

УДК 821. 894+ 620.17

В.Г. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, П.В. МАТВІЙШИН

Хмельницький національний університет

*Наведені результати експериментальних досліджень втомної витривалості при згині та фретингу зі згином зразків з різних сталей після іонного азотування в водневих і безводневих середовищах при випробуваннях в різних середовищах. Показано шкідливий вплив водню на втомну витривалість сталей при згині та фретингу зі згином.*

**Ключові слова:** втомна витривалість, згин, водень, середовище, іонне азотування, водневе середовище, безводневе середовище, фретинг.

V.G. KAPLUN, V.A. GONCHAR, T.V. DONCHENKO, P.V. MATVIISHIN  
Khmelnyskyi National university

### THE INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE FATIGUED ENDURANCE OF STEELS AFTER IONIC NITRIDING

*The results of experimental studies at multi-cycle and little-cycle fatigue in bending and fretting with bending of samples with different steels after ionic nitriding in hydrogen and hydrogen-free environments at tests in different environments. The grounded effect of hydrogen on the multi-cycle and little-cycle fatigue of steels after bending and fretting with bending. The conclusions and recommendations on the application of the technology of ionic nitriding in non-hydrogen environments for increasing the durability of steels with the multi-cycle and little-cycle fatigue bending and fretting with bending.*

**Keywords:** fatigue endurance, bend, hydrogen, environment, the ionic nitriding, hydrogen environment, hydrogen-free environment, fretting.

В експлуатаційних умовах під впливом робочого середовища змінюються багато властивостей матеріалу. Одним з найактивніших середовищ, що впливають на фізико-механічні властивості металів, є газоподібний водень. З газової фази водень адсорбується у вигляді іонів і атомів [1]. Водень, легко дифундує в металеві матеріали і накопичується у них, впливає на структуру, фазовий склад і фізико-механічні властивості [1–14]. Водень може знаходитися в металі, утворюючи тверді розчини «нового» типу, сегрегувати в недосконалість решітки (типу мікропорожнеч), вступати в хімічну сполуку з основним металом або з його домішками. У дефекти типу мікропорожнеч дифундує як іонізований, так і атомарний водень, де він молізується, причому ця дифузія йде з нульовою концентрацією в мікропорожнечках [2].

Проникність водню в метал залежить від його розчинності і дифузії. Механічні напруження підсилюють проникність у пружній зоні. Спостерігається лінійна залежність між проникністю і напруженнями. В пластичній зоні ця залежність порушується і проникність зростає швидше, ніж напруження. Залежність проникності від напружень виявляється тим сильніше, чим менша пластичність металу [3, 10]. Згідно з сучасними виставами [1–8], водень тривалий час може знаходитися в сталі у вигляді іонів (протонів) і молекул. Невелика кількість водню в сталі не викликає помітних змін її властивостей. Підвищення концентрації водню в сталі вище за деяку межу, залежну від якості стали, змінює її фізичні і механічні властивості і може викликати появу дефектів, що впливають на міцність. Водень в сталі міняє її механічні властивості при короткочасному і тривалому статичному вантаженні, а також при повторно-змінному і ударному вантаженні [8, 9, 11–13] викликаючи водневе викришення поверхні [1, 11–13].

В даний час є велика кількість робіт з вивчення впливу водню на фізико-механічні властивості матеріалів і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [3–6, 9, 14]. Серед всіляких проявів дії водню на механічні властивості металів, особливе місце займає його вплив на тріщиностійкість. Дефекти абсолютно безпечні в звичайних умовах в результаті дії водню можуть стати небезпечними і привести до несподіваного крихкого руйнування виробу [5].

