

## ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В АЗОТОВАНИХ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ ШАРАХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

М. С. СТЕЧИШИН<sup>1</sup>, М. Є. СКИБА<sup>1</sup>, М. М. СТУДЕНТ<sup>2</sup>,  
В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО<sup>1</sup>, М. В. ЛУК'ЯНЮК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Хмельницький національний університет;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено вплив тривалості азотування, температури, складу газової суміші та її тиску на внутрішні залишкові напруження і характер їх розподілу по глибині дифузійного шару азотованих у тліючому розряді конструкційних сталей.

**Ключові слова:** азотування в тліючому розряді, залишкові напруження.

Азотування в тліючому розряді (АТР) – один із найпоширеніших способів поверхневого зміцнення поверхонь металів концентрованими джерелами енергії, який дає можливість регулювати насичення поверхні, отримувати модифікований шар заданих структури та фазового складу на основі азотистого  $\alpha$ -твердого розчину як із зовнішньою нітридною зоною, так і без неї, або ж нітридну зону – на основі лише  $\epsilon$ - або  $\gamma$ -фаз. Товщину та фазовий склад модифікованого шару визначають властивості азотованої сталі. Нітридна зона, що містить лише  $\gamma$ -фазу, достатньо пластична, а та, що складається з  $\epsilon$ -фази, менш пластична, але корозійно тривкіша. Однофазна поліпшує механічні властивості азотованої поверхні порівняно з двофазною ( $\epsilon + \gamma$ ), що володіє підвищеною крихкістю. Втім, за високої швидкості тертя (вище 3 m/s) двофазна зона запобігає адгезійній взаємодії деталей пари тертя. Найпластичніший шар без нітридної зони. Загалом, що вона тонша, то пластичніший азотований шар, але нижчий опір абразивному зношуванню, особливо в умовах сухого тертя.

Таким чином, товщину і фазовий склад модифікованого шару слід регулювати, ураховуючи конкретні умови експлуатації деталі. Зокрема, для деталей, що працюють у корозивному середовищі та в умовах зношування під малими контактними навантаженнями, необхідний азотований шар із розвинутою нітридною зоною, що забезпечує високий опір корозії і припрацювання поверхонь тертя.

Азотований шар без нітридної зони рекомендують для деталей, що функціонують в умовах зношування за високих питомих динамічних навантажень; за тертя без мащення корозійна тривкість та опір абразивному зношуванню будуть знижені.

Регулюють модифікацію поверхні під час АТР, змінюючи технологічні параметри азотування, які поділяють на дві групи – режимні (температура поверхні, тиск у розрядній камері, склад газової суміші, тривалість насичення) та енергетичні (густина струму і напруга на електродах розрядної камери). Вплив режимних на товщину, фазовий склад та властивості модифікованого шару проаналізовано раніше [1–4], але їх дію на залишкові напруження і характер їх розподілу досліджено недостатньо.

Відомо, що довговічність деталей за різних видів навантажень залежить і від взаємозв'язку розподілу залишкових напружень і зони їх дії, а також виду складного напруженого стану. Під час насичення азотом поверхневих шарів сталей внаслідок зміни їх хімічного складу, фазових і структурних характеристик [3, 5] утворюються поверхневі напруження, які суттєво впливають на роботоздатність деталей [6].

Нижче досліджено вплив технологічних параметрів АТР (температури, тиску, складу газового середовища і часу азотування) на залишкові напруження та характер їх розподілу по товщині азотованого дифузійного шару конструкційних сталей.

**Методи досліджень.** АТР виконували на установці УАТР [7]. Залишкові напруження визначали методом М. М. Давиденкова, вимірюючи глибину стріли прогину плоского зразка (пластина розміром  $70 \times 10 \times 2,5$  mm з  $R_z = 0,63$ ) під час стравлювання азотованого напруженого шару.

Зразок після механічної обробки і шліфування азотували і з трьох боків покривали розплавленою сумішшю парафіну і каніфолі у співвідношенні 2:1. Накопичувач індуктивного давача самопису БВ-662 опирався на корундову пластину, яка не травиться в розчинах азотної і плавикової кислот. Швидкість травлення 3...10  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Для азотованих зразків (незначні товщини складників покриву; див. рис. 1–3) приймали нижній діапазон швидкості.

