

Балицький О.І., д.т.н., проф.; Еліаш Я., д.т.н., проф.;
Колесніков В.О., к.т.н., доц.; Іваськевич Л.М., к.т.н.; Мочульський В.М.,
Гребенюк С.О., Глюзицький О.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ

В роботі наведені результати досліджень водневої стійкості аустенітної дисперсійно твердої 10X15H27T3B2MP (ЕП-33) та мартенситної 15X12H2MФAB (ЕП-517) сталей, як кандидатних матеріалів для виготовлення деталей, що працюють у контакті з воднем та воденьвмісними середовищами. Зроблено висновок, що дані сталі можуть бути використані у гібридних автомобілях із водневим паливом.

Постановка проблеми. Сьогодні близько 70% всієї видобутої нафти йде на виробництво палива транспорту [1]. Але це створює всім відомі екологічні проблеми. Тому в світі давно триває тенденція до переходу на альтернативні джерела енергії. Одним з виходів для поліпшення екологічного стану є розробка гібридних автомобілів, тобто тих, що можуть одночасно працювати на кількох видах палива. Тобто сучасний автомобіль, може мати двигун внутрішнього згоряння, який працює на бензині, в нього може додаватись водень. Також можливі варіанти до одночасного застосування як електрики та водню.

За підрахунками сайту Hybrid Cars.com, кількість проданих в усьому світі електромобілів (враховуючи гібриди) вперше за станом на вересень 2015 року досягла мільйона одиниць. Цю планку електричні автомобілі взяли всього за 5 років. Найбільшим ринком для електрокарів і гібридів залишаються США: понад 360 000 авто. На другому місці йде Китай з показником 157 000 машин, на третьому – Японія з показником 121 000 електрокарів.

Розробкою автомобілів, що працюють на електриці, вже зацікавилися провідні світові компанії. Наприклад, Apple планує представити свій концепт до 2019 року, заявляючи, що їх автомобіль буде прямим конкурентом Tesla. Також компанія Google веде розробку свого електромобіля.

Видання Nature Communications повідомляє, що вчені з Технічного університету Ільменау (Німеччина) впритул наблизилися до ефективного виробництва нового виду палива шляхом штучного фотосинтезу, який дозволить виділяти з води водень і використовувати його в якості палива.

Німецька Siemens анонсувала відкриття найбільшого в світі заводу з генерації водню з надлишкової енергії, яка буде надходити переважно з вітряних електростанцій. Завод Siemens, який може обробляти до 6 МВт електроенергії, став найбільшою установкою в світі по виробництву водню. У Siemens сказали, що він зможе постійно забезпечувати паливом до 2000 водневих автомобілів і ефективно реагувати на коливання у виробництві енергії вітру [2].

Ізраїльські фахівці з Університету Бен Гуріону міста Беер-Шева заявляють, що також придумали альтернативу нафти. Розроблений ними процес передбачає використання води і вуглекислого газу. Технологія така: з води витягується водень, який потім змішують з діоксидом вуглецю, одержуваного з повітря. Потім суміш поміщають в спеціальний реактор, і в справу вступає міститься в ньому твердий нанокаталізатор. На виході виходять два види палива: органічна рідина і газ [3]. Ізраїльські вчені планують на основі сучасних та майбутніх досягнень створити енергетичну революцію.

Далі все буде залежати від того наскільки вдасться збільшити коефіцієнти перетворення енергії, в тому числі, при отриманні водню. Якщо, наприклад, холодний термоядерний синтез вдасться реалізувати, тоді може бути серйозний прорив, в тому числі, і в автомобілебудуванні.

Серед відомих автомобілів на водневому паливі, можна навести BMW Hydrogen 7. Двигун внутрішнього згоряння BMW Hydrogen 7 може працювати на бензині, або водні. На Hydrogen 7 виявлено бензобак 74 літра, і балон для зберігання 8 кг водню. Автомобіль може проїхати 200-300 км на водні і 480 км на бензині. Перемикання з одного виду палива на інше відбувається автоматично, але перевага віддається водню. 31 березня 2008 BMW представила монопаливну версію BMW Hydrogen 7, що працює тільки на водні [4].

Наприкінці 2014 року в Японії почалися продажі першого в світі серійного автомобіля з водневим двигуном - седана Mirai ("Майбутнє") виробництва компанії Toyota Motor Corp. Інший великий японський автовиробник Honda Motor Co. в наступному році також планує почати продажі аналогічного з Mirai за характеристиками автомобіля з водневим двигуном. Компанія Nissan Motor Co. представить свою модель на паливних елементах через три роки [5].

Автомобілі на водневому паливі умовно можна розділити на три класи:

1. Зі звичайним двигуном, що працює на водні або водневій суміші. Такі моделі можуть працювати на чистому водні, або коли 5-10 % додають до основного палива. В обох випадках КПД двигуна збільшується та вихлоп стає чистішим. Такі випробування були успішно зроблені в 70-х роках. Але враховуючі конструкційні складності це може бути лише проміжним етапом на шляху до перехідного типу.

2. З двома носіями так звані гібридні. Його колеса приводить до руху електропривод енергію якого постачає акумулятор, в свою чергу енергію який отримує від високо економічного двигуна внутрішнього згоряння працюючого на водні, або суміші водні з бензином. Це дуже вигідно, так як КПД двигуна досягає 90 - 95 %, на відміну від бензинового 35 %, або дизельного 50 %. І навіть якщо до підзарядки акумулятора використовується бензин об'єм, шкідливих викидів дозволяє вкластись в норми ЕВРО 4 з 10 ти кратним запасом.

3. З використанням чистого водню, що дозволяє отримати чистий вихлоп. Машина живиться від паливного елемента який розташований на борту автомобіля. Теоретично ККД, що працює на суміші водень, повітря може бути більше 85 %. Зараз вдалося отримати двигуни з ККД 75 %. Це в 2 рази вище ніж у звичайних двигунів. В умовах міста такі автомобілі отримують 5-6 кратну перевагу. Але в середньому такі автомобілі будуть коштувати на 20 % дорожче.