В монографії [5] узагальнений великий експериментальний матеріал по впливу водню на об'ємну міцність сталі, на підставі якого можна зробити наступні висновки: водень не робить великого впливу на пружні характеристики сталі, проте пластичні властивості (подовження і звуження) знижуються пропорційно зростанню концентрації водню аж до досягнення його концентрації  $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ; при подальшому збільшенні концентрації водню пластичність знижується на низькому рівні; інтенсивність окрихчування сталі під впливом водню залежить від обробки руйнівні напруження знижуються пропорційно зростанню концентрації водню; міра окрихчування сталі під впливом водню зменшується із збільшенням швидкості деформації і виявляється в інтервалі температур  $-100 - +100^\circ\text{C}$  і найсильніше при нормальній температурі; вплив окрихчування виявляється за наявності розтягуючих напружень, типове для пластичної сталі в'язке руйнування у присутності водню стає крихким.

В роботах [2, 9] показано, що межа пропорційності в результаті високотемпературного наводнення знижується, причому тим більше, чим вищий вміст вуглецю в сталі. В разі зневуглецювання сталі навіть незначна концентрація водню в сталі призводить до різкого зниження пластичності і ударної в'язкості.

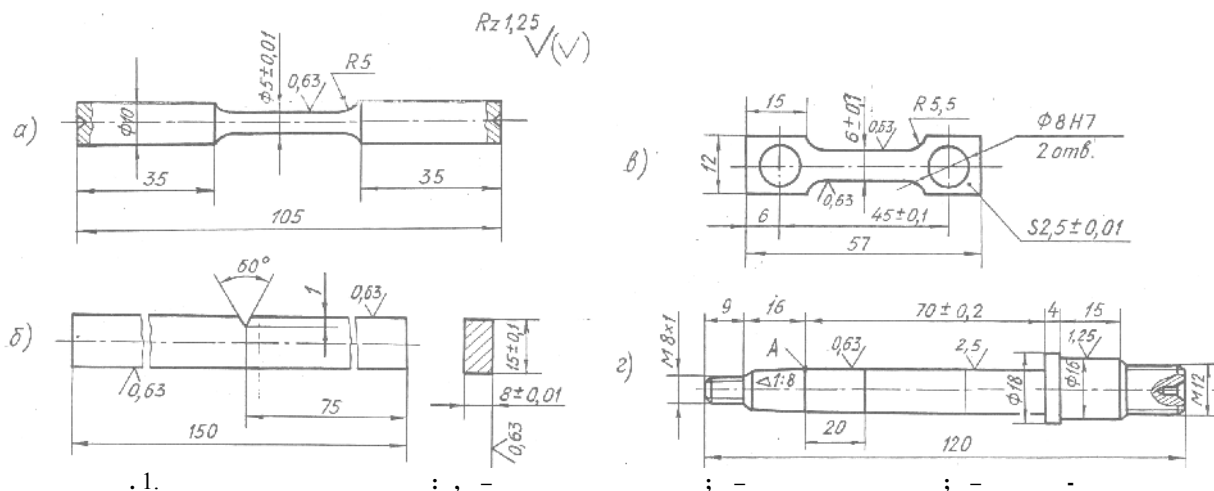
Середньолеговані сталі з 5–7% Сг і незначним вмістом Мо, W, V, Nb мають значно більшу водневу стійкість в порівнянні з низьколегованими сталями [2, 13].

На даний час в літературі мало робіт з впливу водню на метали та експлуатаційні характеристики конструкційних елементів з покриттями при циклічному навантаженні згином та контактному навантаженні при фретингу і тому такі дослідження є надзвичайно актуальними.

Дослідження на багатоциклову та малоциклову втому і фретинг-втому при згині проводилися на сталях 20, 45, 45X, 38X2МЮА, що піддавалися іонному азотуванню за різними режимами в водневих і безводневих середовищах. Випробування проводилися на повітрі і в різних середовищах (кислих, лужних і нейтральних) на плоских і циліндричних зразках (рис. 1). Дослідження ставили за мету визначити вплив режимів іонного азотування на опір втомі різних сталей, що азотувалися та випробувалися в різних середовищах і за різних умов вантаження, і намітити шляхи підвищення їх довговічності.

Порівняльні випробування на багатоциклову втому гладких циліндричних зразків проводилися на машині ІМА-5 при чистому згині з обертанням (частота 50 Гц), в середовищі 3-відсоткового розчину NaCl і в повітрі. Зразки виготовлялися із сталі 20, частина з яких піддавалася іонному азотуванню у водневому (60 об. % N<sub>2</sub> + 40 об. % H<sub>2</sub>) і безводневому (60 об. % N<sub>2</sub> + 40 об. % Ar) середовищах при постійності інших технологічних параметрів (T = 540°C, p = 80 Па, τ = 240 хв).

