

УДК 621.785.53

В.Г. КАПЛУН, П.В. КАПЛУН, К.А. ПАРШЕНКО

Хмельницький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТА ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ СТАЛІ Х12 ПІСЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ В БЕЗВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

*Наведені результати експериментальних досліджень фізико-механічних характеристик та залишкових напружень в поверхневих шарах сталі Х12 після азотування в тліючому розряді в безводневих насичуючих середовищах та їх залежності від технологічних параметрів процесу дифузійного насичення.*

*Here there are the experiments research results of physics-mechanical characteristics and residual tensions in surface layers of steel X12 after nitrogenation in mouldering discharge in hydrogen free saturating mediums and their dependence from diffusion saturation technological process parameters.*

Ключові слова: напруження в поверхневих шарах сталі Х12, азотування.

Підвищення фізико-механічних характеристик поверхневих шарів конструктивних елементів є актуальним для багатьох деталей машин, що працюють на втому та зношування з метою збільшення їх зносостійкості і довговічності.

Азотування в тліючому розряді є однією з високоефективних енергозберігаючих технологій, що забезпечує зміну фізико-механічних характеристик поверхні матеріалів в широких межах [1]. Застосування безводневих насичуючих середовищ (суміші азоту з аргоном) при азотуванні в тліючому розряді виключає водневе окрихчення металів і сприяє підвищенню їх експлуатаційних характеристик [2].

Сталь Х12 знаходить широке застосування в штамповому виробництві і забезпечення її високої міцності і зносостійкості має велике економічне значення. Відомо [3, 4], що після азотування в тліючому розряді в поверхневому шарі виникають залишкові напруження стиску, які мають позитивний вплив на втомну міцність конструктивних елементів [5]. Тому дослідження величини і характеру розподілу залишкових напружень після азотування сталі Х12 в тліючому розряді в безводневих середовищах має як науковий, так і практичний інтерес.

Нами проведені експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик (твердості і товщини) поверхневого шару та залишкових напружень в сталі Х12 при азотуванні в тліючому розряді залежно від параметрів технологічного процесу (температури дифузійного насичення  $t$ , тиску в вакуумній камері  $P$ , часу дифузійного насичення і складу насичуючого середовища – вмісту аргону в суміші азоту з аргоном в об'ємних відсотках  $Ar\%$ ), які змінювались в широких межах:  $t$  від 500 до 600 °С,  $P$  від 80 до 600 Па, від 20 до 240 хв.,  $Ar\%$  в азотно-аргоновій суміші від 0 до 76 %.

З метою зменшення кількості експериментів і одержання математичних залежностей товщини азотованого шару і мікротвердості поверхні від технологічних параметрів азотування застосовано метод планування експериментів з використанням 4-х факторного плану другого порядку (план Хартлі) [6]. Математичний опис досліджуваних характеристик одержували у вигляді повного квадратичного поліному:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де  $\varphi(x)$  – функція відклику (вихідна змінна);  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  – коефіцієнти рівняння регресії;  $x_i, x_j$  – незалежні змінні величини (фактори).

Для азотування у плазмі тліючого розряду такими незалежними змінними величинами є температура, тиск, тривалість дифузійного насичення та склад насичувального середовища. Обробку результатів експериментів було проведено з застосуванням методів математичної статистики.

Математичні залежності товщини і мікротвердості поверхні азотованих шарів сталі Х12 описуються регресивними рівняннями другого порядку (2) і (3):

$$h_n \text{ (мкм)} = 102 + 31,25 x_1 - 10 x_2 + 42,5 x_3 - 67,5 x_4 - 2,625 x_1^2 - 12,625 x_2^2 - 0,125 x_3^2 + 9,875 x_4^2 + 5 x_1 x_2 + 15 x_1 x_3 + 5 x_1 x_4 + 120 x_2 x_3 - 55 x_2 x_4 - 65 x_3 x_4. \quad (2)$$

$$H_{100} \text{ (МПа)} = 7468 + 940 x_1 + 585 x_2 - 265 x_3 - 165 x_4 - 1321 x_1^2 - 1261 x_2^2 - 321,28 x_3^2 - 1431 x_4^2 + 100 x_1 x_2 + 30 x_1 x_3 - 60 x_1 x_4 + 1080 x_2 x_3 + 1770 x_2 x_4 - 1780 x_3 x_4. \quad (3)$$

На рис. 1 і 2 показані графіки залежності товщини та мікротвердості азотованого шару сталі Х12 від технологічних параметрів процесу іонного азотування, що отримані на основі експериментальних даних та математичних залежностей 2 і 3. З графіків видно, що всі технологічні параметри мають значний вплив на товщину та мікротвердість азотованого шару, але характер їх впливу різний. Товщина азотованого шару

збільшується з підвищенням температури і тиску у вакуумній камері (рис. 1, а) та має максимальне значення при оптимальному вмісті аргону у насичуючій суміші (рис. 1, б). Товщина азотованого шару збільшується зі збільшенням часу дифузійного насичення за параболічним законом [1, 2].