Одна з головних переваг водневих автомобілів, це їх екологічність - на виході замість вихлопів буде водяна пара. У даний час існує проблема який треба застосовувати сплав для зберігання водню.

Двигун внутрішнього згоряння на водні. Двигуни цього типу сильно схожі на широко застосовуються в даний момент двигуни на пропані. Так як у них дуже схожі принципи роботи, то для переходу з пропану на водень досить просто переналаштувати двигун. І вже існує досить велика кількість наукових зразків подібних двигунів на водні. Але ККД цього методу нижче, ніж у паливних елементів.

Двигун на основі паливних елементів. Водневі двигуни цього типу мають дуже велику вартість по причині змісту у їх конструкції таких дорогих і рідкісних металів, як паладій і платина. Принцип роботи цієї технології, що в процесі фізико-хімічних реакцій в паливному елементі відбувається розщеплення водню і виробляється електроенергія.

Разом з виробництвом дешевого водню в великих масштабах, серйозною проблемою залишається відсутність інфраструктури розподілу водню, яка в кінцевому рахунку повинна замінити газові та дизельні АЗС. Міжміські перевезення водню, навіть в стислому стані, не вважаються економічно доцільними сьогодні. Інноваційні техніки зберігання водню на кшталт органічних носіїв рідини, які не зажадає стиснутого збереження, можуть незабаром знизити вартість перевезень далекого прямування, а також знизити ризики, пов'язані зі зберіганням і можливим витоком газу [6].

Так, наприклад, в сусідній з нами Польщі незабаром з'являться водневі заправок. Кілька заправок будуть побудовані на основних магістралях в Польщі, йдеться в доповіді

Автотранспортного Інституту (ITS) і Польському прес-агентстві (РАР). Проект буде здійснений в рамках програми ЄС з будівництва водневої інфраструктури для транспорту і профінансований за рахунок бюджету ЄС. Водневі заправні станції в Польщі поліпшать мобільність транзитних шляхів для водневих автомобілів і простимулюють розвиток водневих технологій в сусідніх країнах, де ще немає подібної інфраструктури [7]. Це також стосується й нашої держави.

Передчасний вихід з ладу багатьох відповідальних конструкцій спричинений водневою деградацією матеріалів (в т.ч. в у водневому автомобілебудуванні) потребує всебічного вивчення причин цього явища. Дослідженням впливу водню на конструкційні властивості матеріалів саме займаються у Лабораторії водневої стійкості конструкційних сплавів відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України.

Серед наукових напрямків в Україні особливе місце займає школа механіки руйнування. Механіка руйнування — розділ фізики твердого тіла, що вивчає закономірності зародження і розвитку неоднорідностей і дефектів структури матеріалу типу тріщин, дислокацій, пор, включень тощо при статичних і динамічних навантаженнях [8]. Тобто саме таких навантаженнях, які відбуваються з деталями в автомобілі.

Попередні дослідження проведені у галузі прикладного матеріалознавства та механіки руйнування [9-18] дозволяють прийти до висновку необхідності продовження проведення експериментів, по визначенню тріщиностійкості матеріалів, що працюють під дією водню.

Враховуючі вищеописане у роботі проаналізовано літературні, а також експериментальні власні дані стосовно водневої стійкості матеріалів, які можуть застосовуватись для виготовлення двигунів та деталей, які працюють в контакт з воднем, а також з воденьвмісними середовищами.

Матеріали та методика досліджень.

Традиційно у автомобілебудуванні найбільш широко використовуються сталі різних структурних складів, зокрема в якості одночасно як водневостійких, так і тріщиностійких та корозійностійких матеріалів можна виділити високоазотні сталі [9-18].

Є дані стосовно того, що дисперсні складнолеговані нікелеві сплави [19-22] також можуть успішно використовуватись в якості жароміцного та водневостійкого матеріалу, але враховуючі вартість нікелю, цілком виготовити двигун з цього сплаву було би дуже дорого, тобто економічно не доцільно. Корозійнотривкі і жароміцні нікелеві сплави широко застосовуються для виготовлення поршневих автомобільних двигунів серед деталей яких входять: турбокомпресори, випускні клапани, сидла клапанів, свічки запалювання [19-22].

Досліджували корозійнотривкі сталі різних структурних класів: аустенітну дисперсійно твердку 10X15N27T3B2MP та мартенситну 15X12H2MФАВ та (табл. 1). Легування аустенітної сталі алюмінієм, титаном, та бором призводить до утворення інтерметалідів $Ni_3(Al,Ti)$, карбідів TiC та боридів Me_3B_2 , що складає у сумарну кількість 8...10%. Це дозволяє підвищити жароміцність [23, 24] і має суттєвий вплив на чутливість до дії водню [25, 26]. Оптимальна термічна обробка мартенситної сталі дозволяє отримати біля 10% залишкового аустеніту, що розташований у вигляді тонких прошарків між пластинами мартенситу та межами колишніх аустенітних зерен, інтерметаліди (Fe_2W , Fe_2Mo і Fe_2Ti), карбонітриди $Nb(C,N)$ і $Me_2(C,N)$ та дрібнодисперсні карбіди (Me_2C , $Me_{23}C_6$ та Me_6C).

Короткочасний розтяг п'ятикратних циліндричних зразків із діаметром робочої частини 5 мм здійснювали за швидкості 0,1 мм/хв. Малоциклову витривалість за жорсткого чистого віднульового згину визначали за амплітуди та частоти навантаження, відповідно, 1,6% та 0,5 Гц на шліфованих плоских зразках із робочою частиною 3×6×20 мм.