Випробування на багатоциклову втому з концентратором напружень проводилися на плоских зразках (рис. 1 б) із сталі 45X на стенді з електромагнітним збудженням в ЕДС-200 при консольному згині зразка в одній площині в резонансі по першій формі коливань [15]. Концентратор напружень (нарізана до зміцнення канавка глибиною 1 мм з кутом розкриття 60° і радіусом при вершині 0,2 мм) мав ефективний коефіцієнт концентрації, розрахований по Нейберу, рівний 3,22. Випробування проводилися на повітрі і в кислому середовищі (буферний розчин лимонної кислоти 5 г/л і двозаміщеного фосфорнокислого натрію 10 г/л) рН 6,5 при частоті вантаження 350–400 Гц. За базу випробувань на повітрі і в кислому середовищі були прийняті відповідно 10<sup>7</sup> і 5·10<sup>7</sup> циклів вантажень. Дослідження припинялися при досягненні довжини тріщини 0,5 мм, яка фіксувалася за допомогою мікроскопа МБС-1 (х88).



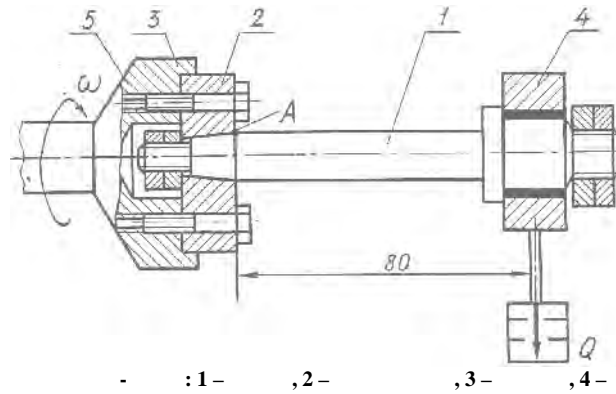
Випробування на малоциклову втому проводилися на модернізованій установці ПП-2 [16], що дозволяє випробовувати плоскі зразки (рис. 1, в) чистим віднульовим згином при пружнопластичній деформації з частотою 23 цикла/хв. Зразки із сталей 20, 45, 45X і 38ХМЮА випробовувалися в різних середовищах: кислому (буферному розчині лимонної кислоти і двозаміщеного фосфорнокислого натрію) рН 6,5, лужному (водний розчин оксиду кальцію) рН 13, нейтральному (конденсаті випарних апаратів) рН 7,0. Зразки перед азотуванням піддавалися нормалізації і поліпшенню. Фізико-механічні характеристики зразків до і після іонного азотування в безводневому (75 об. % N<sub>2</sub> + 25 об. % Ar) і водневому (75 об. % N<sub>2</sub> + 25 об. % H<sub>2</sub>) середовищах і режимі іонного азотування (T = 560°C, p = 265 Па, τ = 4 год) приведені в таблиці 1.

Випробування на фретинг-втому проводилися на базі типової машини УКІ-10М, призначеної для випробувань на втому при консольному згині, із застосуванням спеціального пристрою (рис. 2), в якому випробовуваний зразок 1 закріплювався кінцевою частиною в контрзразок 2 гайками 5. У кінцевому з'єднанні створювався певний натяг за допомогою динамометричного ключа. Контрзразок 2 з'єднувався з тримачем 3, який кріпився в цанговому патроні установки УКІ-10М і здійснював обертальний рух. Пристрій навантаження 4 створював напруження згину в зразку з максимальним значенням в точці А, які викликали мікропереміщення в кінцевому з'єднанні. При обертанні зразка і дії навантаження Q в кінцевому з'єднанні матеріал отримує фретинг-втому.

