

*О.І. Балицький<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, М.М. Семерак<sup>2</sup>, д-р техн. наук, професор,  
В.О. Балицька<sup>2</sup>, канд. фіз.-мат. наук, доцент, А.В. Субота<sup>2</sup>,  
Я.Еліаш<sup>3</sup>, д-р хабіт., професор, О.Б. Вус<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів,

<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів,

<sup>3</sup>Західнопоморський технологічний університет, Щецін, Польща)

## ЗМІНА МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНЕВИХ БАЛОНІВ НА ЕНЕРГОБЛОКАХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Визначено зміну експлуатаційних характеристик після тривалої експлуатації та вміст водню у зразках зі сталі 45, що використовується для виготовлення водневих балонів. Встановлено, що при випробовуваннях на повітрі зразків з деградованого матеріалу спостерігається зуб текучості, який зникає за випробувань у водні. Основна риса, притаманна досліджуваним матеріалам - метастабільність, тобто наявність більш або менш виражених часово- і температурно-залежних процесів структурної релаксації. Деградаційні процеси призводять до змін експлуатаційних властивостей. Проміжні (між вихідними та після тривалої експлуатації) значення в'язкості руйнування підбрано таким чином, щоб мінімізувати середнє квадратичне відхилення ( $err$ ) експериментально отриманих величин дрейфу від теоретичної кривої, що відповідає експоненційній релаксаційній функції.

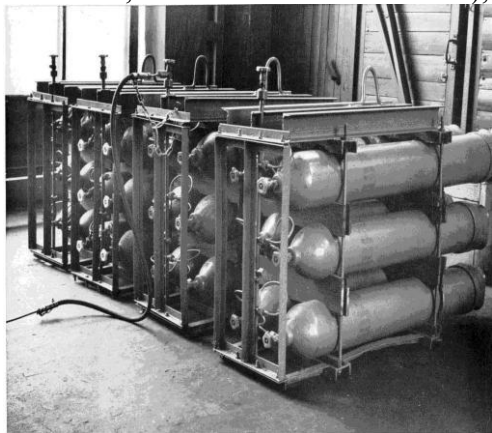
**Ключові слова:** водневий балон, міцність, деградація.

**Постановка проблеми.** Привабливість водню як універсального енергоносія та охолоджувального середовища зумовлена екологічною чистотою та високою ефективністю процесів перетворення енергії за його участі. Однак мала густина газоподібного водню, низька температура його зрідження, а також висока вибухонебезпечність у поєднанні із негативним впливом на конструкційну міцність матеріалів робить актуальною проблему розробки ефективних та безпечних систем його зберігання за тривалої експлуатації.

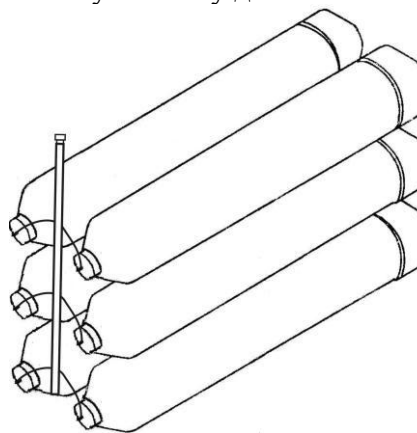
На великих об'єктах енергетики водень використовується як холодоагент для охолодження вузлів потужних турбогенераторів. Контактуючи тривалий час (175 000 годин і більше) з поверхнево активним воднем за низьких (до  $-30^{\circ}\text{C}$ ), кімнатної та підвищених (до  $+30^{\circ}\text{C}$ ) температур, конструкційні матеріали посудин під тиском деградують [1-12].

### Матеріали водневих балонів і методи їх досліджень

Найбільш поширеним на даний час є тривале зберігання водню під високим тиском у балонах (рис.1 і 2) та газгольдерах. У даній роботі використано зразки, вирізані з водневих 40-літрових балонів (довжина балона 1340...1390 мм, діаметр балона – 219 мм, товщина стінки – 10 мм, маса балона – 60...81 кг), які містять  $6\text{ м}^3$  газу за тиску до 150 атм.