Залишкові напруження розраховували за формулою [8]

$$\sigma = \frac{a^2 E}{3b^2} \frac{dx}{da}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності структурного складника дифузійного шару;  $a$ ,  $b$  – товщина і ширина зразка;  $dx/da$  – швидкість зміни його деформації. На ділянках інтенсивної зміни деформації, зокрема, в точках перегину кривої стріли прогину їх обчислювали, враховуючи модуль пружності матеріалу, що залишається після травлення частини покриву [9]:

$$E = E_0 \frac{\alpha + \beta}{2} + E_{\text{coat}} \left( 1 - \frac{\alpha + \beta}{2} \right); \quad \alpha = 1 - \left( \frac{2h_{\text{coat}}}{a - u} \right)^3; \quad \beta = \left[ 1 - \frac{2(h_{\text{coat}} - u)}{a - u} \right], \quad (2)$$

де  $E_0$  – модуль пружності матеріалу основи зразка;  $E_{\text{coat}}$  – модуль пружності покриву;  $h_{\text{coat}}$  – товщина структурного шару покриву;  $u$  – половина протравленого шару покриву.

З урахуванням виразу (1) отримали:

$$\sigma = \frac{a^2}{3b^2} \left[ E_0 \frac{\alpha + \beta}{2} + E_{\text{coat}} \left( 1 - \frac{\alpha + \beta}{2} \right) \right] \frac{dx}{da}. \quad (3)$$

Значення і характер розподілу напружень  $\sigma$  досліджували на азотованих конструкційних сталях 45; 40X і 38ХМЮА залежно від температури, часу, складу газової суміші і її тиску. Товщину дифузійного шару азотованих зразків знаходили за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-10 після їх травлення в 3%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

**Результати та їх обговорення.** Під час АТР у поверхневому шарі формуються залишкові напруження стиску. Змінюючи режимні та енергетичні характеристики азотування, можна досягати бажаних для даного режиму експлуатації їх епюр.

Виявили (рис. 1), що зі збільшенням часу АТР вони ростуть і після 4 h стабілізуються залежно від ступеня легування та вмісту вуглецю в матриці. З тривалі-

стю азотування максимальне значення залишкових напружень не підвищується, а тільки збільшується глибина зони їх дії. Зафіксували плавніше їх зниження по товщині дифузійного шару.

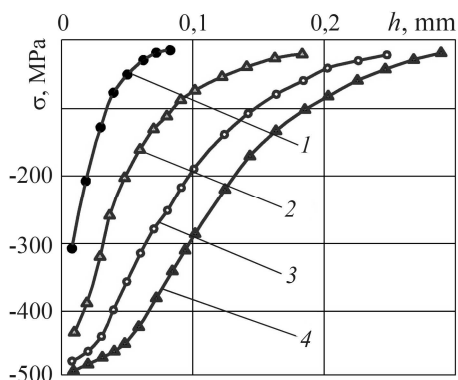


Рис. 1. Зміна залишкових напружень по товщині дифузійного шару сталі 40X залежно від часу АТД:  
1 – 1 h; 2 – 2,5; 3 – 4 і 4 – 6 h.

Fig. 1. Dependence of the change of residual stresses on the thickness of the diffusion layer of 40X steel on time of nitrided glow discharge (NGD):  
1 – 1 h; 2 – 2.5; 3 – 4 and 4 – 6 h.

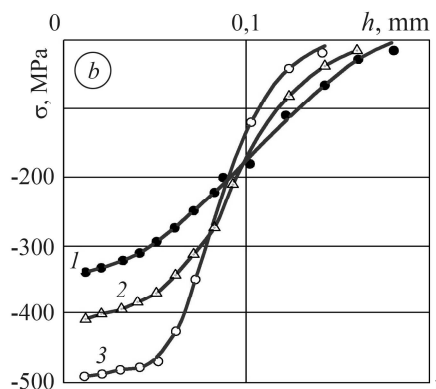
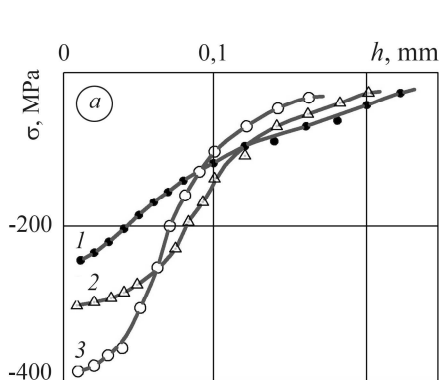


Рис. 2. Зміна залишкових напружень по товщині дифузійного шару сталей 40X (a) і 38XMЮА (b) залежно від температури азотування (100% азоту, 265 Pa): 1 – 873 К; 2 – 833; 3 – 793.