Таблиця 1

(75 .% N<sub>2</sub>+25 .% Ar) (75 .% N<sub>2</sub>+25 .% ) =560° , =265 , t=4

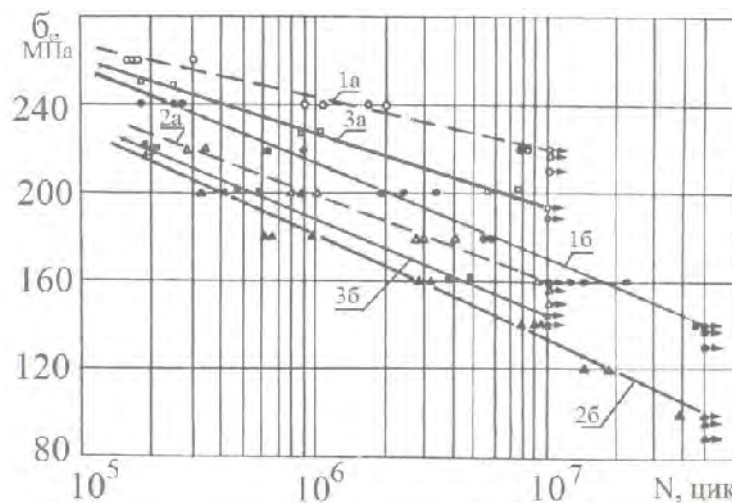
Марка сталі	Границя міцності σ <sub>b</sub> , МПа			Відносне видовження δ, %			Відносне звуження ψ, %			Питома робота деформації A, кН·м/м <sup>3</sup>		
	σ <sub>b</sub>	Азотування		δ	Азотування		ψ	Азотування		A	Азотування	
20	385	493	498	21	15	10	55	39	26	65	59	40
45	580	668	675	15	11	8,5	43	32	21	72	61	42
45X	1020	1103	1112	10	6	5	51	26	20	89	51	48
38ХМЮА	1051	1182	1191	9	5	4,7	42	22	19	86	53	51



.2.

Критерієм оцінки фретинг-втоми служило число циклів навантаження до руйнування зразка. За базове число циклів прийнято число циклів навантаження зразка, виготовленого з не азотованої сталі 40X і встановленого в контрзразок із сталі 35Л. Випробування проводилися на повітрі при частоті обертання зразка 6000 об/хв, навантаженні Q = 392 Н, моменті затягування гайки кріплення зразка 20–25 Н·м, максимальному напруженні згину 210 МПа. Биття зразка в місці прикладання навантаження Q складало 0,05–0,15 мм і контролювалося індикатором.

Як показали випробування (рис. 3) межа витривалості зразків із сталі 45X в результаті іонного азотування в безводнему середовищі підвищилася на 37% при випробуваннях в повітрі і на 31% при випробуваннях в кислому середовищі в порівнянні з неазотованими зразками після покращення. Однією з основних причин такого підвищення межі витривалості окрім зміцнювальної дії покриття є значні залишкові напруження стиску [10], що виникають в азотованому шарі, які разом з покриттям перешкоджають руху дислокацій до поверхні і тим самим уповільнюють зростання мікротріщин. Зразки, що азотувалися в воднему середовищі за аналогічним режимом, показали меншу витривалість на повітрі на 28%, а в кислому середовищі на 21% в порівнянні з азотованими зразками в безводнему середовищі.



.3.

Ar) : = 570° , p = 265 , τ = 240 ; 2- ; 3- (75 .% N<sub>2</sub>+25 .% (75 .% N<sub>2</sub>+25 .% (рН 6,5)

В таблиці 2 приведені результати випробувань на малоциклову втому неазотованих і азотованих зразків з яких видно, що в досліджуваному діапазоні зміни амплітуд повної деформації ( $\epsilon = 0,5-4,0$  %), довговічність зразків знаходиться в межах 102–105 циклів до руйнування, а її зв'язок з  $\epsilon$  є прямою лінією в подвійних логарифмічних координатах при випробуваннях різних матеріалів в різних середовищах. Дослідження показали, що при деформаціях  $\epsilon > 0,3$  % довговічність азотованих зразків нижча, ніж для не азотованих для всіх сталей (рис. 3), причому, це зниження тим більше, чим менші пластичні властивості сталі (табл. 1) і більше  $\epsilon$  (табл. 2). Дане положення є загальною закономірністю при малоцикловій втомі сталей.