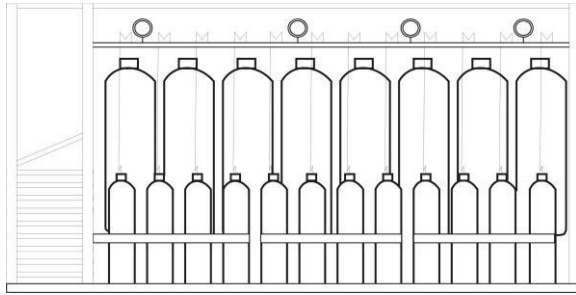


а)



б)

**Рис. 1.** Загальний вигляд (а) та схематичне зображення конструкції (б) типових 6-ти позиційних касет з 40 літровими водневими балонами



а)

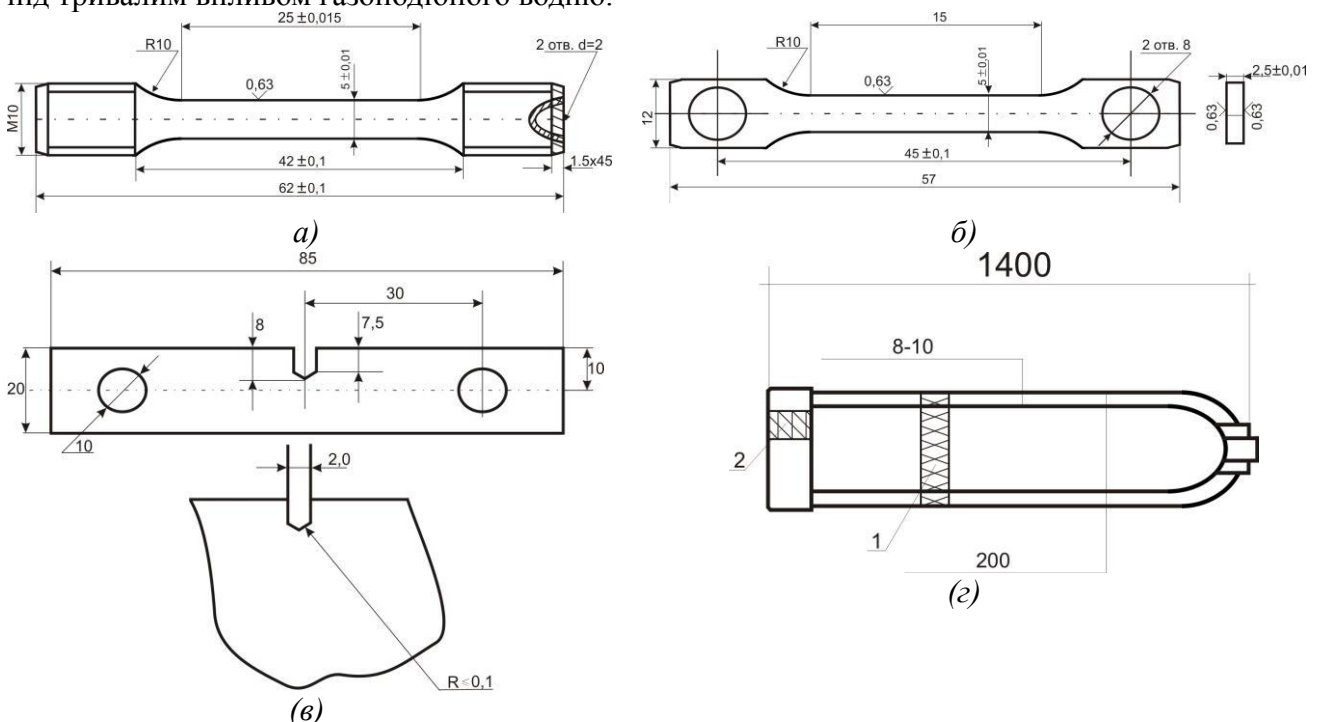
б)

**Рис. 2.** Схематичне зображення балонної водневої рампи з 40-літровими та 160-літровими водневими балонами (а) та загальний вигляд типової водневої рампи (б)

Наповнення воднем балонів типу 160-20, встановлених на балонній рампі, до робочого тиску  $P_{роб.} = 150 \text{ кгс/см}^2$  (по паспорту до  $P_{роб.} = 200 \text{ кгс/см}^2$ ) здійснено компресором ІВУВ-45/150 через розподільчий щит та обладнання осушки і очистки. Характеристики компресора: тиск нагнітання –  $150 \text{ кгс/см}^2$ , продуктивність –  $45 \text{ м}^3/\text{год}$ , потужність електродвигуна –  $22 \text{ кВт}$ .

