна крива 1, а крива 2 – класичний розв'язок, коли не враховують декогезивну дію водню на сили взаємодії між елементами кристалічної ґратки, тобто коли у наведеній формулі функція $f(\dots) = 0$.

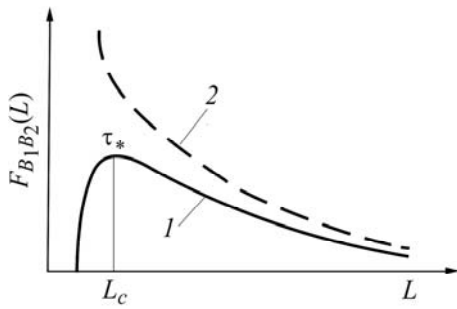


Рис. 2. Зміна сил відштовхування між головними дислокаціями (B_1 і B_2) залежно від відстані L між ними: 1 – за наведеною формулою; 2 – за цією ж формулою, коли функція $f(\dots) = 0$.

Fig. 2. Variation of repulsion forces between main dislocations (B_1 and B_2) depending on the distance L between them: 1 – by the presented formula; 2 – by the same formula, if function $f(\dots) = 0$.

Розв'язок [40, 41] свідчить, що у заблокованому ряду крайових дислокацій у наводненому та навантаженому зовнішніми зусиллями металі, якщо враховувати декогезивну дію водню, перші дві дислокації можуть об'єднатися, тобто утворити дислокаційну мікротріщину, якщо напруження $\tau_n \geq \tau_* < \infty$ забезпечить наближення цих дислокацій (B_1 і B_2) на відстань $L < L_c$. За таким механізмом об'єднуюватимуться наступні дислокації і врешті-решт сформується потужна дислокація-субмікротріщина. Це дає підстави стверджувати, що першопричиною зміни фізико-механічних характеристик металів є декогезивна дія водню на сили міжатомної взаємодії між компонентами кристалічної ґратки.

Декогезивна концепція водневого пластифікування або окрихчення металів. У працях [40, 41], вивчаючи заблокований стан лінійного ряду крайових дислокацій, враховували водневу декогезію (зменшення) сил зчеплення між компонентами кристалічної ґратки в ядрах дислокацій металу. За результатами цих досліджень можна сформулювати декогезивну концепцію водневого пластифікування або окрихчення металічних матеріалів. Фізична її суть така: первинним (базовим) фізичним явищем взаємодії водню з кристалічною ґраткою металу є декогезія (зменшення) сил зчеплення елементів кристалічної ґратки металів.

Ця концепція не протирічить існуючим, але розглядає головний (вихідний) чинник впливу водню на метали. Очевидно, що таке твердження про декогезивну дію розчиненого водню в металі на послаблення сил зчеплення компонентів кристалічної ґратки потребує спеціальних досліджень. Автори статті [20] переконують, що "вплив водню ... на закони декогезивної взаємодії в металах не можна описати в рамках класичних підходів механіки суцільних середовищ. Ці складні та дуже локалізовані явища можна розглядати тільки в рамках квантово-механічної теорії". Цього декогезивна концепція не заперечує. Але інженерна практики потребує чітких постулатів (тверджень), які б ґрунтувалися на результатах досліджень локалізованих явищ взаємодії водню з металами і на підставі яких можна було б сформулювати необхідні розрахункові моделі механіки деформівних твердих тіл для оцінювання роботоздатності (довговічності) конструкційних матеріалів у водневовмісному середовищі.

Декогезивну концепцію водневого пластифікування або окрихчення металів можна вважати основою для формування таких розрахункових моделей. На підставі цієї концепції, яка розглядає взаємодію водню з деформованим металом (залізо та його сплави) як первинне явище, можна пояснити, наприклад, деякі макроскопічні ефекти, експериментально встановлені під час їх деформування у водні, зокрема, виокремимо такі.