Таблиця 2

(75 .% N<sub>2</sub>+25 .% Ar) (75 .% N<sub>2</sub>+25 .% Ar)

2) =560° , =265 , t=4

Відносна деформація $\epsilon$ , %	Сталь 45X			38ХМЮА		
	Не азотований	Іонне азотування		Не азотований	Іонне азотування	
		Безводневе середовище	Водневе середовище		Безводневе середовище	Водневе середовище
0,25	$3,5 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$
0,5	$4,5 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
0,75	$1,3 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^4$	$5,6 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$
1,0	$7,5 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^3$
1,5	$1,26 \cdot 10^3$	$0,6 \cdot 10^3$	$0,5 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$0,45 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$
2,0	$1,05 \cdot 10^3$	$0,23 \cdot 10^3$	$0,22 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$0,19 \cdot 10^3$	$0,16 \cdot 10^3$
2,5	$0,75 \cdot 10^3$	$0,35 \cdot 10^2$	$0,25 \cdot 10^2$	$0,6 \cdot 10^3$	$0,3 \cdot 10^2$	$0,2 \cdot 10^2$
3,0	$0,45 \cdot 10^3$	–	–	$0,4 \cdot 10^3$	–	–
4,0	$1,5 \cdot 10^2$	–	–	$0,11 \cdot 10^3$	–	–
$\epsilon$ , %	Сталь 45			Сталь 20		
0,25	$6,0 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$
0,5	$1,1 \cdot 10^4$	$0,9 \cdot 10^4$	$0,68 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$
0,75	$0,6 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$
1,0	$3,5 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^3$	$0,7 \cdot 10^3$
1,5	$1,19 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^3$	$0,37 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$0,33 \cdot 10^3$	$0,28 \cdot 10^3$
2,0	$0,83 \cdot 10^3$	$0,18 \cdot 10^3$	$0,14 \cdot 10^3$	$0,6 \cdot 10^3$	$0,18 \cdot 10^3$	$0,12 \cdot 10^3$
2,5	$0,55 \cdot 10^3$	$0,18 \cdot 10^2$	$0,15 \cdot 10^2$	$0,45 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^2$	$0,08 \cdot 10^2$
3,0	$0,35 \cdot 10^3$	–	–	$0,3 \cdot 10^3$	–	–
4,0	$0,1 \cdot 10^3$	–	–	$0,9 \cdot 10^2$	–	–

З таблиці 2 видно, що малоциклова витривалість всіх досліджуваних сталей після іонного азотування в водневомісткому середовищі значно нижча в порівнянні з її значенням при азотуванні в безводневому середовищі і при відносній деформації  $\epsilon = 0,25$  % ця різниця коливається від 10% для сталі 38ХМЮА до 68 % для сталі 20. Це пояснюється шкідливим впливом водню на пластичні властивості сталей, які збільшуються із зменшенням легуваності сталі [5]. Така ж закономірність при випробуваннях на мало циклову втому має місце і в інших середовищах.

Корозійне середовище істотніше зменшує малоциклову втому сталей з вищою міцністю [14]. При однакових деформаціях в сталях більшої міцності виникають вищі напруження, які сприяють прискоренню корозійних процесів у вершинах тріщин. Азотування підвищує характеристики міцності сталей. Тому при високих рівнях деформації азотовані сталі 45 і 20 мають більшу довговічність при випробуваннях на малоциклову втому в порівнянні з азотованими сталями 45X і 38ХМЮА (табл. 2).

Дослідження малоциклової втоми сталі 45X в різних середовищах показали, що різні середовища по-різному впливають на довговічність зразків в залежності від величини деформації. При відносних деформаціях  $\epsilon > 0,75$  % (табл. 3) число циклів до руйнування азотованих і незміцнених зразків в лужному середовищі вище, ніж на повітрі, нейтральному і кислому середовищах.