40-літрові балони 40-50 (ГОСТ 949-73) поміщені в контейнері для одночасної заправки шести балонів воднем та укомплектовані водневими вентилями ВВ-73 (ГОСТ 699-74).

На рис. 3 зображені зразки використані для дослідження стандартних механічних характеристик, малоциклової втоми, параметрів тріщиностійкості матеріалів водневих балонів. Завдяки унікальній можливості дослідження деградованого матеріалу балона, в якому зберігався тривалий час водень під тиском 150 атм. вдалось порівняти характеристики такого матеріалу з властивостями цього ж матеріалу (з обичайки балона) який не перебував під тривалим впливом газоподібного водню.



(в)

(г)

**Рис. 3.** Зразки для дослідження стандартних механічних характеристик (а), малоциклової втоми (б), параметрів тріщиностійкості (в) матеріалів водневих балонів та схема вирізання зразків (г) деградованого матеріалу водневого балону (1), що перебував під тривалим впливом водню високого тиску та того ж матеріалу з балонної обичайки (2), що не перебувала під впливом газоподібного водню.

У процесі експлуатації на стінки балонів діють навантаження до 70 МПа, що спричинені зміною тиску водню. Перепад температур становить від -30 до +85 °С внаслідок нагрівання за швидкої перезавантажки та стану навколишнього середовища.

Перелік деяких сталей, що використовуються для виготовлення балонів та їх властивості приведено в табл.1, а їх хімічний склад – в табл. 2.

**Таблиця 1**

*Перелік деяких сталей, що використовуються для виготовлення балонів та їх властивості*

№ з/п	Марка сталі	Хімічний склад (ГОСТ, ТУ, ГСТ)	Тимчасовий опір, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )		Границя текучості, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менше	Термічна обробка	Температура застосування, °С		Тиск середовища, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ) не більше	Максимальна товщина циліндричної частини балона, мм, не більше
			не менше	не більше			не нижче	не вище		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	20ХН4 ФА	ГОСТ 4543	1275 (130)	1521 (155)	1079 (110)	3+0	-80	150	не обмежено	15
2.	35ХН3 МФА38 ХНЗМФ А	ТУ 14- 3-883 ГОСТ 4543	1128 (115)	1373 (140)	981 (100)	3+0	-80	150	не обмежено	30
3.	40ХН2 МА	ГОСТ 4543	981 (100)	1177 (120)	834 (85)	3+0	-50	150	не обмежено	15
4.	40ХН2 МА	ГОСТ 4543	932 (95)	1177 (120)	785 (80)	3+0	-50	150	не обмежено	25
5.	30ХМА	ГОСТ 4543	1030 (105)	1275 (130)	883 (90)	3+0	-50	150	не обмежено	15
6.	40ХН2 МА	ГОСТ 4543	932 (95)	1177 (120)	736 (75)	3+0	-60	150	не обмежено	21
7.	45	ГОСТ 949-57	638 (65)	-	373 (38)	-	-40	85	не обмежено	10

**Таблиця 2**

*Хімічний склад сталей (у вихідному стані) посудин під тиском водню*

Марка сталі							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
45	0,42-0,45	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	-	-	-
30ХГСА 30ХНМА	0,28-0,34	0,9-1,2	0,8-1,0	0,8-1,1	0,3	0,005	0,025

### Результати та їх обговорення

Експериментальна оцінка водневої деградації залежно від концентрації поглинутого водню в балонній сталі після її тривалого використання під постійним та повторно-статичним навантаженням за таких умов досі не проводилась. Слід також зауважити, що в сучасній енергетиці є обладнання, яке постійно працює за підвищених тисків газоподібного водню і вже після 10...15 років експлуатації під тиском водню до 30 відсотків посудин великої ємності вибраковується.