- Виявлено [37, 38, 42], що на початковій фазі деформування у водневому середовищі пластичне деформування сталей водень не гальмує, а навпаки, посилює. Це можна пояснити саме декогезивним його впливом на послаблення міжатомної взаємодії в кристалічній ґратці та полегшенням утворення та руху дислокацій – носіїв пластичної деформації. Переконливим прикладом цього є результати, опубліковані в статтях [42, 43]. Показано також [44], що дифузійні процеси у

наводненому металі інтенсифікуються, що узгоджується з декогезивною концепцією впливу водню, зокрема, якщо врахувати результати праці [11].

- Базове твердження “концепції водневої декогезії” не заперечує формування “водневих хмаринок” Котрелла біля ядер дислокацій, пояснює і можливий (полегшений) їх рух із “хмаринками”, не суперечить концентрації водню в колекторах, а після молізації там виникнення відповідного його тиску у пошкодженнях і зонах локального тривісного напруженого стану біля таких пошкоджень.

- Вище розглядали ситуацію, коли дислокації – носії пластичної деформації металу наштовхнулися на певний бар’єр і не змогли його подолати, а зовнішнє навантаження зростало. За декогезивною моделлю водневої взаємодії сили відштовхування між першими двома дислокаціями (B_1 і B_2) за певних (кінцевих) значень напружень $\tau_n \geq \tau_*$, коли відстань між ними $L < L_c$, зменшуються і дислокації об’єднуються, а далі ситуація повторюється, внаслідок чого утвориться відносно велика дислокація-мікротріщина, яка поглине водень, що принесли дислокації. Отже, заблоковані носії пластичної деформації формують мікротріщини, в яких є водень, що молізується і тисне на стінки цієї мікротріщини. В результаті рух носіїв пластичної деформації заблокований і тіло стає крихким. У цьому і полягає фізична природа водневого окрихчення металів.

- Простежити за всіма мікротріщинами та рухом дислокацій практично неможливо. Але наведені міркування свідчать про необхідність зосередити увагу на малому об’ємі наводненого металу біля макроскопічної тріщини (гострого концентратора напружень). Якщо зразок металу з тріщиною наводнити і навантажити, то всі ці процеси мають відбутися біля вершини тріщини. Тому найважливіше завдання водневого матеріалознавства – вивчити взаємодію водню з деформованим металом біля вершини гострого концентратора напружень і встановити характеристики тріщиностійкості наводненого металу, тобто його опірність поширенню тріщини залежно від концентрації водню в зоні передруйнування металічного матеріалу.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены некоторые концепции взаимодействия водорода с металлами (железа и его сплавов) при нагружении в водородной среде, в частности, их водородного охрупчивания. Этой проблеме посвящено большое количество исследований [1–10], где предложены различные концепции-модели для обоснования механизмов водородного охрупчивания металлов. Однако на их основе нельзя объяснить двойственный характер воздействия водорода на деформирование металлов, т. е. облегчение их пластического деформирования и охрупчивания. Описана декогезионная концепция взаимодействия водорода с металлом, на основании которой можно объяснить процессы его пластифицирования на начальной стадии деформирования, а при дальнейшем деформировании – и охрупчивания. Приведен обзор исследований по этой проблеме ученых Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины.

SUMMARY. Some concepts of the interaction of hydrogen with metals (iron and its alloys) under loading in hydrogen environment, in particular of their hydrogen embrittlement are considered. A great number of investigations [1–10] deal with this problem in which different concepts-models for substantiating the mechanisms of metal hydrogen embrittlement are proposed. However, on their bases it is not possible to understand the ambiguous character of hydrogen influence of metal deformation that is the facilitation of their plastic deformation and embrittlement. The cohesive concept of hydrogen-metal interaction is described, using which it is possible to explain the processes of material plastification at the initial stage of deformation and during the following deformation – the embrittlement. A review of the researches into this problem carried out by the scientists of H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of sciences is proposed.

1. *John W. Hanneken.* Hydrogen in metals: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences // Int. J. of Hydrogen Energy. – 1999. – № 24. – P. 1005–1026.
2. *Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И.* Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 196 с.
3. *Потак Я. М.* Хрупкое разрушение стали. – М.: Оборонгиз, 1955. – 118 с.