Це пояснюється тим, що при випробуваннях в лужному середовищі на поверхні зразків утворюється гідроксидний шар, який утрудняє доступ кисню в зону деформації [17], що сприяє підвищенню довговічності сталі при малоцикловій втомі. Значне електрохімічне розчинення сталей в кислому середовищі створює умови для інтенсивного утворення концентраторів напружень, що знижує втому міцність сталей. У нейтральному середовищі, що має меншу корозійну активність, малоциклова довговічність азотованої і неазотованої сталі 45X вища в порівнянні з кислим середовищем. Із збільшенням амплітуди циклічної деформації вплив агресивності середовища на малоциклову втому зменшується та збільшується роль пластичної деформації і при  $\epsilon \approx 0,75$  % для азотованих і при  $\epsilon \approx 4$  % для неазотованих зразків їх втомна довговічність на повітрі і в корозійних середовищах збігаються (табл. 3).

Відносна деформація $\epsilon$ , %	(75 .% N <sub>2</sub> + 25 .% Ar)			(75 .% Ar + 25 .% N <sub>2</sub> )		
	Лужне середовище			На повітрі		
	He	Азотування		He	Азотування	
Безводневе		Водневомістке	Безводневе		Водневомістке	
0,25	азотобийний	31420	28130	азотобийний	22015	19620
0,5	8130	5740	4150	6920	5330	4450
0,75	3810	2330	2070	3540	2250	1910
1,0	2250	1500	1350	2050	1450	1230
1,5	1050	580	520	900	480	625
2,0	630	450	410	620	350	305
2,5	450	310	270	440	230	210
3,0	320	220	190	310	170	145
4,0	210	150	135	206	95	80

Результати випробувань на малоциклову втому при згині зразків зі сталі 45X (табл. 3) показують, що при азотуванні в водневому середовищі їх довговічність значно нижча в порівнянні з азотуванням в безводневому насичуючому середовищі, а саме: в лужному середовищі на 10–13%, на повітрі і нейтральному середовищах – на 15–20% і в кислому середовищі – на 25%.

На основі проведених досліджень впливу технологічних параметрів іонного азотування в безводневих середовищах на фретинг-втому [9] було визначено оптимальний режим іонного азотування ( $T = 540^\circ\text{C}$ ;  $p = 320\text{Па}$ ;  $\tau = 150\text{ хв}$ ; середовище 62 об %N<sub>2</sub>+38 об % Ar.) за критерієм максимальної довговічності. Даний режим забезпечує максимальну довговічність зразків при випробуваннях на фретинг-втому ( $N = 46,8 \cdot 10^6$  циклів), що перевищує в 20 разів довговічність неазотованих зразків. При цьому азотований шар має глибину  $h = 256\text{ мкм}$ , глибину нітридної зони  $h_1 = 4\text{ мкм}$ , мікротвердість поверхні  $H_{100} = 7230\text{ МПа}$  і фазовий склад поверхневого шару 20 %  $\epsilon + 55\% 25\% \alpha\text{Fe}_{(N)}$ .

З метою визначення впливу водню на довговічність сталі 40X при фретинг-втомі проведені порівняльні випробування зразків після іонного азотуванні в водневому середовищі (62 об %N<sub>2</sub>+38 об % H<sub>2</sub>) при зазначеному вище значенні у інших технологічних параметрів оптимального режиму азотування. Умови випробувань були ідентичними умовам випробувань зразків, що азотувалися в безводневих середовищах за оптимальним режимом. Мікроструктурними та рентген-структурними дослідженнями визначено, що товщина азотованого шару  $h = 280\text{ мкм}$ , товщину нітридної зони  $h_1 = 6\text{ мкм}$ , мікротвердість поверхні  $H_{100} = 9670\text{ МПа}$  і фазовий склад поверхневого шару 80 %  $\epsilon + 20\% \gamma'$ . Випробування показали, що довговічність цих зразків на 62% нижча в порівнянні з зразками, що азотувалися в безводневому середовищі. Причинами такого зменшення довговічності зразків є водневе окрихчення металу в зв'язку з наявністю водню в насичуючому середовищі та утворенні великої кількості твердої і крихкої  $\epsilon$ -фази.