Тому існує потреба в оцінюванні міцності матеріалів для балонів, що тривало працюють під тиском водню, на основі сучасних підходів механіки крихкого руйнування, а також формулювання нових вимог для документів, що регламентують процес тривалої експлуатації посудин під тиском, які б враховували їх водневу стійкість та опір поширенню тріщин на стадії докритичного розповсюдження у поєднанні з великим запасом міцності.

Не дивлячись на численні дослідження властивостей конструкційних матеріалів у водневому середовищі, ефективних підходів, які би враховували водневу деградацію сталей і сплавів за підвищених тисків, у вітчизняній практиці не існує. Крім того, на даний час недостатньо вивчені закономірності та механізм впливу водневих газових сумішей за підвищених тисків на механічні властивості таких конструкційних матеріалів. Серед найважливіших факторів, що визначають експлуатаційну надійність елементів конструкцій установок енергетики, є здатність матеріалів чинити опір статичному, багато- та малоцикловому навантаженню, зародженню та поширенню тріщин у середовищі газоподібного водню підвищених параметрів.

Вплив часової бази наводнювання під механічним статичним та повторно-статичним навантаженням на механічні характеристики є досить суттєвим. Найбільш чутливими є: а) статична, довготривала статична і циклічна тріщиностійкість ( $K_C$ ,  $\Delta K_{th}$ ,  $K_{fc}$ ) за різних концентрацій попередньо поглиненого водню; б) короточасні міцність, пластичність та довговічність.

Порівняльний вплив водню на пошкодженість є основою для прийняття рішення про можливість подальшої безпечної експлуатації цих посудин на енергоблоках та досягнення ними граничного стану під тиском водню. Результати такого порівняння можна простежити на даних представлених у таблицях 3 і 4.

**Таблиця 3**

*Механічні властивості матеріалів (у вихідному стані) посудин під тиском водню*

Марка сталі	Границя міцності, $\sigma_b$ , МПа	Границя текучості, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Модуль Юнга, $E$ , МПа	Відносне видовження, $\delta$ , %	Відносне звуження, $\psi$ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	В'язкість руйнування, $K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$	Твердість за Брінеллем, НВ, не більше
45 (балон)	726	432	213	26	51	29,4 (+20 <sup>0</sup> С)	73,5	229
30ХГСА (газгольдер)	883	687	198	10	-	98,1 (+20 <sup>0</sup> С)	80,1	212

**Таблиця 4**

*Експериментальні дані з випробування властивостей матеріалу (сталі 45) посудин тривало експлуатованих під тиском водню за різних умов випробувань*

№ з/п	Діаметр $d_0$ , мм	Площа $F_0$ , мм <sup>2</sup>	Довжина $l_0$ , мм	Довжина $l_1$ , мм	Довжина $l_2$ , мм	Діаметр $d_2$ , мм	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа/м <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , МПа/м <sup>2</sup>	В'язкість руйнування, $K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$	Умови випробувань
1	5	19,625	33	59,1	65,4	4,1	19	33	451	726	61,8	20 <sup>0</sup> , 10атм. Н <sub>2</sub>
2	5	19,625	33	59,2	67,7	3,5	26	51	432	726	73,5	20 <sup>0</sup> , пов
3	5	19,625	33	59,2	65	4,2	18	29	402	726	58,8	20 <sup>0</sup> , 13атм. Н <sub>2</sub>
4	4,9	18,85	33	59,1	66,3	3,3	22	55	412	745	77,2	20 <sup>0</sup> , пов

Важливими є кореляційні залежності впливу часу експлуатації, змінних навантажень і температур на міцність, пластичність і характеристики статичної та циклічної тріщиностійкості матеріалів посудин, що тривало працюють під високим тиском водню.

Відомо, що випадкова кристалографічна орієнтація зерен і заблокована дія границь зерен (перш за все ширококутних) спричиняється до одночасної пластичної деформації в кількох системах ковзання. Пластична деформація в досліджених сталях розпочинається в зернах, зорієнтованих вздовж напрямку прикладення напруження, ще перед досягненням макроскопічною границею пластичності. Перед границями зерен настає скупчення однойменних дислокацій. Це спричиняє, своєю чергою, утворення напружень зворотного знака скерованих протилежно до прикладених зусиль. В результаті одночасного старту пластичної деформації в зернах з різною кристалографічною орієнтацією крива розтягу нижче макроскопічної границі пружності має параболічний характер (рис.4).