4. *Карпенко Г. В.* Вплив водню на механічні властивості сталі. – К.: Вид-во АН УРСР, 1960. – 72 с.
5. *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.
6. *Арчаков Ю. И.* Водородоустойчивость стали. – М.: Metallurgiya, 1978. – 150 с.
7. *О механизме влияния водорода на хрупкость металлов / И. К. Походня, В. И. Швачко, В. И. Упырь и др. // ДАН СССР. – 1989. – 308, № 45. – С. 1131–1134.*
8. *Колачев Б. А.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgizdat, 1985. – 216 с.
9. *Stroe M. E.* Hydrogen embrittlement of ferrous materials. <http://theses.ulb.ac.be/ETD-dm/collection/available/ULBetd-03312006-122217/unrestricted/HydrogenEmbrittlementFerrousMaterials.pdf>
10. *Швачко В. И.* Водородная хрупкость ОЦК-сплавов железа // Вопросы атомной науки и техники. – 2000. – № 5. – С. 79–86.
11. *Сміян О. Д.* Водень в металі як бозонна рідина // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – 5, № 4. – С. 750–757.
12. *Швед М. М.* Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – К.: Наук. думка, 1985. – 118 с.
13. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Сміян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1991. – 266 с.
14. *Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. Н.* Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. – Львов: Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко, 1999. – 256 с.
15. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Харин В. С.* Теоретический анализ роста трещин в металлах при воздействии водорода // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – 17, № 4. – С. 61–75.
(*Panasjuk V. V., Andreikiv A. E., and Kharin V. S.* Theoretical analysis of crack growth in metals under the action of hydrogen // Materials Science. – 1981. – 17, № 4. – P. 340–352.)
16. *Influence of Hydrogen Containing Environments 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.*
17. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Ковчик С. Е.* Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – К.: Наук. думка, 1977. – 278 с.
18. *Panasjuk V. V., Ratych L. V., and Dmytrakh I. M.* Fatigue crack growth in corrosive environments // Fatigue Engng. Mater. and Struct. – 1984. – 7, № 1. – P. 1–11.
19. *Дмитрах І. М., Панасюк В. В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування матеріалів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 342 с.
20. *Serebrinsky S., Carter E. A., and Ortiz M.* A quantum-mechanically informed continuum model of hydrogen embrittlement // J. Mech. and Physics of Solids. – 2004. – № 52. – P. 2403–2430.
21. *Murakami Y.* Effect of hydrogen on Fatigue crack growth of metals // Proc. 17th European Conf. on Fracture (Brno, Czech Republic, September 2–5, 2008). – Brno, 2008. – P. 25–42.
22. *Gerberich W. W., Stauffer D. D., and Sofronis P.* A coexistent view of hydrogen effects on mechanical behavior of crystals: HELP and HEDE // Effects of Hydrogen on Materials. Proc. of the 2008 Int. Hydrogen Conf. / Eds.: B. Somerday, P. Sofronis, R. Jon. – Ohio: ASM International, 2009. – P. 38–45.
23. *Murakami Y.* Hydrogen embrittlement mechanics in fatigue and fracture // Proc. 19th European Conference on Fracture (Kazan, Russia, August 26–31, 2012) (on CD, № 614).
24. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневовмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
25. *Панасюк В. В., Дмитрах І. М.* Міцність конструкційних металів у водневовмісних середовищах // Фізико-механічний інститут (До 60-річчя з часу заснування) / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: Сполом, 2011. – С. 101–120.
26. *Осташ О. П., Витвицький В. І.* Двоїстість дії водню на механічну поведінку сталей і структурна оптимізація їх воднетривкості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 4. – С. 5–19.
(*Ostas O. P. and Vytvyts'kyi V. I.* Duality of the action of hydrogen on the mechanical behavior of steels and structural optimization of their hydrogen resistance // Materials Science. – 2011. – 47, № 4. – P. 421–437.)

