

УДК 620.178.112:339.788

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ІОННЕ АЗОТУВАННЯ СТАЛЕЙ

П. В. КАПЛУН

Хмельницький національний університет

Наведено результати експериментальних досліджень контактної витривалості зразків з різних сталей після іонного азотування у водневих і безводневих середовищах за випробувань у мастилi I-20. Показано шкідливий вплив водню на контактну витривалість сталей за тертя кочення.

Ключові слова: *контактна витривалість, водень, воднева крихкість, точковий контакт, іонне азотування, водневе середовище, тертя кочення.*

Одним з найактивніших середовищ є газоподібний водень, який легко дифундує в металеві матеріали і, накопичуючись у них, діє на структуру, фазовий склад і фізико-механічні властивості [1–11]. Під час наводнювання спостерігають зниження пластичності металів, тому явище називають воднева крихкість [4–8]. У результаті багаторічних досліджень встановлено основні закономірності водневої крихкості сталей [1–8]. Водень у сталі змінює її механічні властивості за короткочасного і тривалого статичного навантаження, а також за повторно-змінного і ударного [1, 5–7, 9], зумовлюючи водневе окрихчення поверхні [12–15]. Його може спричинити наднизька ($< 1 \text{ cm}^3 / 100 \text{ g}$ металу) концентрація водню; крихкість стає незворотною з перевищенням деякого критичного рівня концентрації водню або зі збільшенням часу його взаємодії з металом; ступінь окрихчення залежить від значення, виду і розподілу напружень та знижується з підвищенням швидкості деформації; температура – 373...373 К найсприятливіша для прояву водневого окрихчення; ступінь водневої крихкості залежить від вмісту вуглецю в металі; концентратори напружень посилюють дію водню [10]. Серед різних проявів дії водню на механічні властивості металів, особливе місце займає його вплив на тріщиностійкість. Дефекти, які абсолютно безпечні в звичайних умовах, в результаті дії водню можуть стати небезпечними і призвести до несподіваного крихкого руйнування виробу [6].

Значним стимулятором водневої крихкості є спотворення кристалічної ґратки металу, викликане пружними і пластичними деформаціями [6, 7, 11]. У зв'язку з цим необхідно розрізняти механічні характеристики, отримані на заздалегідь насичених воднем сталевих зразках з неспотвореними ґратками, на зразках із спотвореними ґратками та на зразках, насичених воднем під час деформації [2, 13].

На сьогодні існує багато гіпотез [4, 5, 8, 12, 14, 15], які пояснюють вплив водню на метали. Причинами їх окрихчення вважають: зростання тиску молекулярного водню у внутрішніх мікропорожнинах; послаблення міжатомних зв'язків у металі розчиненим воднем; зниження питомої енергії внутрішніх поверхонь тріщин адсорбованим воднем. Окрім того, важливу роль у перенесенні водню та руйнуванні матеріалу відіграють дислокації [8]. Дислокаційно-декогезійна гіпотеза припускає, що водень зосереджується в ядрах дислокацій. Тому за їх накопичення біля перешкод концентрація водню може виявитись достатньою для різкого

пришвидшення руйнування [5]. Численні теоретичні концепції, які пояснюють водневе окрихчення металів, свідчать про актуальність проблеми та відсутність вичерпних уявлень про механізм явища [4, 16].

Водень у зоні тертя призводить до посиленого зношування металів [10, 12, 14–16]. Під час тертя створюються умови для трибодеструкції мастил, води тощо і виділення водню, іони якого безперервно накопичуються у поверхневих шарах металів з підвищеною дефектністю і, коли досягається їх надрівноважна концентрація, відбувається екзотермічна реакція молізації водню у мікро- і макродефектах ґратки, що призводить до руйнування поверхневих шарів металу [15]. На сьогодні в літературі мало праць з впливу водню на метали та експлуатаційні характеристики конструкційних елементів з покриттями за циклічного контактного навантаження під час тертя кочення і тому такі дослідження є надзвичайно актуальними.

Метод досліджень. Для визначення впливу водню на контактну витривалість сталей 20, 40X, ШХ15 і Х12М після іонного азотування у водневому і безводневому середовищах насичення, виконували порівняльні випробування зразків під час тертя кочення з точковим і лінійним контактами на універсальній установці [17]. Досліджували плоскі зразки \varnothing 40 mm з дифузійними покриттями і без них у мастилі І-20. Іонне азотування здійснювали у водневому (62 vol.% N_2 + 38 vol.% H_2) і безводневому (62 vol.% N_2 + 38 vol.% Ar) середовищах насичення, за однаковим технологічним режимом, а саме: температура $T = 843$ К, тиск у вакуумній камері $P = 240$ Па, час дифузійного насичення $\tau = 4$ h. Перед нанесенням дифузійних покриттів зразки шліфували (шорсткість $R_a = 0,125$ mm). Тілами кочення були кульки \varnothing 7,14 mm за точкового контакту і ролики \varnothing 4,5 mm та довжиною 4,6 mm за лінійного, які мали твердість HRC 63 і рухалися по колу \varnothing 30 mm. Випробовували за максимального тиску в області контакту 2140 МПа.