Таким чином, проведені дослідження показали велику ефективність технології іонного азотування в безводневих середовищах при підвищенні втомної витривалості сталей при згині та фретингу. Іонне азотування в водневих середовищах викликає суттєве зменшення втомної витривалості сталей в усіх досліджуваних середовищах в зв'язку водневою крихкістю металу.

При багатому цикловій втомі зразки, що азотувалися в водневому середовищі, показали меншу витривалість на повітрі на 28%, а в кислому середовищі на 21% в порівнянні з азотованими зразками, що азотувалися в безводневому середовищі за аналогічними режимами.

Дослідження малоциклової втоми сталей при випробуваннях в різних середовищах показали, що застосування азотування при відносних деформації  $\epsilon > 0,3\%$  в безводневих середовищах і  $\epsilon > 0,2\%$  в водневомістких середовищах є недоцільним, оскільки довговічність сталей нижча в порівнянні з її значенням для неазотованих сталей.

Порівняльні випробування зразків на фретинг зі згином після іонного азотування в водневому середовищі (62 об %N<sub>2</sub>+38 об % H<sub>2</sub>) при оптимальному режимі азотування мали довговічність на 62% нижчу в порівнянні з зразками, що азотувалися в безводневому середовищі. Причинами такого зменшення довговічності зразків є водневе окрихчення металу та утворенні великої кількості твердої і крихкої  $\epsilon$ -фази в поверхневому шарі.

1. Водород в металлах / под ред. Г. Альфельда и И. Фелькля. – М. : Мир, 1981. – 380 с.
2. Арчаков Ю.И. Водородоустойчивость стали / Арчаков Ю.И. – М. : Металлургия, 1978. – 150 с.
3. Карпенко Г.В. Влияние водорода на свойства стали / Карпенко Г.В., Крипякевич Р.Н. – М. : Metallurgizdat, 1962. – 196 с.
4. Похмурський В.І. Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах / Похмурський

- В.І., Федоров В.В. – Львів : Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1998. – 238 с.
5. Механика разрушения и прочность металлов : справ. пособие : в 4 т. Т. 1: Основы механики разрушения / под общ. ред. В.В. Панасюка. – К. : Наук. думка, 1988. – 488 с.
  6. Карпенко Г. В. Физико-химическая механика конструкционных металлов : в 2 т. / Г. В. Карпенко // Избр. труды. – К. : Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 228 с.
  7. Балицький О. І. Оцінювання впливу водню на механічні характеристики складно легованого нікелевого сплаву / О. І. Балицький, В. М. Мочульський, Л. М. Іваськевич // Фіз.-хим. мех. Матеріалов. – 2015. – № 4. – С. 91–100.
  8. Коттрелл П. Водородная хрупкость металлов / Коттрелл П. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 117 с.
  9. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун, П.В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.
  10. Каплун П.В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості / П.В. Каплун, Б.А. Ляшенко// Проблемы прочности. – 2016. – № 6. – С. 56–63.
  11. Калачев В. А. Водородная хрупкость металлов / В. А. Калачев. – М. : Metallurgiya, 1985. – 217 с.
  12. Гельд П. В. Водород и физические свойства металлов и сплавов / П. В. Гельд, Р. А. Рябов, Л. П. Мохрачева. – М. : Наука, 1985. – 232 с.
  13. Мороз Л.С. Водородная хрупкость металлов / Мороз Л.С., Чечулин Б.В. – М. : Metallurgiya, 1967. – 255 с.
  14. Карпенко Г. В. Влияние структуры сталей на их малоцикловую усталость в атмосфере водорода / Г. В. Карпенко, А. Н. Романив, В. И. Ткачев // Докл. АН УССР. – 1974. – Т. 214. – № 2. – С. 312–314.
  15. Прокопенко А.В. Методика испытаний компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде / А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1980. – № 4. – С. 107–109.
  16. Ткачев В.И. Машина ИП–2 для испытаний металлов на малоцикловую усталость в жидких средах / В.И. Ткачев, Ю.И. Бабей // Физико-химическая механика материалов. – 1966. – № 2. – С. 228–229.
  17. Улиг Г. Коррозия металлов / Улиг Г. – Metallurgiya, 1968. – 308 с.

