

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КАРБООЗОТОВАНОЇ СТАЛІ 40X

М. С. СТЕЧИШИН¹, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО¹, А. В. МАРТИНЮК¹,
М. М. ЛУК'ЯНЮК¹, М. Я. ДОВЖИК², В. О. ГЕРАСИМЕНКО²

¹ Хмельницький національний університет;

² Сумський національний аграрний університет

Подано результати дослідження впливу безводневого карбоазотування в тліючому розряді на фізико-хімічні характеристики зміцненого шару сталі 40X залежно від вмісту пропану та тиску газового середовища. Розглянуто три варіанти насичення: вуглець + азот, азот + вуглець, спільне насичення азотом та вуглецем. Аналіз отриманих результатів показав найвищу ефективність зміцнення поверхні сталі 40X за третім варіантом насичення.

Ключові слова: карбоазотування, мікротвердість, структура.

Вступ. Карбоазотування в тліючому розряді – це одночасне насичення поверхні металу азотом і вуглецем за низьких температур (від 500 до 600°C). Результати деяких досліджень цього процесу наведені раніше [1, 2]. У цих працях розглядали вплив вуглецю на структуру і властивості азотованих шарів під час гартування в аміачній плазмі з додатками газів, що містять вуглець.

Так, під час азотування в аміачній плазмі з додатками пропану утворюється шар із розвинутою карбонітридною поверхневою зоною, яка містить у зоні внутрішнього азотування карбонітридну сітку на межах аустенітних зерен. Введення в аміачну плазму пропану зменшує швидкість утворення зони внутрішнього азотування.

Залежність товщини карбонітридної зони $[\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})]$ від концентрації цементувального газу, наприклад, пропану, носить екстремальний характер. Максимальний розвиток карбонітридна зона отримує за вмісту пропану в суміші від 8 до 12%. При цьому її товщина в 1,5 рази більша глибини нітридної зони, яку отримують за азотування в аміачній плазмі. За вмісту пропану ~40% взагалі гальмується ріст азотованого шару, очевидно, внаслідок утворення на поверхні карбонітридної або карбографітної плівки.

Також досліджували вплив складу насичувальної атмосфери на зносостійкість сталі 38ХМЮА. Вивчали сталь, азотовану при 520 і 650°C упродовж 1,3 h в аміаці і в сумішах аміаку з пропаном і аргоном. Крім того, процеси комбінували за роздільною двостадійною схемою: на першій стадії (1,5 h) на поверхні сталі утворювалась зона внутрішнього азотування за обробки в аміачно-аргонній (10% аміаку + 90% аргону) плазмі, а на другій (12% пропану (C_3H_8) + 88% аргону, 1,5 h) формувалася карбонітридна зона на базі ϵ -карбонітриду $\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})$ [2].

Додатковим резервом поліпшення характеристик поверхневих шарів азотованих сталей є застосування (за одностадійною схемою) комбінованих процесів: утворення зони внутрішнього азотування за режимом катодного розпилення в плазмі аргону (від 85 до 95%) і аміаку (від 15 до 5%) та наведення на поверхні дифузійного шару карбонітридної зони в плазмі аміаку (90%) і пропану (10%) за оптимального тиску. Такі режими дають змогу інтенсифікувати насичення і забезпечують отримання максимальної зносостійкості [3].

Контактна особа: М. С. СТЕЧИШИН, e-mail: av.mart@ukr.net

Мета роботи – розробити технології зміцнення поверхні конструкційної сталі 40Х безводневим карбоазотуванням у тліючого розряді для підвищення її зносостійкості під час довготривалої експлуатації.

Методика досліджень. Досліджували сталь 40Х. Вивчали залежність характеристик карбоазотованого шару (глибини, твердості, структури, фазового і хімічного складу) від основних параметрів технологічного процесу (тиску, складу насичувального середовища, температури і тривалості). Як робочі гази використовували суміш азоту і аргону (75% N₂ + 25% Ar) та пропан C₃H₈, температура насичення змінювалася від 480 до 600°C, тиск газової суміші під час дифузійного насичення – від 80 до 400 Pa, тривалість процесу – від 20 до 240 min.

Під час дослідження використовували методи металографії, рентгеноструктурного і хімічного аналізів, в результаті яких визначали характеристики карбоазотованого шару: структуру і товщину зі застосуванням мікроскопів ММР-2Р, “Neophot-21”; мікротвердість – мікротвердоміра ПМТ-3; фазового складу – рентгенівського приладу ДРОН-3М.