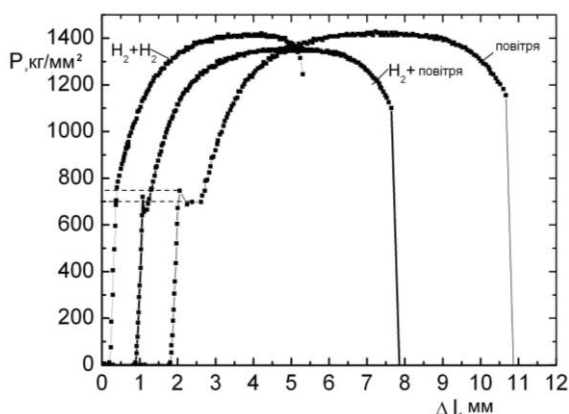
Після досягнення макроскопічної границі пластичності пластична деформація проявляється у всіх зернах. Пластична деформація виступає нерівномірно внаслідок розповсюдження пластичних хвиль, так званих, ліній Людерса. Внаслідок дії пластичної деформації скупчення дислокацій, в одних зернах, активують джерела дислокацій в сусідніх зернах і спричиняються до взаємодії дислокацій з дефектами упаковки і дислокаціями в інших системах ковзання. Впливає це на збільшення міцності. Збільшення деформації спричиняється до насичення зерен дислокаціями з високою густиною і утворення в зернах комірчастої дислокаційної структури. Незважаючи на тривалу експлуатацію в середовищі водню на кривих, отриманих в повітрі, чітко розділяються верхня і нижня границі пластичності. Границя пластичності – це напруження, необхідне для макроскопічної пластичної деформації у всіх зернах.

Верхня границя пластичності пов'язана з відривом дислокацій від, так званих, атмосфер Котрелла, тобто атмосфер домішкових атомів, наприклад С або N, які знаходяться поблизу ядра дислокації.

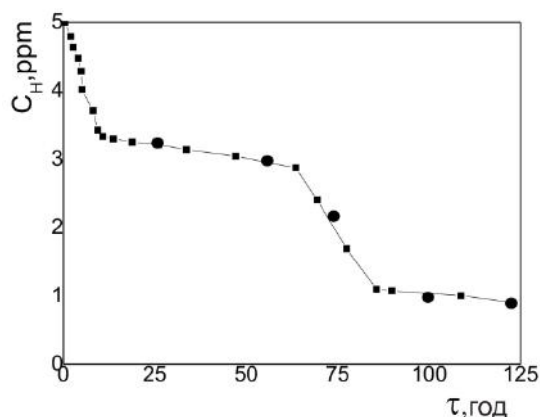
Нижня границя пластичності збільшується разом зі зменшенням величини зерен, згідно з рівнянням Холла-Петча

$$R_{ed} = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  – напруження тертя ґратки,  $k$  – стала,  $d$  – діаметр зерна.

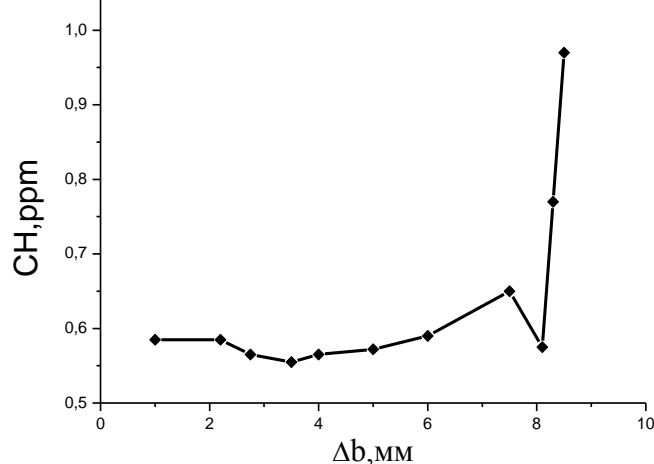


**Рис. 4.** Криві зусилля – видовження (напруження – деформації) зразків сталі, вирізаних з водневого балона після експлуатації протягом 175 000 годин, розірваних на повітрі та у водні: 1 – параболічна частина в області мікропластичних деформацій ( $\varepsilon \sim 1\%$ )