Коефіцієнт інтенсивності напружень за статичного навантаження K_c розраховували згідно зі стандартом [27] за максимальним зусиллям F_c для лінійної діаграми $F-V$ або за зусиллям F_0 , визначеним з використанням 5%-ої січної, для нелінійних діаграм. В інтервалі тисків 0,4...30 МПа випробовували на позакентровий розтяг зі швидкістю 0,1 mm/min прямокутні компактні зразки розмірами 50×60×20 mm. Значення K_c обчислювали за

формулою Сроулі-Гросса [28]. Кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) будували за триточкового згину балкових зразків 160×40×20 mm за частоти навантаження 20 Гц і коефіцієнта асиметрії циклу $R = 0,22$ [29]. Для фрактографічних досліджень використовували сканівний електронний мікроскоп EVO- 40XUP із системою мікроаналізу INCA Energy 350. Вміст водню в металі визначали приладом Leco TCH 600.

Таблиця 1 – Режими термічної обробки та механічні властивості сталей за кімнатної температури на повітрі (чисельник) та у водні під тиском 35 МПа після попереднього наводнювання до вмісту водню 5 млн⁻¹ (сталь 15X12H2MФAB) (знаменник) і 15 млн⁻¹ (сталь 10X15H27T3B2MP)

Сталь	Термічна обробка		Механічні властивості					
	старіння, відпуск	гартування	$\sigma_{0,2}$	σ_B	ψ	δ	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	N циклів до руйнування, $\varepsilon = 1,6\%$
			МПа		%			
15X12H2MФAB: 0,15%С; 0,5Si; 12Cr; 1,9Ni; 1,52Mo; 0,72W; 0,18V; 0,5Mn; 0,02N; 0,25%Nb	953 К, 2 h	1373 К, 1 год	$\frac{870}{880}$	$\frac{1080}{1060}$	$\frac{62}{10}$	$\frac{17}{10}$	$\frac{98}{52}$	$\frac{1029}{43}$
10X15H27T3B2MP: 0,09%С; 0,6Si; 15Cr; 27,11Ni; 1,41Mo; 1,92W; 2,85Ti; 0,29Al; 0,02В; 0,1%Со	1023 К, 16 h + 923 К, 10 h	1393 К, 1 год	$\frac{940}{950}$	$\frac{1270}{1240}$	$\frac{23}{10}$	$\frac{16}{4}$	$\frac{154}{51}$	$\frac{2277}{501}$

Робочі камери установок для визначення всіх вказаних механічних характеристик у водні попередньо вакуумували, продували воднем, повторно вакуумували і заповнювали воднем до тиску 35 МПа. За високих температур зразки витримували в умовах випробувань 30 хвилин, щоб встановити теплову рівновагу. Виявлено [25, 26, 30], що за певних, залежних від хімічного складу і структури матеріалів, значень тиску водню та швидкостей деформування досягається максимальний вплив водню на пластичність, малоциклову довговічність та статичну тріщиностійкість мартенситних сталей і нікелевих сплавів. За короткочасного розтягу водень суттєво окрихчує аустенітні дисперсно твердкі сталі після попереднього наводнювання за підвищених температур і досягнення його вмісту понад 12 млн-1, а властивості наводнених зразків за кімнатної температури на повітрі та у водні однакові [25, 26, 30]. Тому частину зразків заздалегідь витримували впродовж 10 годин у водні за 623 К і тиску 35 МПа. Такий режим забезпечує насичення зразків до концентрацій водню 5 (сталь 15X12H2MФAB) та 15 млн-1 (сталь 10X15H27T3B2MP). Чутливість сталей до водневої деградації оцінювали за коефіцієнтом β , який визначали як співвідношення значень відповідних характеристик у водні та нейтральному середовищі (наприклад, коефіцієнт впливу водню на малоциклову довговічність $\beta_N = N_H/N_{He}$).

Результати досліджень. Деталі автомобіля можуть зазнавати дії різних температур, в т.ч. і підвищених, також вплив водню в різному діапазоні температур має різний вплив, тому було вирішено розділити результати експериментів на кілька температурних інтервалів.

Спочатку проаналізовано експериментальні дані, що стосуються статичної тріщиностійкості, а потім циклічної, так як на деталі в автомобілі водень може оказувати вплив в різних умовах (як за статичних умов так і циклічних, тобто коли автомобіль працює). Отримані результати також можуть дати можливість для їх порівняння та співвідношення.

Розрізняють три види хемосорбції водню на металах – А, В і С [31].

Адсорбція С з незначною теплотою (21...63 kJ/mol) спостерігається при $T < 173$ К. За кімнатних температур маємо сильну із значною теплотою А-адсорбцію. При $T > 400$ К зафіксовано менш сильну адсорбцію В. Хемосорбція на відміну від фізичної адсорбції тільки вибіркова і протікає на ювенільних реагентно активних центрах. Теплота адсорбції водню на

матеріалах із α - та γ -гратками основних фаз різна, адсорбційні процеси активніші на α -залізі, що обумовлено енергетичними властивостями приповерхневого шару металу [32].

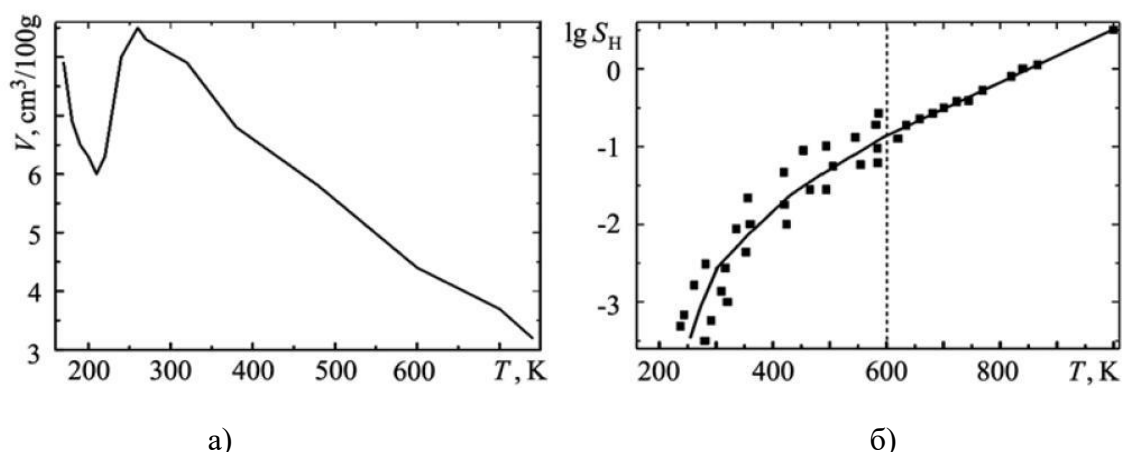


Рис. 1 – Залежність адсорбції (а) та розчинності (б) водню у залізі від температури [31]