На основі досвіду попередніх досліджень [4] використовували підвіску і порядок розміщення на ній зразків з врахуванням результатів [5].

Для раціонального виконання дослідів і отримання достовірної інформації застосовували математичні методи планування експериментів (плани першого і другого порядку) і статистичні методи обробки результатів.

Результати досліджень та їх обговорення. Для карбоазотування в тліючому розряді для зміцнення деталей машин необхідні такі його технологічні режими, за яких досягаються максимальні фізико-хімічні, міцнісні, корозійні, втомні характеристики. З огляду на те, що карбоазотування в тліючому розряді дозволяє широку зміну властивостей отримуваних покриттів через прості, легкокеровані технологічні параметри, отримуємо можливість їх оптимізації за заданими контрольними характеристиками. При цьому вихідними параметрами поверхневого зміцнення можуть бути як експлуатаційні (зносостійкість, міцність, тріщиностійкість, втомна витривалість), так і внутрішні фізико-механічні властивості (товщина шару, фазовий склад дифузійного шару, його структура, твердість тощо).

Щоб визначити оптимальну кількість пропану в насичувальному середовищі та тиск в розрядній камері, використали низку технологічних режимів зміцнення сталі 40Х. Технологічні параметри утворення карбідного шару в тліючому розряді: температура процесу $T = 580^{\circ}\text{C}$, тривалість зміцнення $\tau = 240$ min, тиск у камері змінювався від 67 до 333 Pa, вміст пропану в насичувальному середовищі в об'ємній частці від 3 до 15% (надалі використовуватимемо скорочений запис складу газової суміші, наприклад, 15% C₃H₈). Газова суміш Ar + C₃H₈.

В результаті досліджень отримали залежності поверхневої мікротвердості карбідного шару на сталі 40Х від технологічних параметрів: тиску в розрядній камері та вмісту пропану (табл. 1; рис. 1).

Попередні дослідження впливу кількості пропану в середовищі і тиску в розрядній камері показали, що для сталі 40Х оптимальні вміст пропану від 8 до 12% та тиск в розрядній камері ~260 Pa, за яких поверхнева мікротвердість максимальна. Зі збільшенням вмісту пропану поверхня зразків покривається сажею, що ускладнює проникнення насичувальних газів у поверхню металу і утворення зміцненого шару.

Виконано три варіанти технологічного зміцнення: I – насичення вуглецем ($\tau = 120$ min, середовище 88% Ar + 12% C₃H₈) + насичення азотом ($\tau = 120$ min, середовище 25% Ar + 75% N₂); II – насичення азотом ($\tau = 120$ min, середовище 25% Ar + 75% N₂) + насичення вуглецем ($\tau = 120$ min, середовище 88% Ar + 12% C₃H₈); III – сумісне насичення поверхні азотом і вуглецем ($\tau = 240$ min, середовище 88% (Ar + N₂) + 12% C₃H₈).

Таблиця 1. Результати досліджень мікротвердості карбоазотованої сталі 40X

Номер режиму	Технологічні параметри режиму				Мікротвердість H_{100} , МПа	
	p , Па (мм рт. ст.)	% C_3H_8	I , А	U , В	до зміцнення	після зміцнення
1	333 (2,5)	9,0	6,8	315	2970	4700
2	266 (2,0)	9,0	6,7	380	3000	5500
3	200 (1,5)	9,0	5,6	410	2860	4750
4	133 (1,0)	9,0	4,6	550	2600	3800
5	67 (0,5)	9,0	3,6	970	2800	3600
6	266 (2,0)	15,0	6,6	360	2930	4100
7	266 (2,0)	12,0	6,5	400	2700	5150
8	266 (2,0)	9,0	6,7	380	2950	5500
9	266 (2,0)	6,0	6,1	450	3050	5000
10	266 (2,0)	3,0	6,3	420	2950	3600

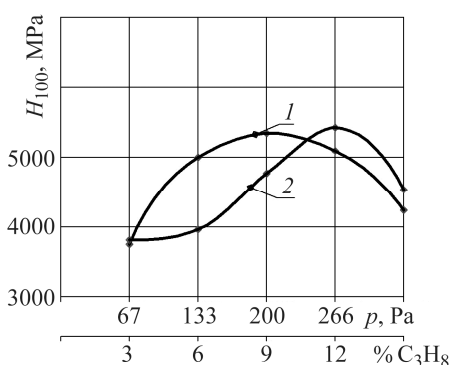


Рис. 1. Залежності мікротвердості карбідного шару від вмісту пропану (I) та тиску суміші в газорозрядній камері (2).