27. *Витвицький В. І.* Воднетривкість сплавів на основі заліза, нікелю та титану // Там же. – 2004. – **40**, № 6. – С. 7–18.
(*Vytvyts'kyi V. I.* Strength of alloys based on iron, nickel, and titanium in high-pressure hydrogen // Materials Science. – 2004. – **40**, № 6. – P. 717–730.)
28. *Panasjuk V. V.* Fracture and strength of metallic materials in hydrogen environment // Proc. 18th European Conf. on Fracture (Dresden, Germany, August 30–September 03, 2010). – Dresden: DVM (on CD).
29. *Походня І. К., Швачко В. І., Уткін С. В.* Вплив водню на рівновагу дислокаційної субмікродіагностики в α -залізі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – **38**, № 1. – С. 7–14.
(*Pokhodnya I. K., Shvachko V. I., and Utkin S. V.* Influence of hydrogen on the equilibrium of a dislocation submicrocrack in α -iron // Materials Science. – 2002. – **38**, № 1. – P. 1–10.)
30. *Металлургия дуговой сварки / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич и др.* // Взаимодействие металла с газами. – К.: Наук. думка, 2004. – 442 с.
31. *Zappfe C. and Sims C.* // Trans. AIME. – 1941. – P. 225.
32. *Bastien P. and Azou P.* Rev. metallurgie. – 1952. – **12**, № 12. – P. 837–848. (Сб. “Проблемы современной металлургии”. – 1953. – № 6. – С. 96–110.)
33. *Морозов Л. С., Минчин Т. Э.* О водородной хрупкости металлов // Металловедение. – 1958. – Вып. 2. – С. 3–24; там же. – 1959. – Вып. 3. – С. 51–57.
34. *Потак Я. М.* Лабораторные методы оценки склонности стали к хрупкому разрушению // Заводская лаборатория. – 1956. – № 2. – С. 208–217.
35. *Фрактография конструкционных сталей и сплавов, эксплуатируемых в среде водорода (Атлас фрактограмм) / И. Н. Левина, К. Б. Кацов, В. И. Ткачев и др.* – Львов; Москва: ФМИ, 1988. – 86 с.
36. *Pokhmurskyi V. I.* Investigations of hydrogen influence on metals in Karpenko Physicomechanical Institute // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – **33**, № 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. – **33**, № 4. – P. 421–435.)
37. *Литвин А. К., Ткачев В. И.* Явление облегчения деформирования и разрушения металла в присутствии водорода // Там же. – 1976. – **12**, № 2. – С. 27–34.
(*Litvin A. K. and Tkachev V. I.* Processes facilitating the deformation and fracture of metals in the presence of hydrogen // Materials Science. – 1976. – **12**, № 2. – P. 134–140.)
38. *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.
39. *Панасюк В. В., Булик І. І., Панасюк В. В.* Використання водню як технологічного середовища для виготовлення сталей магнетів на основі сплавів РЗМ // Зб. пр. 4-ої Міжнар. конф. “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 2009. – С. 603–608.
40. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Харин В. С.* Зарождение и рост микротрещин, порождаемых заблокированными скоплениями дислокаций // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – **21**, № 2. – С. 5–16.
(*Panasjuk V. V., Andreikiv A. E., and Kharin V. S.* Origin and growth of microcracks produced by blocked accumulations of dislocations // Materials Science. – 1985. – **21**, № 2. – P. 105–115.)
41. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Харин В. С.* Модель роста трещин в деформированных металлах при воздействии водорода // Там же. – 1987. – **23**, № 2. – С. 3–17.
(*Panasjuk V. V., Andreikiv A. E., and Kharin V. S.* A model of crack growth in deformed metals under the action of hydrogen // Materials Science. – 1987. – **23**, № 2. – P. 111–124.)
42. *К вопросу о механизме водородной хрупкости / Г. В. Карпенко, А. К. Литвин, В. И. Ткачев, А. И. Сошко // Там же. – 1973. – 9, № 4. – С. 6–12; 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.
(*Karpenko G. V., Litvin A. K., Tkachev V. I., and Soshko A. I.* Mechanism of hydrogen embrittlement // Materials Science. – 1973. – **9**, № 4. – P. 367–371.)
43. *Вплив об'ємної концентрації водню в металі на особливості деформування низьколегованої трубопровідної сталі / І. М. Дмитрах, Р. Л. Лешак, А. М. Сиротюк, О. Л. Лутицький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 2. – С. 16–23.*
44. *Похмурський В. І., Федоров В. В.* Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 1998. – 208 с.

Одержано 11.11.2013