Іншим важливим чинником є деформаційна здатність α - та γ -граток. Під час пластичної деформації у г.ц.к. гратці активується більша кількість систем ковзання за менших приведених напружень зсуву, що веде до більшої (порівняно з о.ц.к. граткою) деформаційної здатності і деформаційного зміцнення [33]. Менша здатність о.ц.к. гратки до деформаційного зміцнення свідчить про утворення більшої кількості ювенільних поверхонь типу екструзій та інтрузій, дислокаційних сходинок, а відтак, більшої кількості активних центрів хемосорбції водню.

На повітрі K_c мартенситна сталь 15X12H2MФАВ (рис. 2 а, крива 1) дорівнює відповідно $155 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. У водні зі збільшенням тиску до 7,5 МПа K_c поступово зменшується до мінімуму і від 7,5 до 35 МПа практично не міняється. Статична тріщиностійкість K_c зразків із аустенітної сталі 10X15H27T3B2MP (рис. 2 б, крива 1) повільно понижувалась на всьому діапазоні тисків водню.

Невеликий додатковий вплив попередньо розчиненого водню на в'язкість руйнування сталі 15X12H2MФАВ (рис. 3, криві 3, 4) виявлено лише за тисків менших 7,5 МПа. Як і у попередніх випадках, під час випробовувань на статичну тріщиностійкість сталь 15X12H2MФАВ є більш чутливою до дії зовнішнього, ніж внутрішнього водню.

Залежності β_{Kc} від тиску водню свідчать про відмінність дії зовнішнього та внутрішнього водню на властивості мартенситних та аустенітних сталей із інтерметалідним зміцненням. Порівнюючи результати досліджень короткочасної та малоциклової міцності у водні з даними за статичної тріщиностійкості мартенситних і аустенітної сталей можна говорити про якісну подібність впливу водню на статичну тріщиностійкість K_c , статичну пластичність (δ і ψ) та малоциклову довговічність (N).

Невеликий додатковий вплив попередньо розчиненого водню на в'язкість руйнування сталі 15X12H2MФАВ (рис. 3, криві 3, 4) виявлено лише за тисків менших 7,5 МПа. Як і у попередніх випадках, під час випробовувань на статичну тріщиностійкість сталь 15X12H2MФАВ є більш чутливою до дії зовнішнього, ніж внутрішнього водню.

Невеликий додатковий вплив попередньо розчиненого водню на в'язкість руйнування сталі 15X12H2MФАВ (рис. 3, криві 3, 4) виявлено лише за тисків менших 7,5 МПа. Як і у попередніх випадках, під час випробовувань на статичну тріщиностійкість сталь 15X12H2MФАВ є більш чутливою до дії зовнішнього, ніж внутрішнього водню.

Залежності β_{Kc} від тиску водню свідчать про відмінність дії зовнішнього та внутрішнього водню на властивості мартенситних та аустенітних сталей із інтерметалідним зміцненням. Порівнюючи результати досліджень короткочасної та малоциклової міцності у водні з даними за статичної тріщиностійкості мартенситних і аустенітної сталей можна говорити про

якісну подібність впливу водню на статичну тріщиностійкість K_{Ic} , статичну пластичність (δ і ψ) та малоциклову довговічність (N).

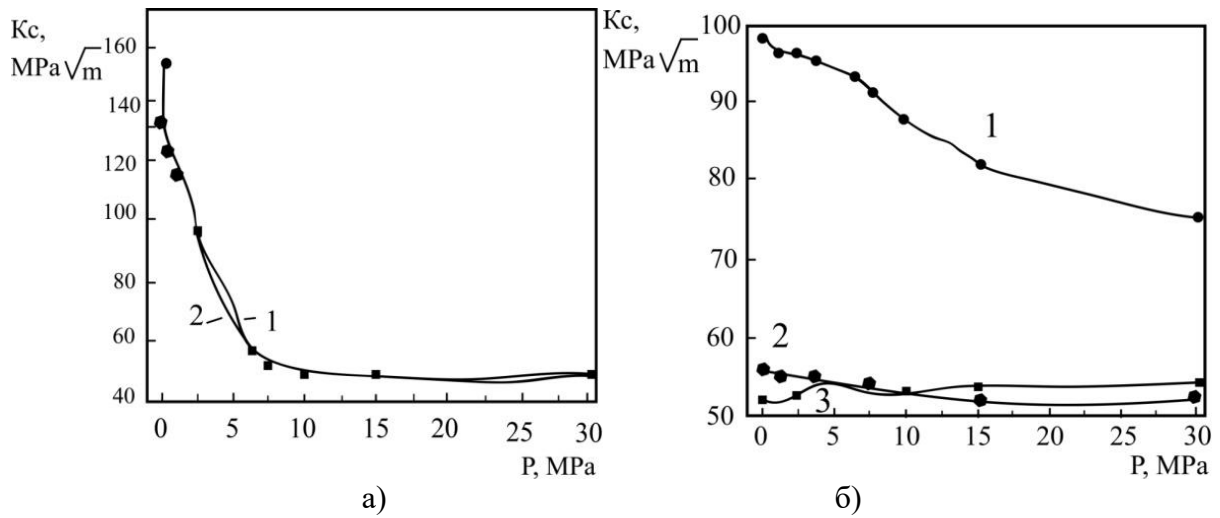


Рис. 2 – Вплив тиску водню P на в'язкість руйнування K_{Ic} сталей 15X12H2MΦAB (а) та 10X15H27T3B2MP (б) при 293 К: 1 – ненаводнені зразки; 2, 3 – наводнені (623 К; 10 МПа; 10 год. і 673 К; 35 МПа; 10 год. відповідно) зразки