**Рис. 5.** Зміна об'ємної концентрації водню (визначена шляхом екстракції в гліцерин або силікон та на приладі LECO TCH 600 методом інфрачервоної адсорбції з плавленням зразка) в зразках балонної сталі

Внаслідок тривалої експлуатації кількість залишкового водню (об'ємна частка) поглинутого вуглецевою сталлю, з якої виготовлені балони, коливається в границях від 2,01 до 2,9 ppm. Кінетика виділення водню зі сталі після усунення тривалого контакту з ним приведена на рис. 5, а його розподіл по товщині стінки балона – на рис. 6. Вдосконалена методика визначення впливу об'ємної концентрації водню (екстракції в гліцерин або силікон та на приладі LECO TSN 600 методом інфрачервоної адсорбції з плавленням зразка) дає змогу розділити стадії десорбції водню: 1 – з поверхні, 2 – з дефектів, 3 – з пор, 4 – з твердодозчинного стану (рис. 6). Розподіл локальної концентрації водню по товщині стінки балона свідчить про її підвищення біля внутрішньої поверхні зразків після довготривалих витримок у водні (175 000 тис. год) в інтервалі робочих температур. При цьому застосовано лазер як джерело локального нагрівання і іонізації у поєднанні з мас-спектрометром для аналізу. Сфокусований пучок когерентного світла, що випромінюється оптичним квантовим генератором, потрапляє на досліджувану поверхню і залежно від питомої потужності в плямі виробляє або фотодесорбцію адсорбатів, або розплавлення, або випаровування матеріалу мішені. Усі три механізми використано у різних видах аналізу. В якості реєструючих приладів застосовано мас-спектрометр. Локальну концентрацію водню виміряно методом локального мас-спектрального аналізу з використанням лазерного зонда.



**Рис. 6.** Розподіл локальної концентрації водню по товщині стінки балона

Основна риса, притаманна досліджуваним матеріалам – метастабільність, тобто наявність більш або менш виражених часово- і температурнозалежних процесів структурної релаксації, яка знижує сумарну вільну енергію термодинамічної системи. Такі процеси, як правило, називають деградаційними, або деградацією. Іншими словами, деградація – це втрата тієї чи іншої властивості матеріалу (монотонно зростаюча або спадаюча зміна величини контрольованого параметра) в результаті його поступового і плавного переходу в більш термодинамічно рівноважний стан.

З точки зору аналітичного опису деградаційних перетворень ситуація ускладнюється ще і тим, що досліджувані матеріали часто зазнають цілеспрямованих зовнішніх впливів температури, тиску водню і радіаційних полів, кліматичних факторів, механічних навантажень, електромагнітних випромінювань тощо, які не завжди сприяють досягненню рівноважності.

Це відбувається як в процесі довготривалої експлуатації (старіння), так і на етапі додаткової обробки матеріалу з метою досягнення оптимальних властивостей (модифікація).

Ось чому встановити фізичні закономірності і розкрити внутрішні механізми деградаційних перетворень є важливим і актуальним завданням.

Як правило, деградаційний дрейф того чи іншого контрольованого параметра  $\eta$ , тобто швидкість зміни цього параметра в процесі деградаційного тесту, описується рівнянням:

$$\frac{d\eta}{dt} = -\lambda \cdot \eta^\alpha \cdot t^\beta \quad (2)$$

де параметри  $\alpha$  і  $\beta$  визначають тип релаксаційної функції (РФ) [13, 14].

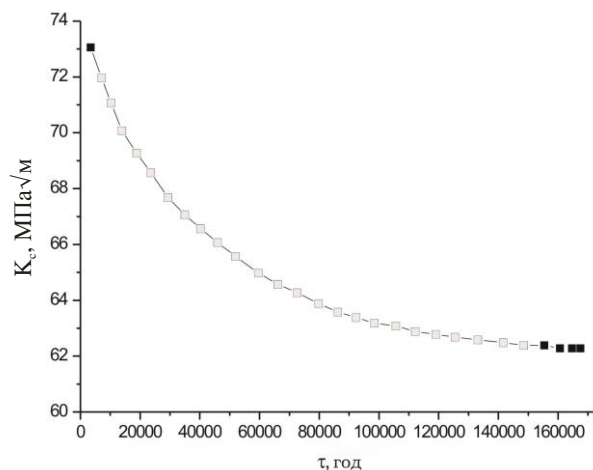
Якщо  $\alpha=1$  и  $\beta=0$ , то кінетика деградації визначається у вигляді простої експоненційної залежності контрольованого параметра від часу:

$$\eta(t) = ce^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

Така поведінка характерна для процесів, що визначаються одним значенням активаційної енергії або постійної часу  $\tau$ . Іноді експериментально спостережувана кінетика деградації спричинена одночасним внеском декількох елементарних деградаційних процесів, кожний з яких є експоненційним. В цьому випадку сумарний деградаційний процес описується лінійною комбінацією окремих РФ. Якщо швидкість зміни контрольованого параметра в процесі деградації залежить від часу, тобто параметр  $\beta \neq 0$ , то для опису такої кінетики використовують неекспоненційну РФ:

$$\eta(t) = c \exp \left[ - \left( \frac{t}{\tau} \right)^\kappa \right]. \quad (4)$$

Прийнято розрізняти дві групи процесів, механізми котрих відповідають неекспоненційній РФ [14]. Перша група включає моделі в яких використовується уявлення про дисперсійний транспорт, а друга – моделі ієрархічно обмеженої динаміки, що призводить до взаємно кореляційних релаксаційних процесів, які складаються з кількох послідовних етапів. З метою адекватного математичного опису кінетики експериментально спостережуваних перетворень розроблено пакет комп'ютерних програм, що давав змогу встановити оптимальну РФ. Значення параметрів відповідних РФ програма підбирала таким чином, щоб мінімізувати середнє квадратичне відхилення (*err*) експериментально отриманих величин дрейфу від теоретичної кривої, що відповідає мономолекулярній (експоненційній) або неекспоненційній РФ і дає можливість доповнити експериментальні дані отримані у вихідному стані та після тривалої експлуатації (рис. 7). Ці теоретичні дані дають змогу апроксимувати криву між початковим та кінцевим значеннями певної характеристики, яка дозволяє приймати рішення щодо можливості подальшої експлуатації відповідальних елементів конструкцій.



**Рис. 7.** Зміна з часом в'язкості руйнування зразків, виготовлених з тривало експлуатованих (до 175 тис. год) стінок водневих балонів зі сталі 45

**Висновки.** Визначено зміну експлуатаційних характеристик після тривалої експлуатації та вміст водню у зразках зі сталі 45, що використовується для виготовлення водневих балонів. Встановлено, що при випробовуваннях на повітрі зразків з деградованого матеріалу спостерігається “зуб” текучості, який зникає за випробувань у водні. Основна риса, притаманна досліджуваним матеріалам – метастабільність, тобто наявність більш або менш виражених часово- і температурнозалежних процесів структурної релаксації. Деградаційні процеси призводять до змін експлуатаційних властивостей. Проміжні (між вихідними та після тривалої експлуатації) значення в’язкості руйнування підібрано таким чином, щоб мінімізувати середнє квадратичне відхилення (*err*) експериментально отриманих величин дрейфу від теоретичної кривої, що відповідає експоненційній релаксаційній функції.