Наведено (табл. 1) фізико-механічні характеристики зразків сталей, які зміцнювали методом іонного азотування в безводневому та водневому середовищах за однаковим режимом. Результати свідчать, що мікротвердість поверхні і товщина азотованого шару зразків всіх сталей після іонного азотування у водневому середовищі більші, ніж після азотування в безводневому середовищі. Аналогічну картину спостерігали під час досліджень фазового складу поверхні зразків цих сталей. Після іонного азотування у водневому середовищі на поверхні утворюються нітридні сполуки з переважаючим вмістом ϵ -фази за відсутності або дуже малого вмісту α - $Fe_{[N]}$ -фази. За іонного азотування у безводневому середовищі на поверхні азотованого шару присутня велика кількість α - $Fe_{[N]}$ -фази і значно менша кількість ϵ -фази, що забезпечує більшу його пластичність.

Під час іонного азотування водень стимулює у середовищі насичення утворення значної кількості (до 11%) іонів N^+ [18], що сприяє утворенню нітридів і, зокрема, крихкої ϵ -фази. Під дією контактних напружень у ϵ -фазі досить швидко утворюються мікротріщини, які за дії водню швидко ростуть, перетворюючись у макротріщини, що прискорює викришування на поверхні кочення.

Наведено (табл. 2) результати досліджень контактної витривалості в мастилі І-20 зразків різних сталей, які азотували за однаковим режимом у водневому (62 vol.% N_2 + 38 vol.% H_2) і безводневому (62 vol.% N_2 + 38 vol.% Ar) середовищах за точкового та лінійного контактів.

З наведених результатів бачимо, що водень у середовищі насичення призводить до зниження контактної витривалості через водневе окрихчення металу. Контактна витривалість сталей, які азотували у безводневому середовищі, за точкового контакту підвищилася в 1,44–1,7 рази порівняно з неазотованими. Ці ж сталі після азотування у водневому середовищі мали контактну витривалість на

15...54% меншу порівняно з азотуванням у безводневому середовищі, причому шкідливий вплив водню на контактну витривалість збільшується зі зменшенням легуваності сталі. Наприклад, зниження контактної витривалості за іонного азотування у водневому середовищі порівняно з таким у безводневому за точкового контакту для сталі 20 становить 45%, для сталі 40X – 20%, для сталі ШХ15 – 18%, а для сталі Х12М – 4%. Дослідження показують, що якщо за іонного азотування концентрація водню в середовищі насичення більша за 10%, то це викликає водневе окрихнення сталі, яке збільшується з підвищенням концентрації водню.

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики зразків, які азотували в безводневому та водневому середовищах за режимом $T = 843 \text{ K}$, $P = 240 \text{ Pa}$, $\tau = 4 \text{ h}$

Марка сталі	Термообробка та технологія нанесення покритву	Мікротвердість поверхні H_{100} , МПа	Товщина покритву, μm	Мікротвердість основи H_{100} , МПа	Фазовий склад поверхні азотованого шару, %		
					ϵ -фаза	γ -фаза	$\alpha\text{-Fe}_{[N]}$ -фаза
Безводневе середовище (62 vol.% N_2 + 38 vol.% Ar)							
20	іонне азотування	7680	200	2370	21	36	33
40X	гартування + іонне азотування	7800	280	4100	32	46	22
ШХ15	гартування + іонне азотування	8180	290	4970	40	44	16
Х12М	гартування + іонне азотування	8900	260	5440	42	40	18
Водневе середовище (62 vol.% N_2 + 38 vol.% H_2)							
20	іонне азотування	7950	210	2370	61	36	3
40X	гартування + іонне азотування	8380	290	4570	70	30	0
ШХ15	гартування + іонне азотування	8670	300	5540	73	27	0
Х12М	гартування + іонне азотування	9100	280	5670	75	25	0

Результати досліджень (табл. 2) показують, що контактна витривалість сталей за лінійного контакту менша порівняно з точковим за ідентичних умов випробувань. Це зменшення контактної витривалості пояснюється різними умовами роботи матеріалу за плоского і об'ємного напружено-деформованого станів та більшим коефіцієнтом проковзування за лінійного контакту.