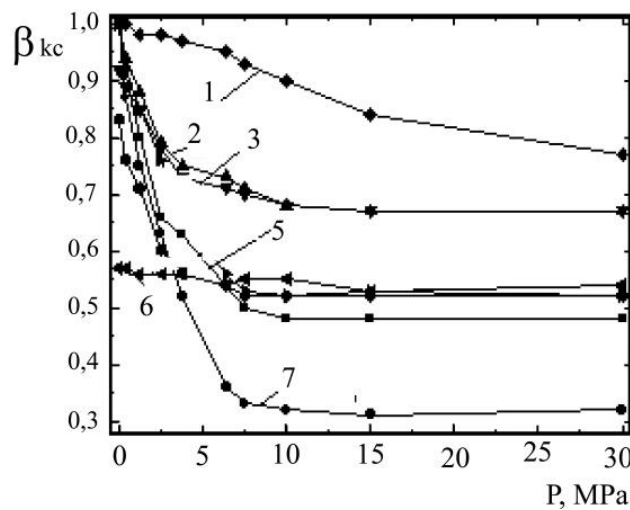


Рис. 3 – Залежності коефіцієнта впливу водню $\beta_{K_{Ic}}$ на статичну тріщиностійкість зразків зі сталей 10X15H27T3B2MP (1,5) і 15X12H2MΦAB (6-ТО1) у вихідному стані (1, 2, 4, 6) та попереднього наводнення (673 К, 10 МПа H_2 , 10 год) (3, 5) від тиску водню при 293 К

Таким чином, за 293 К статична тріщиностійкість мартенситних сталей у зовнішньому водні понижується у широкому інтервалі тисків; додатковий вплив попередньо розчиненого водню незначно проявляється лише за $P_H < 7,5$ МПа. Ненаводнена аустенітна сталь не реагує на зміну тиску зовнішньої атмосфери, а інтенсивно деградує лише за спільного впливу зовнішнього та внутрішнього водню.

Через відмінності у характері адсорбції водню, кількість активних центрів хемосорбції та деформаційну здатність α - та γ -граток приймає різну воднетривкість мартенситних та аустенітних сталей за кімнатної температури: на мартенситній з карбідним зміцненням (15X12H2MΦAB) трикратне падіння статичних характеристик ψ та K_{Ic} та 1,5-; 2- і 10-кратний

спад показників втомного навантаження K_{fc} , ΔK_{th} та N ; на аустенітній з інтерметалідним зміцненням (10X15H27T3B2MP) – незначне зменшення службових характеристик (рис. 4).

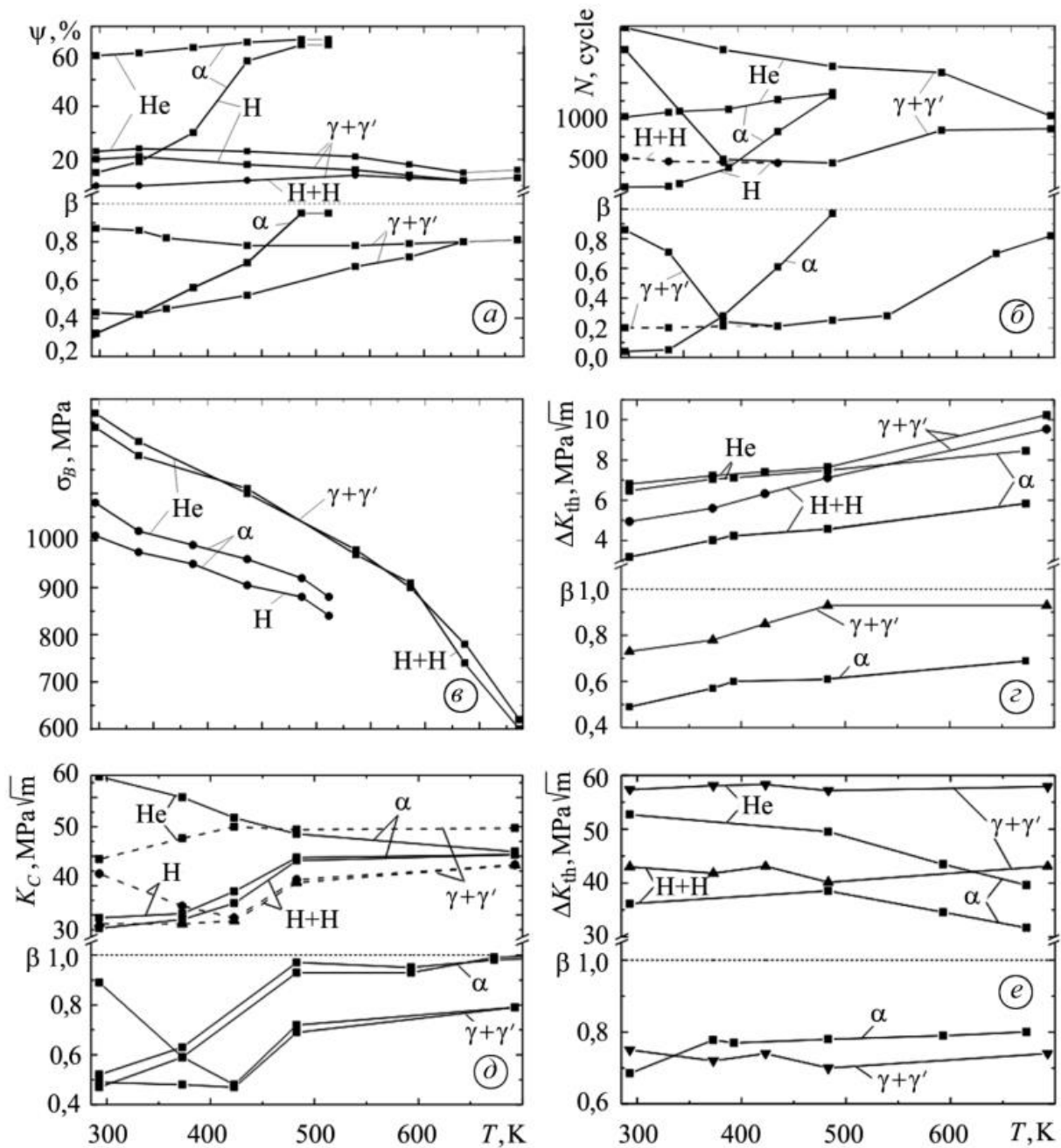
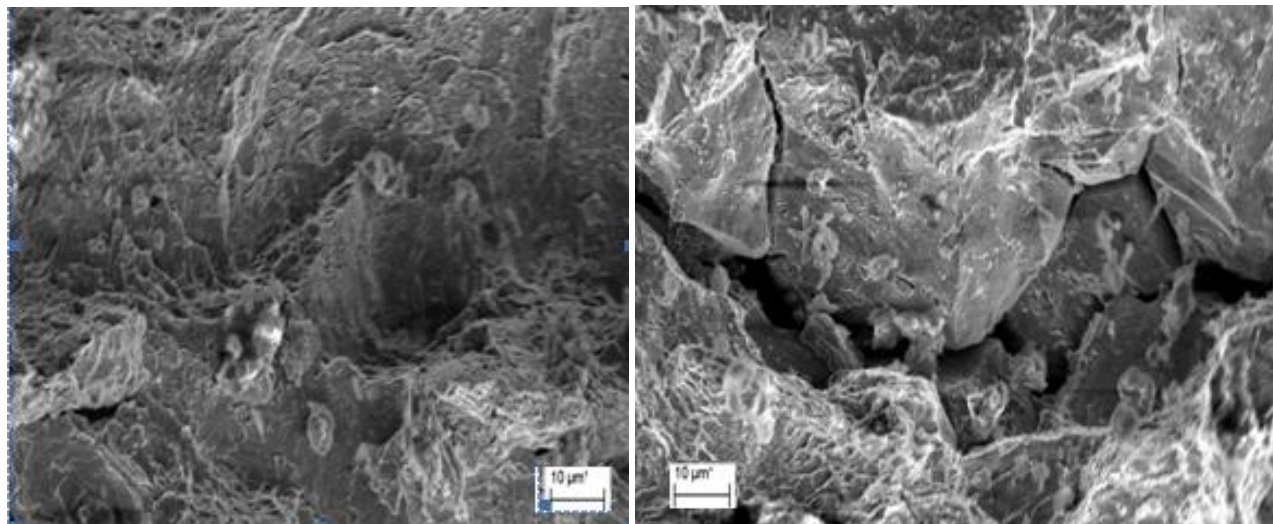