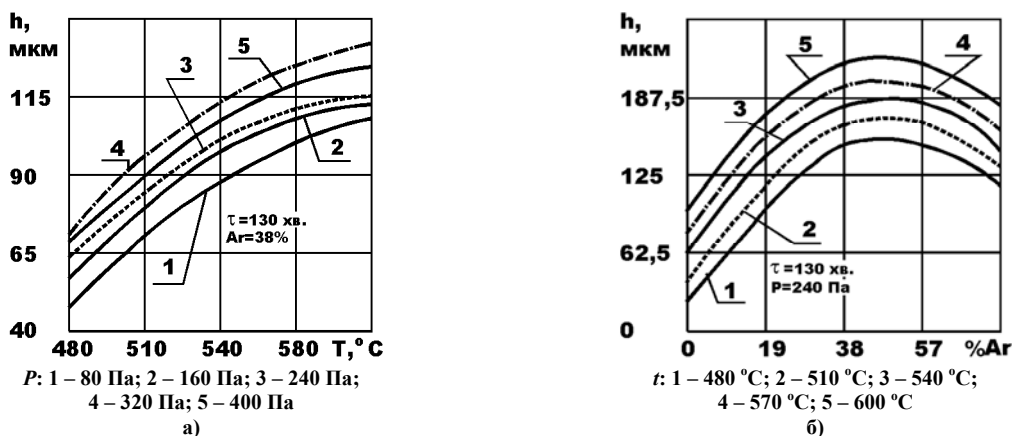


Рис. 1. Залежність товщини азотованого шару сталі X12 від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневому азотно-аргонному середовищі

Проведені експериментальні дослідження показали, що найбільший вплив на мікротвердість мають температура, тиск в вакуумній камері та склад насичуючого середовища. Для сталі X12 є оптимальні значення цих параметрів ( $t = 570\text{ °C}$ ,  $P = 320\text{ Па}$ ,  $38\% \text{ Ar} + 62\% \text{ N}_2$ ), при яких досягається максимальна твердість (рис. 2).

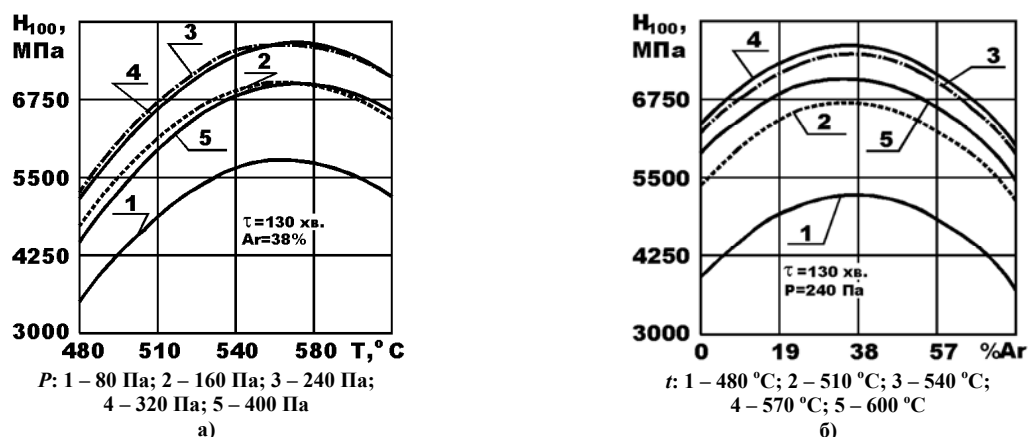


Рис. 2. Залежність мікротвердості азотованого шару сталі X12 від технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневому азотно-аргонному середовищі

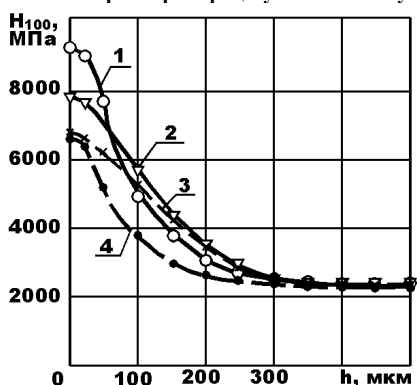


Рис. 3. Зміна мікротвердості по глибині азотованого шару сталі X12 після іонного азотування за режимами:

- 1 – середовище 75 % N<sub>2</sub> + 25 % Ar,  $t = 570\text{ °C}$ ,  $P = 320\text{ Па}$ ,  $\tau = 240\text{ хв.}$ ;
- 2 – середовище 75 % N<sub>2</sub> + 25 % Ar,  $t = 540\text{ °C}$ ,  $P = 320\text{ Па}$ ,  $\tau = 240\text{ хв.}$ ;
- 3 – середовище 75 % N<sub>2</sub> + 25 % Ar,  $t = 570\text{ °C}$ ,  $P = 80\text{ Па}$ ,  $\tau = 240\text{ хв.}$ ;
- 4 – середовище 75 % N<sub>2</sub> + 25 % Ar,  $t = 480\text{ °C}$ ,  $P = 240\text{ Па}$ ,  $\tau = 240\text{ хв.}$

Режими іонного азотування мають великий вплив на характер розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару, що наочно демонструють рис. 3 і 4. Режим азотування 1 (рис. 3) забезпечує високу твердість поверхні завдяки утворенню на ній нітридного шару і великий градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару. При азотуванні за режимом 3 мікротвердість поверхні менша порівняно з режимом 1 через відсутність суцільного нітридного шару. При цьому градієнт зміни твердості по глибині азотованого шару теж є меншим.

На рис. 4 показано вплив температури і тиску в вакуумній камері на величину і розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару сталі X12. З рис. 4, а видно, що температура азотування суттєво впливає на величину мікротвердості на поверхні азотованого шару та на його товщину. Так, наприклад, при однакових значеннях інших параметрів технологічного режиму, підвищення температури дифузійного насичення з 480 °C до 560 °C збільшує мікротвердість поверхні з 5800 МПа до 9700 МПа, а товщину

азотованого шару – в 1,7 рази (з 150 мкм до 260 мкм). Слід зазначити, що є оптимальний інтервал температур 560-570 °С, у якому досягається максимальна твердість для певної марки сталі.

Перевищення цих температур призводить до зниження мікротвердості поверхневого шару. З рис. 4б видно, що для сталі X12 максимальна мікротвердість досягається при тиску в вакуумній камері від 320 до 400 Па і при зазначеному режимі азотування одержуємо максимальний градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару.

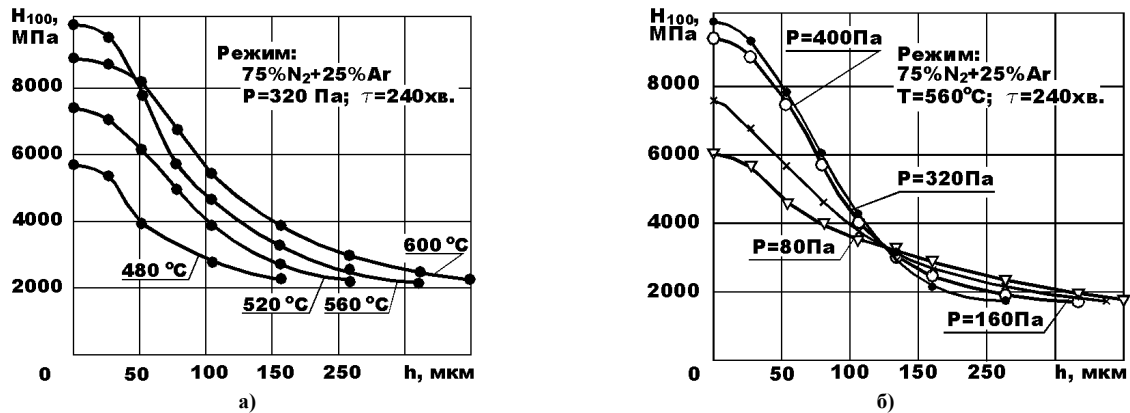


Рис. 4. Зміна мікротвердості по глибині азотованого шару сталі X12 залежно від:  
а) – температури азотування; б) – тиску у вакуумній камері

При тиску в вакуумній камері 80 Па на поверхні не утворюється суцільної нітридної зони у зв'язку з переважаючим процесом зворотного катодного розпилення, і азотований шар має найменшу твердість та мінімальний градієнт зміни мікротвердості по глибині.

Зміна тиску в вакуумній камері суттєво впливає на фазовий склад поверхні азотованого шару. Зменшення тиску з 400 Па до 80 Па викликає різке зменшення кількості нітридних фаз і збільшення  $\alpha$ -Fe [N]-фази з 11 відсотків до 50 відсотків (майже в п'ять разів). Як наслідок, зменшується твердість та підвищується пластичність азотованого шару.