Fig. 2. Change of residual stresses in the thickness of the diffusion layer of 40X (a) and 38XMЮА (b) steels depending on the temperature of nitriding (100% nitrogen, 265 Pa):  
1 – 873 K; 2 – 833; 3 – 793.

Очевидно, що однією з найважливіших причин формування залишкових напружень стиску є більший питомий об'єм нітридних фаз заліза проти заліза, який розміщується в порядку зростання:  $Fe \rightarrow \gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \xi$ . Нітриди легувальних елементів здебільшого мають більший питомий об'єм, аніж нітриди заліза [10]. Таким чином, максимальні залишкові напруження повинні формуватися на поверхні азотованого шару. Насправді ж їх максимум знаходиться на віддалі 10...15  $\mu m$  від неї (рис. 1), тобто  $\xi$ -фаза утворюється внаслідок фазової перекристалізації під час охолодження в тих ділянках  $\epsilon$ -фази, де концентрація азоту 11...11,35 mass% [3]. Виявили, що  $\xi$ - і  $\epsilon$ -фази містять велику кількість пор з окисненими стінками. Це пов'язано з метастабільністю нітридних фаз, азот з яких намагається вивільнитися у молекулярному вигляді. Тому дислокації, межі зерен і пустоти об'ємів заповнює газ, який знаходиться під високим тиском в атомарному або молекулярному виді. Імовірно, під його тиском дислокації перетворюються в пори, що виявляє металографічний аналіз. Стінки пор окиснюються під час охолодження деталей, оскільки об'єми  $\epsilon$ -фази з'єднані з поверхнею каналами, через які прони-

кає повітря. Під час зародження і розвитку пористості залишкові напруження релаксують і зсуваються в глибину дифузійного шару. З підвищенням температури АТР розширюється зона їх дії з одночасним зниженням значень.

Суттєво на них впливає склад газової суміші під час азотування. Зі збільшенням в ній вмісту аргону насичення інтенсифікується і залишкові напруження зростають. При цьому максимальні їх значення зафіксували за азотування в суміші 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar, що пояснюють характером зміни параметрів кристалічної ґратки [5]. Отримані за результатами рентгеноструктурного аналізу залежності параметрів кристалічної ґратки  $a$  і  $c$  від вмісту азоту свідчать, що зі збільшенням його концентрації в газовій суміші параметр  $a$  зростає з одночасним зменшенням параметра  $c$ , і за його вмісту 75% швидкість їх зміни змінюється обернено пропорційно, що вказує на суттєвіше спотворення кристалічних ґраток фазових складників дифузійно азотованого шару, а отже, на підвищення залишкових напружень.

Аналогічну залежність отримали, вивчаючи вплив тиску газової атмосфери на розподіл залишкових напружень у дифузійному шарі. Незважаючи на те, що за великої концентрації азоту в газовій суміші товщина нітридної зони більша [5], з ростом крихкості таких шарів залишкові напруження зменшуються, тому максимальне значення відповідає тиску газової суміші 265 Pa (рис. 3b).

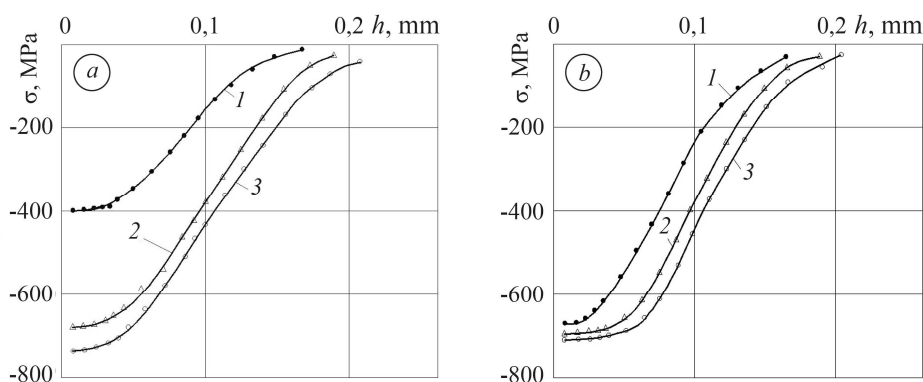


Рис. 3. Зміна залишкових напружень по товщині дифузійного шару сталі 38XMЮА залежно від складу газової суміші (а) ( $T = 833$  К і  $p = 265$  Pa): 1 – 100% N<sub>2</sub>; 2 – 45 N<sub>2</sub> + 55 Ar; 3 – 75 N<sub>2</sub> + 25 Ar і тиску суміші (б) ( $T = 833$  К і 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar): 1 – 450 Pa; 2 – 80; 3 – 265.