Рис.4 – Температурні залежності відносного звуження ψ (а), малоциклової довговічності N (б), границі міцності σ_B (в), порогового (г) та критичного (д) КІН за циклічного навантаження та в'язкості руйнування (е): $\gamma+\gamma'$ – сталь 10X15H27T3B2MP; α – сталь 15X12H2MФАВ; H – водень під тиском 35 МПа; H+H – під тиском 35 МПа після наводнювання (673 К, 10 МПа H_2 , 10 h).

Попереднє високотемпературне наводнювання викликає додаткове 2-3-кратне погіршення механічних властивостей аустенітної сталі і мало впливає на робоздатність мартенситної сталі у водні високого тиску. У структурі аустенітної сталі після старіння зафіксовано 8...10% дисперсних гранично- та внутрішньозеренних інтерметалідів типу A_3B розміром 300...400 А. Межі інтерметаліди–матриця слугують колекторами водню та осередками локальних мікроструктурних пошкод.

На рис. 5, 6 наведено фотографії руйнування досліджуваних сталей за статичних та циклічних умов навантаження.

В інертному середовищі (тобто гелії) мартенситна сталь 15X12H2MФАВ розтріскується по границях мартенситних пакетів і острівкового аустеніту (рис. 5 а). Водень сприяє утворенню та коалесценції мікропор на ділянках залишкового аустеніту та ініціює руйнування сколом по міжфазних границях (рис. 5 б).



а)

б)

Рис. 5 – Злам сталі 15X12H2MФАВ в околі фронту вихідної втомної тріщини після статичного руйнування при 293 К у гелії (а,) та водні (б) під тиском 10 МПа

Сталь 15X12H2MФАВ руйнується сколом, у зламі присутні гребінці відриву і язички, зародження яких відбувається на частинках других фаз. Значне місце у будові рельєфу займають елементи міжфазного та міжзеренного руйнування. Водень сприяє збільшенню кількості осередків ініціації руйнування та зменшенню відстаней між ділянками інтенсивної міжзеренної деструкції та квазісколу. За $T > 400...500\text{K}$ вплив водню на K_{IC} мінімальний і відмінності у морфології зламів в обох середовищах незначні.

Присутність водню в аустенітній сталі 10X15H27T3B2MP спричиняє відмінності у будові зламу за всіх температур (293...723 К) порівняно з інертним середовищем. У гелії відбувається транскристалітне руйнування з властивим пластичним матеріалам ямковим мікрорельєфом, виділеннями по дну ямок та невеликою кількістю міжзеренних мікротріщин.

Злами наводнених та ненаводнених зразків на нижній ділянці КДВР відрізняються несуттєво, їм властива специфічна борозенчата структура із дещо більшою за наводнювання кількістю фасеток відколу (рис. 6 а, б). Крім того, на зламах наводнених зразків епізодично зустрічаються мікросколи, розшарування площинами ковзання та двійникові розриви (язики) на фасетках відколу. На верхній ділянці КДВР водень сприяє переходу від характерного для втоми борозенчастого та стільникового рельєфу зламу (рис. 6в) до внутрішньозеренного та міжзеренного відколу із плоскими фасетками (рис. 6 г). Найсуттєвішими є відмінності у характері руйнування наводнених і ненаводнених зразків на етапі долому, коли на повітрі переважає ямковий відрив із ділянками міжзеренного руйнування (рис. 6д), а у водні – мережа міжзеренних тріщин із окремими траковими слідами (рис. 6 е).