## References

1. Vodorod v metallakh / pod red. H. Alfelda y Y. Felkha. – M. : Myr, 1981. – 380 s.
2. Archakov Yu.Y. Vodorodoustoichivost staly / Archakov Yu.Y. – M. : Metallurhiya, 1978. – 150 s.
3. Karpenko H.V. Vliyanye vodoroda na svoistva staly / Karpenko H.V., Krypiakevych R.N. – M. : Metallurhyzdat, 1962. – 196 s.
4. Pokhmurskiy V.I. Fedorov V. V. Vplyv vodniu na dyfuziini protsesy v metalakh / Pokhmurskiy V.I., Fedorov V.V. – Lviv : Fiz.-mekh. in-t im. H. V. Karpenka NAN Ukrainy, 1998. – 238 s.
5. Mekhanyka razrusheniya y prochnost metallov : sprav. posobyе : v 4 t. T. 1: Osnovy mekhanyky razrusheniya / pod obshch. red. V.V. Panasiuka. – K. : Nauk. dumka, 1988. – 488 s.
6. Karpenko H. V. Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka konstruksyonnykh metal lov : v 2 t. / H. V. Karpenko // Yzbr. trudy. – K. : Nauk. dumka, 1985. – T. 1. – 228 s.
7. Balytskyi O. I. Otsiniuvannya vplyvu vodniu na mekhanichni kharakterystyky skladno lehovanoho nikelovoho splavu / O. I. Balytskyi, V. M. Mochulskyi, L. M. Ivaskyevych // Fyz.-khy. mekh. Materyalov. – 2015. – # 4. – S. 91–100.
8. Kottrell P. Vodorodnaia khрупkost metallov / Kottrell P. – M. : Metallurhyzdat, 1963. – 117 s.
9. Kaplun V.H. Yonnoe azotyrovanye v bezvodorodnykh sredakh / V.H. Kaplun, P.V. Kaplun. – Khmelnytskyi : KhNU, 2015. – 344 s.
10. Kaplun P.V. Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen v azotovanykh sharakh pislia ionnoho azotuvannya za pokaznykamy mikrotverdosti / P.V. Kaplun, B.A. Liashenko// Problemy prochnosti. – 2016. – # 6. – S. 56–63.
11. Kalachev V. A. Vodorodnaia khрупkost metal lov / V. A. Kalachev. – M. : Metallurhiya, 1985. – 217 s.
12. Held P. V. Vodorod y fyzycheskye svoistva metallov y splavov / P. V. Held, R. A. Riabov, L. P. Mokhracheva. – M. : Nauka, 1985. – 232 s.
13. Moroz L.S. Vodorodnaia khрупkost metallov / Moroz L.S., Chechulyn B.V. – M. : Metallurhiya, 1967. – 255 s.
14. Karpenko H. V. Vliyanye struktury staley na ykh malotsyklovuiu ustalost v atmosfere vodoroda / H. V. Karpenko, A. N. Romanyv, V. Y. Tkachev // Dokl. AN USSR. – 1974. – T. 214. – # 2. – S. 312–314.
15. Prokopenko A.V. Metodyka ispytanykh kompressornykh lopatok HTD na ustalost v korrozyonnoi srede / A.V. Prokopenko, V.N. Torhov // Problemy prochnosti. – 1980. – # 4. – S. 107–109.
16. Tkachev V.Y. Mashyna YP–2 dlia ispytanykh metallov na malotsyklovuiu ustalost v zhydkykh sredakh / V.Y. Tkachev, Yu.Y. Babei // Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka materyalov. – 1966. – # 2. – S. 228–229.
17. Ulyh H. Korroziya metal lov / Ulyh H. – Metallurhiya, 1968. – 308 s.

Рецензія/Peer review : 16.06.2017 р.

Надрукована/Printed :25.10.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Киницький Я.Т.