Fig. 3. Change of residual stresses on the thickness of the diffusion layer of 38XMЮA steel depending on the composition of the gas mixture (a) ( $T = 833$  K and  $p = 265$  Pa): 1 – 100% N<sub>2</sub>; 2 – 45 N<sub>2</sub> + 55 Ar; 3 – 75 N<sub>2</sub> + 25 Ar and the mixture pressure (b) ( $T = 833$  K and 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar): 1 – 450 Pa; 2 – 80; 3 – 265.

Методом активного планування експерименту отримали математичні моделі формування залишкових напружень в азотованому шарі (для сталі 40X):

$$y = 418,1 - 28,6x_1 + 6,1x_2 + 2,1x_3, \quad (4)$$

де  $x_1$  – температура;  $x_2$  – вміст азоту;  $x_3$  – тиск газової суміші.

Виявили, що на них найбільше впливає температура азотування: із її підвищенням вони зменшуються. Зі збільшенням вмісту азоту в газовій суміші та її тиску максимум залишкових напружень дещо зростає, але одночасно зменшується зона їх дії (рис. 3). При цьому максимальні значення отримали під час азотування в газовій суміші 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar за її тиску 265 Pa.

## ВИСНОВКИ

Одержано експериментальні залежності зміни залишкових напружень стиску конструкційних сталей після АТР від часу і температури азотування, складу газової суміші та її тиску. Встановлено, що найсуттєвіше на них впливає температура азотування: з її ростом вони спадають, але зменшується зона їх дії. Побудовано залежності зміни залишкових напружень стиску від температури, вмісту азоту і тиску газової суміші. Максимальні їх значення під час азотування зафіксовано в газовій суміші 75% N<sub>2</sub> + 25% Ar за тиску 265 Ра.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано влияние времени азотирования, температуры, состава газовой смеси и ее давления на внутренние остаточные напряжения и характер их распределения по глубине диффузионного слоя конструкционных сталей, азотированных в тлеющем разряде.

*SUMMARY.* The influence of the nitration time, temperature, composition of the gas mixture and its pressure on the distribution pattern and the magnitude of internal residual stresses over the depth of the diffusion layer of structural steels nitrated in the glow discharge is studied.

1. *Теория и технология азотирования* / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. И. Шпис, З. Бемер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 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, 1993. – 400 с.
3. *Лахтин Ю. М., Коган Я. Д.* Структура и прочность азотированных сплавов. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
4. *Каплун В. Г., Каплун П. В.* Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницкий: ХНУ, 2015. – 316 с.
5. *Вплив іонного азотування сталей в тліючому розряді на структуру і властивості покривів* / М. С. Стечишин, А. В. Мартинюк, Ю. М. Білик, В. П. Олександренко, Н. М. Стечишина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 3. – С. 49–55.  
(*Influence of the ionic nitriding of steels in glow discharge on the structure and properties of the coatings* / M. S. Stechyshyn, A. V. Martynyuk, Yu. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, N. M. Stechyshyna // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 3. – P. 343–350.)
6. *Стечишин М. С.* Довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Хмельницький, 1998. – 32 с.
7. *Стечишин М. С., Стечишина Н. М., Курської В. С.* Корозійні та електрохімічні характеристики у кислих модельних середовищах шарів металів, азотованих у тліючому розряді // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 5. – С. 129–135.
8. *Такео Екобори.* Научные основы прочности и разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1978. – 352 с.
9. *Поляков Б. З., Бабушкин В.В.* Остаточные напряжения в борированной стали // Тр. Всесоюз. конф. “Химико-термическая обработка металлов и сплавов”. – Минск, 1971. – С. 121–125.
10. *Самсонов Г. В.* Нитриды. – К.: Наук. думка, 1968. – 380 с.

Одержано 12.03.2018