Fig. 1. Dependences of the microhardness of carbide layer on propane content (I) and pressure values of the mixture in a discharge chamber (2).

Температура процесу та тиск у розрядній камері у всіх трьох варіантах технологічного зміцнення були незмінними. Результати досліджень поверхневої мікротвердості, товщин зміцненого шару та карбонітридної зони зміцнених сталей наведені в табл. 2, а мікроструктура сталі для різних варіантів технологічного зміцнення – на рис. 2.

Таблиця 2. Характеристики карбоазотованого шару сталі 40X, зміцненої в тліючому розряді, залежно від технологічного процесу

Режим	Параметри режиму зміцнення	Мікротвердість H_{100} , МПа		Товщина зміцненого шару, μm	Товщина карбонітр. зони, μm
		до зміцнення	після зміцнення		
I	$\tau = 120 \text{ min}$, 88% Ar + 12% C_3H_8 $\tau = 120 \text{ min}$, 25% Ar + 75% N_2 $T = 580^\circ C$, $p = 266 \text{ Pa}$	2950	7350	40	25
II	$\tau = 120 \text{ min}$, 25% Ar + 75% N_2 $\tau = 120 \text{ min}$, 88% Ar + 12% C_3H_8 $T = 580^\circ C$, $p = 266 \text{ Pa}$	3050	7900	80	20

Як показали дослідження, режим технологічного зміцнення суттєво впливає на фізико-механічні характеристики зміцненого шару. У всіх трьох варіантах технологічного процесу зміцнений шар складається із поверхневої карбонітридної зони та дифузійної зони внутрішнього азотування, але властивості цих зон різні. Так, за зміцнення сталей за режимом I (табл. 2) товщина карбонітридної зони максимальна, а зона внутрішнього азотування має невелику товщину. Це пояснюється тим, що створений на поверхні сталі карбонітридний шар на першому етапі обробки виконує функцію екранування поверхні від проникнення в поверхневий шар металу йонів азоту (рис. 2а).

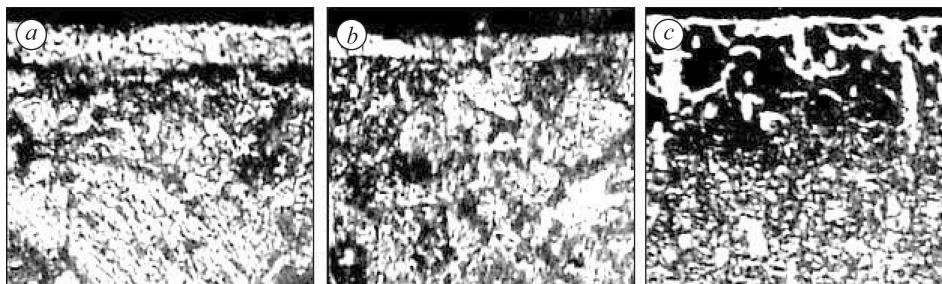


Рис. 2. Мікроструктура сталі 40Х, зміцненої в плазмі тліючого розряду, за різних варіантів технологічного процесу, $\times 500$: а – I варіант; б – II; с – III.

Fig. 2. Microstructure of 40X steel hardened in glow discharge plasma by different process variants, $\times 500$: a – variant I; b – II; c – III.

За зміцнення за режимом II (табл. 2), як карбонітридна зона, так і зона внутрішнього азотування мають найбільшу товщину (рис. 2b), але за такого зміцнення в дифузійній зоні утворюються карбонітридні включення у вигляді сітки, які суттєво знижують пластичність шару і за динамічних навантажень є центрами зародження мікротріщин [6].