#### Список літератури:

1. **Механіка** руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. І. Балицький, О. В. Махненко, О. О. Балицький, В. А. Грабовський, Д. М. Завербний, Б. Т. Тимофєєв. Під ред. О. І. Балицького. – Київ: ВД “Академперіодика”, 2005. – 534 с.
2. **Y. Murakami** «Effect of hydrogen on fatigue crack growth of metals» / Proceedings of 17 th European Conference on Fracture, Czech Republic, Brno, 2008. - 25-42.
3. **J. Chmiel**, E. Lunarska «Effect of cavitations on absorption and transport of hydrogen in iron» / Trans Tech Publications, Switzerland, 2012. – 25-30.
4. **S. Fukuyama**, L. Zhang, K. Yokogawa «Hydrogen environment embrittlement of metals in high-pressure hydrogen storage»,
5. **A. Toshimitsu Yokobori Jr**, Y. Wada, T. Iwadate, K. Yamada, T. Ohmi «The effect of hydrogen diffusion behavior on the embrittlement of steel under hydrogen atmospheric condition»,
6. **S. Maus**, J. Hapke, C. Na Ranong, E. Wuchner, G. Friedlmeier, D. Wenger «Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks», International Journal of Hydrogen Energy №33, 2008. – 4612-4621.
7. **B. Swieczko-Zurek**, A. Zielinski, E. Lunarska «Hydrogen degradation of structural steels in technical hydrocarbon liquids», Journal of Materials and Corrosion №4, 2008. – 289-295.
8. **X. Ren**, W. Chu, Y. Su, J. Li, L. Qiao, B. Jiang, M. Zhang, G. Chen «The effects of atomic hydrogen and flake on mechanical properties of a tyre steel» A 491, 2008. – 164-171.
9. **Y. Li**, Z. Yang, Y. Liu, S. Li, G. Li, W. Hui, Y. Weng «The influence of hydrogen on very high cycle fatigue properties of high strength spring steel» A 4489, 2008. – 373-379.
10. **A. Macadre**, S. Matsuoka, F. Barbier, J. Furtado «Effects of hydrogen on fatigue properties of Ni-Cr-Mo steel candidate for A 70 MPA storage cylinder of a hydrogen filling station»
11. **H. Uyama**, M. Nakashima, K. Morishige, Y. Mine, Y. Murakami «Effects of hydrogen charge on microscopic fatigue behaviour of annealed carbon steels» / Fatigue Fract Engng Mater Struct 29, 2006. – 1066-1074.
12. **W. Blazejewski**, P. Gasiior, J. Kaleta, M. Rybaczuk «The IV. Generation vessels for hydrogen storage applied in vehicles. Modelling, technology and experiment» / Buletin of the Polish Hydrogen and Fuel Cell Association, Warsaw, 2011. – 82-89.
13. **V.O. Balitska**, B. Butkievich, O.I. Shpotyuk, M.M. Vakiv: On the analytical description of ageing kinetics in ceramic manganite-based NTC thermistors. Microelectronics Reliability Vol. 42 (2002) 2003-2007.
14. **V. Balitska**, O. Shpotyuk, M. Vakiv: Degradation of dynamic radiation-induced effects in chalcogenide vitreous compounds. Inżynieria Materiałowa Vol. 123, No 4 (2001) 89-192.



*А.И. Балицкий, М.М. Семерак, В.А. Балицкая, А.В. Субота, Я. Элиаш, О.Б. Вус*

## **ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОЧНОСТИ ВОДОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Определено изменение эксплуатационных характеристик после длительной эксплуатации и содержимое водорода в образцах из стали 45, что используется для изготовления водородных баллонов. Установлено, что при испытаниях на воздухе образцов из деградированного материала наблюдается зуб текучести, который исчезает при испытаниях в водороде. Основная черта, присущая исследуемым материалам, – метастабильность, то есть наличие более или менее выраженных часовой- и температурнозависимых процессов структурной релаксации. Деградиационные процессы приводят к изменениям эксплуатационных свойств. Промежуточные (между выходными и после длительной эксплуатации) значения вязкости разрушения подобрано таким образом, чтобы минимизировать среднее квадратичное отклонение (*err*) экспериментально полученных величин дрейфа от теоретической кривой, которая отвечает экспоненциальной релаксационной функции.

**Ключевые слова:** водородный баллон, прочность, деградация.

*A.I. Balitskii, M.M. Semerak, V.A. Balitska, A.V. Subota, Ya. Elias, O.B. Vus*

## **STRENGTH PROPERTIES CHANGE OF HYDROGEN CYLINDERS AT POWER GENERATING UNITS OF POWER PLANT FOR CONTINUOUS OPERATION**

The changes in exploitation characteristics after prolonged usage, and the hydrogen content in the samples with 45 steel used for the hydrogen manufacture cylinders are defined. By testing degraded material samples in the air sharp yield point which disappears during tests in hydrogen was observed. Main feature inherent in investigated material – metastability, that is the presence of more or less marked time- and temperature-dependent processes of structural relaxation. Degradation processes lead to exploitation properties changes. Intermediate (between baseline and after prolonged use) values of fracture toughness were chosen so as to minimize standard deviation (*err*) of experimentally obtained drift values from the theoretical curve corresponding exponential relaxation function.

**Keywords:** hydrogen cylinder, strength, degradation.