За кімнатної температури газоподібний водень максимально погіршує механічні характеристики (відносне видовження та поперечне звуження, малоцикловоу довговічність, статичну та циклічну тріщиностійкість) МС сталі і мало впливає на властивості аустенітної з інтерметалідним зміцненням. Екстремум окрихчення першої займає температурний діапазон 300...500 К, другої – 470...800 К. За попереднього наводнювання аустеніту, зміцненого

інтерметалідами, цей інтервал поширюється і на область кімнатних температур. Найчутливіші до дії водню характеристики МС сталей за 293...573 К і аустенітних дисперсійно твердких сталей за всіх температур – малоциклова довговічність (зменшується у 20 та 5 разів відповідно) та відносне поперечне звуження (зменшується у 5–6 та 2 рази відповідно). При $T \geq 600$ К водень найбільше впливає на критичний коефіцієнт інтенсивності напружень за циклічної тріщиностійкості мартенситної сталі K_{fc} (зменшується у 1,5 рази).

За кімнатної температури впливу водню на мікромеханізм руйнування сталей спричиняє подрібнення ямок, збільшення кількості площин гладкого розшарування (втомне навантаження) або розчеплення (статичне) та ділянок міжзеренного руйнування. В інтервалі 400... 600 К, за умов послаблення адсорбції та активації абсорбції водню дефектами, у зламі зростає кількість площин гладкого розшарування та розчеплення. За $T > 600$ К, коли водень починає мігрувати з дефектів у ґратку, кількість ділянок міжзеренного руйнування стає незначною, утворюються терасові відколи, що свідчить про інтенсифікацію середовищем відриву кристалографічними площинами спайності.

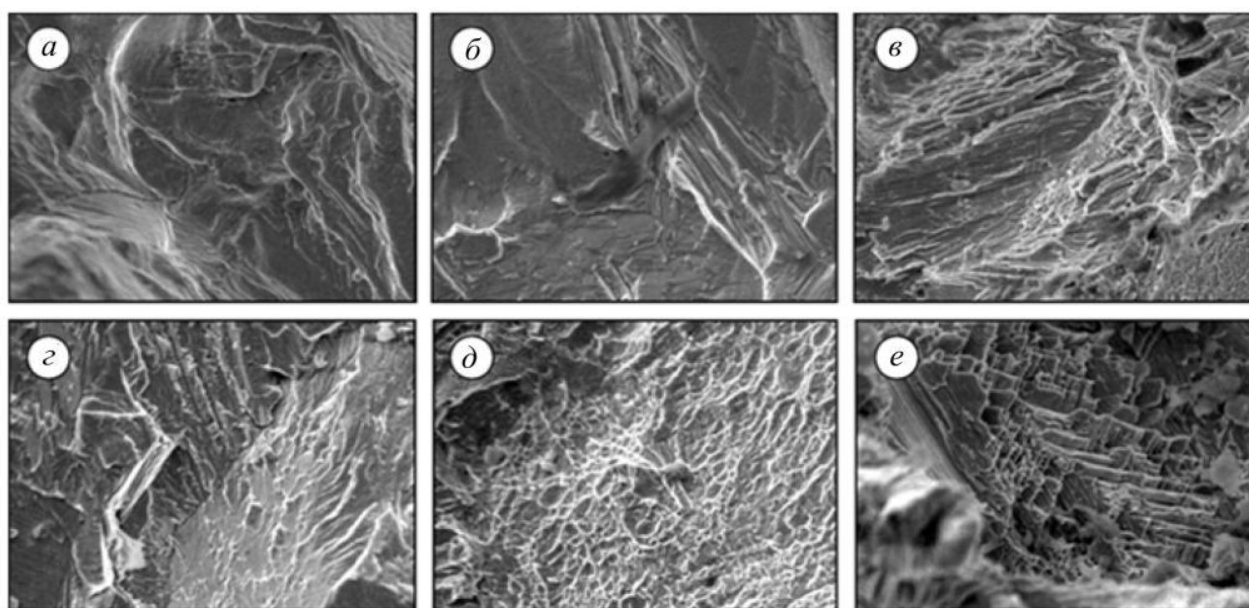


Рис. 6 – Характер руйнування сталі 10X15H27T3B2MP за циклічного навантаження при 293 К на нижній (а, б) і верхній (в, г) ділянках КДВР та ділянці закритичного (д, е) руйнування у гелії (а, с, е) та водні під тиском 10 МПа після попереднього наводнювання за режимом 1 (б, г, е) $\times 3000$

Таким чином отримані та проаналізовані результати можуть бути корисними при розробці та застосуванні нових сталей (у т.ч. і для автомобілебудування), що працюють в контактi з воднем та воденьвмісними середовищами.

Список літературних джерел

1. Есть ли жизнь после нефти: когда закончится черное золото и что её заменит. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.segodnya.ua/economics/enews/est-li-zhizn-posle-nefti-kogda-zakonchitsya-chnoe-zoloto-i-chno-ego-zamenit-696376.html>.
2. Siemens открыла крупнейший в мире завод по генерации водорода [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://tesiaes.ru/?p=13088>.
3. Израильские ученые из воздуха и воды создали альтернативу нефти [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://podrobnosti.ua/956641-izrailskie-uchenye-iz-vozduha-i-vody-sozdali-alternativu-nefti.html>.