Таблиця 2. Вплив водню на контактну витривалість різних сталей під час тертя кочення з проковзуванням з точковим та лінійним контактами після іонного азотування у водневих і безводневих середовищах за тиску в області контакту $P_0 = 2140$ МПа

Вид термічної і хіміко-термічної обробки сталі	Контактна витривалість різних сталей $N \cdot 10^6$, cycles			
	20	40X	ШХ15	X12M
Точковий контакт				
Без термічної обробки	0,5	0,6	0,7	0,9
Іонне азотування у водневому середовищі 62 vol.% N_2 + 38 vol.% H_2	0,65	0,80	0,91	1,25
Іонне азотування у безводневому середовищі 62 vol.% N_2 + 38 vol.% Ar	0,85	0,96	1,08	1,30
Лінійний контакт				
Без термічної обробки	0,4	0,5	0,55	0,75
Іонне азотування у водневому середовищі 62 vol.% N_2 + 38 vol.% H_2	0,55	0,70	0,8	1,0
Іонне азотування у безводневому середовищі 62 vol.% N_2 + 38 vol.% Ar	0,76	0,82	0,9	1,15

ВИСНОВКИ

Іонне азотування позитивно впливає на контактну витривалість сталей, яка після азотування у безводневому середовищі за випробувань у мастилі І-20 збільшилася в 1,44–1,7 рази порівняно з неазотованими сталями. Іонне азотування у водневих середовищах з вмістом водню > 10% спричиняє водневе окрихчення сталей та зменшення їхньої контактної витривалості тим більше, що вища концентрація водню.

В умовах експериментів після іонного азотування у водневому середовищі контактна витривалість сталей зменшилася на 15...54% порівняно з азотуванням у безводневому середовищі. Шкідливий вплив водню зростає зі зменшенням легуваності сталей. Водень під час іонного азотування активізує утворення нітридів і крихкої ϵ -фази, що сприяє викришуванню поверхневого шару на доріжці кочення.

РЕЗЮМЕ. Приведены результаты экспериментальных исследований контактной выносливости образцов различных сталей после ионного азотирования в водородных и безводородных средах при испытаниях в масле И-20. Показано вредное влияние водорода на контактную выносливость сталей при трении качения.

SUMMARY. The results of experimental researches on contact endurance of various steel samples after ion nitriding in hydrogen and hydrogen-free media during tests in I-20 industrial oil were presented. Harmful influence of hydrogen on contact endurance of steels under rolling friction was demonstrated.

1. Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И. Влияние водорода на свойства стали. – М.: Металлургия, 1962. – 196 с.
2. Швед М. М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – К.: Наук. думка, 1985. – 118 с.
3. Похмурський В. І., Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1998. – 238 с.
4. Походня І. К., Швачко В. І. Природа водневої крихкості конструкційних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 2. – С. 87–96.

- (*Pokhodnya I. K. and Shvachko V. I.* Nature of hydrogen brittleness of structural steels // *Materials Science*. – 2001. – **37**, № 2. – P. 241–251.)
5. *Калачев В. А.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 218 с.
 6. *Механика* разрушения и прочность металлов: справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Т. 1: Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, А. А. Андрейков, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
 7. *Балицький О. І., Мочульський В. М., Іваськевич Л. М.* Оцінювання впливу водню на механічні характеристики складно легованого нікелевого сплаву // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 4. – С. 91–100.
(*Balyts'kyi O. I., Mochul's'kyi V. M., and Ivas'kevych L. M.* Evaluation of the influence of hydrogen on the mechanical characteristics of complexly alloyed nickel alloys // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 4. – P. 538–547.)
 8. *Коттрелл П.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургиздат, 1963. – 118 с.
 9. *Каплун В. Г., Каплун П. В.* Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – 344 с.
 10. *Арчаков Ю. И.* Водородоустойчивость стали. – М.: Металлургия, 1978. – 150 с.
 11. *Федірко В. М., Погрелюк І. М.* Азотування титану та його сплавів. – К.: Наук. думка, 1996. – 222 с.
 12. *Защита* от водородного износа в узлах трения / Под ред. А. А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.
 13. *Кіндрачук М. В., Стечишина Н. М., Михайлів Н. П.* Вплив попереднього іонно-плазмового наводнення на трибологічні властивості іонно-азотованих поверхонь // *Проблеми тертя та зношування*. – 2008. – № 50. – С. 180–189.
 14. *Поляков А. А., Гаркунов Д. Н.* Водородный износ в узлах трения. – М.: Наука, 1977. – 86 с.
 15. *Беркович И. И., Громаковский Д. Г.* Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. – Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
 16. *Похмурський В. І., Васи́лів Х. Б.* Вплив водню на тертя і зношування металів (Огляд) // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 2. – С. 5–18.
(*Pokhmurs'kyi V. I. and Vasyliv Kh. B.* Influence of hydrogen on the friction and wear of metals (a survey) // *Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 125–138.)
 17. *Патент* на корисну модель № 106181. Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням / П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко. – Опубл. 25.04.2016; Бюл. № 8.
 18. *Ионная* химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. З. Баумана, 1999. – 400 с.

Одержано 19.09.2017