Найоптимальнішим варіантом карбоазотування в тліючому розряді є одночасне насичення поверхні металу азотом і вуглецем (рис. 2c). При цьому на поверхні сталі утворюється композиційний шар, який складається зі зовнішньої карбонітридної зони і розвинутої дифузійної зони без виділення на межах зерен ϵ -фази, що підвищує опір абразивному і адгезійному зношуванню, а також корозійній втомі [7]. За одночасного насичення товщина карбонітридної зони і зони внутрішнього азотування, а відповідно і всього зміцненого шару менша, ніж за поетапного зміцнення, але шар має ліпші фізико-механічні властивості (поверхневу твердість, пластичність) та плавніше зниження твердості за товщиною [8]. Тому під час карбоазотування в тліючому розряді варіант одночасного насичення поверхні сталей азотом і вуглецем приймаємо як основний для подальших досліджень.

ВИСНОВКИ

Дослідження впливу вмісту пропану в середовищі і тиску в розрядній камері показали, що для сталі 40X оптимальні вміст пропану від 8 до 12% та тиск в розрядній камері ~ 260 Pa, за яких поверхнева мікротвердість максимальна. Найоптимальніший варіант карбоазотування в тліючому розряді – це одночасне насичення поверхні металу азотом і вуглецем.

РЕЗЮМЕ. Приведены результаты исследования влияния безводородного углеазотирования в тлеющем разряде на микротвердость упрочненного слоя стали 40X в зависимости от содержания пропана и давления газовой среды. Рассмотрены три варианта насыщения: углерод + азот, азот + углерод, совместное насыщение азотом и углеродом. Ана-

лиз полученных результатов показал наивысшую эффективность упрочнения поверхности стали 40X по третьему варианту насыщения.

Ключевые слова: *углеазотирование, микротвердость, структура.*

SUMMARY. The results of the study of the influence of anhydrous carbohydrogenation in a smoldering discharge on the microhardness of the hardened 40X steel layer, depending on the propane content and pressure of the gas environment are presented. Three variants of saturation are considered: carbon + nitrogen, nitrogen + carbon, combined saturation with nitrogen and carbon. The analysis of the obtained results shows the highest efficiency of hardening of the 40X steel surface by the third saturation variant.

Keywords: *carbonitrogenation, microhardness, structure.*

1. *Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шапошников В. Н.* Регулируемые процессы азотирования в тлеющем разряде // Прогрессивные методы химико-термической обработки. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
2. *Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 400 с.
3. *Лахтин Ю. М., Коган Я. Д.* Структура и прочность азотированных сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
4. *Stechyshyna N. M., Stechyshyn M. S., and Martyniuk A. V.* Fuel of the keeping needs of the energy discharge during nitrogen on the tribological characteristics of the design steel 45 // Problems of Tribology. – 2019. – **24**, № 4. – P. 6–12.
5. *Pye D.* Pulsed plasma ion carburizing in combination with high pressure gas quenching of medium alloy carburizing steels: review of metallurgical results // Int. Conf. of Carburizing and Nitriding with Atmosphere. – Cleveland, Ohio, 1995. – P. 97–101.
6. *Втомна міцність азотованих сталей у корозивно-активних середовищах харчових виробництв / М. С. Стечишин, М. Є. Скиба, Ю. Г. Сухенко, М. І. Цепенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2019. – **55**, № 1. – С. 125–129.
(*Fatigue strength of nitrided steels in corrosion-active media of the food enterprises / M. S. Stechyshyn, M. E. Skyba, Yu. G. Sukhenko, M. I. Tsepnyuk // Materials Science.* – 2019. – **55**, № 1. – P. 136–141.)
7. *Міцність і пластичність азотованих у тліючому розряді поверхневих шарів металів / М. С. Стечишин, Н. М. Стечишина, А. В. Мартинюк, М. М. Лук'янюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 1. – С. 59–63.
(*Strength and plasticity of the surface layers of metals nitrided in glow discharge / M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, A. V. Martyniuk, M. M. Luk'yanyuk // Materials Science.* – 2018. – **54**, № 1. – С. 55–60.)
8. *Залишкові напруження в азотованих у тліючому розряді шарах конструкційних сталей / М. С. Стечишин, М. Є. Скиба, М. М. Студент, В. П. Олександренко, М. В. Лук'янюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 3. – С. 96–100.
(*Residual stresses in layers of structural steels nitrided in glow discharge / M. S. Stechyshyn, M. E. Skyba, M. M. Student, V. P. Oleksandrenko, M. V. Luk'yanyuk // Materials Science.* – 2018. – **54**, № 3. – P. 395–399.)

Одержано 27.01.2020