4. BMW Hydrogen 7 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/BMW_Hydrogen_7.
5. Toyota випустила на ринок перший в світі автомобіль з водородним двигателем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.unian.net/science/1021880-toyota-vyipustila-na-rynok-pervyy-v-mire-avtomobil-s-vodorodnyim-dvigatelem.html>.
6. 10 технологій, котрими може запомнитися 2015 рік. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://hi-news.ru/technology/10-technologij-kotorymi-dolzhen-zapomnitsya-2015-god.html>.
7. Польща побудує перші водородні заправки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uahe.net.ua/ru/articles-ru/348-polsha-postroit-pervye-vodorodnye-zapravki.html>.
8. Механіка руйнування. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://uk.wikipedia.org>.
9. Valerii Kolesnikov, Aleksandr Balitskii, Jacek Eliaz Tribological properties of high nitrogen steels after hydrogenation // Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa Volume XC/2010. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture – OLPAN, 2010, 116 - 121 p.
10. Kolesnikov V.O. Investigation of the wear products of high-nitrogen steel after hydrogenation // Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa XA/2010. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture – OLPAN, 2010, 10A,271 -275 p. <http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot10a/Kolesnikov.pdf>.
11. Study of the wear resistance of high-nitrogen steels under dry sliding friction // O. I. Balyts'kyi, V. O. Kolesnikov, and J. Eliaz // Materials Science, Vol. 48, No. 5, March, 2013 P. 642 – 646. (Ukrainian Original Vol. 48, No. 5, September–October, 2012 C. 78 - 82).
12. Balitskii A.I., Kolesnikov V.O., Eliaz J., Hawriljuk M.R. Fracture of hydrogenated high nitrogen mangan steels at slide wear // Materials Science. - 2014. – N 4. – P. 110 – 116.
13. О. І. Балицький, В. І. Витвицький, Л. М. Іваськевич, В. М. Мочульський, С. О. Гребенюк. Високотемпературна воднетривкість нержавних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 2. – С. 83 – 94.
14. О. І. Балицький, Л. М. Іваськевич, В. М. Мочульський, О. М. Голіян Вплив водню на трищиностійкість сталі 10X15H27T3B2MP // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 102 – 110.
15. О. І. Балицький, Л. М. Іваськевич, В. М. Мочульський Механічні властивості мартенситних сталей у гозоподібному водні // Проблеми прочності. – 2012. – № 1. – С. 89 – 99.
16. Balitskii A., Vytvytskyii V., Ivaskevich L., Eliaz J. The high- and low-cycle fatigue behaviour of Ni-contain steels and Ni-alloys in high pressure hydrogen / International Journal of Fatigue. - 2012 vol.39. - P. 32–37.
17. Hembara O. V., L. M. Ivas'kevych, V. M. Mochul's'kyi, O. Ya. Chepil'. Prediction of the kinetics of crack propagation and the residual durability of vessels in gaseous hydrogen// Materials Science (Springer).– 2013, No 5. – P.671-679.
18. Balitskii A., Ivaskevich L., Mochul'skyi V., Eliaz J., Skolozdra O. Influence of high pressure and high temperature hydrogen on fracture toughness of Ni-containing steels and alloys // Archive of Mechanical Engineering. - 2014. – N 1, vol. LXI. - P. 129-138.
19. Dobrzański L. A. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. WNT: Gliwice-Warszawa. – 2002. – 1500 s.
20. Шаповалов Л.И. Легирование водородом // Журфонд. – Днепропетровск, 2013. – 385 с.
21. Darius Tytko, Pyuck-Pa Choi, Jutta Klower, Aleksander Kostka, Gerhard Inden, D. Raabe. Microstructural evolution of a Ni-based superalloy (617B) at 700°C studied by electron microscopy and atom probe tomography // Acta Materials. – 2012. – Vol. 60, I. 4. – P. 1731-1740.

22. Galliano F., E.Abdrieu, C.Blanc, J.-M.Cloue, D.Connetable, G.Odemer. Effect of trapping and temperature on the hydrogen embrittlement susceptibility of alloy 718 // *Materials Science & Engineering A*. – 2014. – 611. – P. 370-382.
23. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1967. – 798 с.
24. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1978. – 860 с.
25. Tkachov V. I., Ivas'kevych L. M., and Mochul's'kyi V. M. Temperature Dependences of the Mechanical Properties of Austenitic and Martensitic Steels in Hydrogen // *Materials Science*. – 2007. – 43, № 5. – P. 654–666.
26. Balyts'kyi O. I., Ivas'kevych V. M., Mochul's'kyi V. M., and Holiyan O. M., Influence of Hydrogen on the Crac Resistance of 10X15H27T3B2MP Steel // *Materials Science*. – 2009. – 45, № 2. – P. 258–268.
27. ГОСТ 25506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
28. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. – М.: Мир, 1972. – 246 с.
29. Фізико-механічний інститут: Поступ і здобутки / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 432 с.
30. Ткачѳв В. И., Иваськевич Л. М., Витвицкий В. И. Особенности определения чувствительности сталей к водородной деградации // *Альтернативная энергетика*. – 2005. – № 12(32). – С. 46–51.
31. Швед М. М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – К.: Наук. думка, 1985. – 120 с.
32. Похмурський В. І., Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Фіз.-мех. ін-т НАН України, 1998. – 206 с.
33. Гольдштейн Р. А. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 350 с.

Балицький Олександр Іванович – д.т.н., професор, завідувач лабораторії водневої стійкості конструкційних сплавів відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України.

Еліяш Яцек – д.т.н., проф. зав. каф. експлуатації та ремонту автомобілів, Західнопоморський технологічний університет, Щецин, Польща.

Колесніков Валерій Олександрович – к.т.н., м.н.с. сумісник лабораторії водневої стійкості конструкційних сплавів відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України; доцент кафедри технологій виробництва і професійної освіти ДЗ "Луганський національний університет ім. Тараса Шевченка", м. Старобільськ.

Іваськевич Любомир Михайлович – к.т.н., ст. наук. спів. лабораторії водневої стійкості конструкційних сплавів відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ.

Мочульський Володимир Михайлович – наук. спів. лабораторії водневої стійкості конструкційних сплавів відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ.

Гребенюк Станіслав Олексійович – наук. спів. лабораторії водневої стійкості конструкційних сплавів відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ.

Глюзицький Олександр Олександрович – магістрант кафедри технологій виробництва і професійної освіти ДЗ "Луганський національний університет ім. Тараса Шевченка", м. Старобільськ.