Пошаровий хімічний аналіз сталі X12 (табл. 1) показав, що концентрація азоту в азотованому шарі залежить від технологічних параметрів іонного азотування. З табл. 1 видно, що концентрація азоту на поверхні сталі X12 складає 7,18 відсотків, тобто з підвищенням ступеня легованості сталі концентрація азоту в азотованому шарі збільшується у зв'язку з більшою розчинністю азоту у фериті.

Величина залишкових напружень і їх розподіл по глибині азотованого шару визначались за методом Н.Н.Давиденкова [7] шляхом безперервного зменшення товщини азотованого шару методом травлення з автоматичним записом кривої деформування плоского зразка на приладі ПЮН.

Таблиця 1

**Результати пошарового аналізу вмісту азоту в азотованому шарі сталі X12 після іонного азотування за режимом 75 % N<sub>2</sub> + 25 % Ar, t = 570 °С, P = 240 Па, τ = 240 хв**

№ шару	Товщина послідовно вилученого шару, мкм	Вміст азоту в шарі % по масі	Сумарна величина вилученого шару, мкм	Фази на поверхні
1	10	7,18	0	$\gamma + \alpha$ -Fe [N]
2	15	3,7	10	$\gamma + \alpha$ -Fe [N]
3	20	2,7	25	$\gamma + \alpha$ -Fe [N]
4	30	1,38	45	$\gamma + \alpha$ -Fe [N]
5	30	0,25	75	$\alpha$ -Fe [N]
6	35	0,86	105	$\alpha$ -Fe [N]
7	60	0,44	165	$\alpha$ -Fe [N]
8	60	0,07	225	$\alpha$ -Fe [N]
9	60	0,005	285	$\alpha$ -Fe [N]
10	–	0,003	345	$\alpha$ -Fe [N]

На рис. 5 наведені залежності залишкових напружень в сталі X12 після азотування в тліючому розряді за різними режимами. З рисунка видно, максимальні залишкові напруження стиску виникають на поверхні і їх величина поступово зменшується по глибині азотованого шару та переходить в напруження розтягу в основі матеріалу. Величина максимальних залишкових напружень досягає 600 МПа і залежить від режиму азотування. Тобто, величиною залишкових напружень можна керувати, змінюючи параметри технологічного процесу (температуру азотування, тиск в вакуумній камері, склад середовища і час дифузійного насичення).

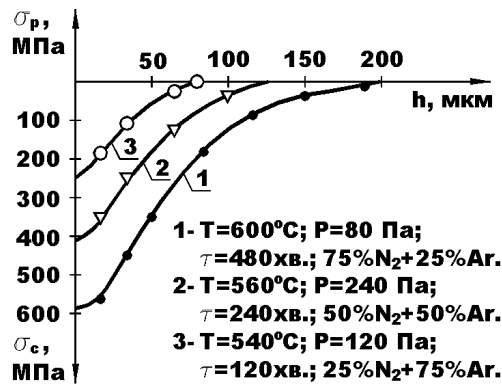


Рис. 5. Залишкові напруження в сталі X12 після азотування за різними режимами

Таким чином, дослідженнями встановлено, що азотуванням в тліючому розряді в безводневих середовищах можна змінювати товщину, мікротвердість і залишкові напруження в азотованому шарі в широких межах і отримувати їх максимальні значення за допомогою зміни технологічних параметрів процесу азотування.

### Література

1. Каплун В.Г., Прогрессивные технологии упрочнения конструктивных элементов / В.Г.Каплун, П.В.Каплун // в кн. «Современные технологии в машиностроении». – Харьков: НТУХПИ, 2007. – С.308-402.
2. Каплун В.Г. Особенности формирования диффузионного слоя при ионном азотировании в безводородных средах / В.Г. Каплун // Физическая инженерия поверхности. – № 2. – Т.1. – Харьков. – 2003. – С. 141-146.
3. Каплун В.Г. Исследования остаточных напряжений в азотированной стали 38ХМЮА / В.Г.Каплун, А.Е. Рудык, Н.А. Сологуб, В.Г. Маслова // Электронная обработка металлов. – № 5. – 1986. – С. 35-37.
4. Каплун В.Г. Исследования остаточных напряжений в стали 45 после ионного азотирования / В.Г.Каплун, А.Е. Рудык // Лазерная, термическая и химико-термическая обработка в машиностроении. Сб. науч. труд. МАДИ. – М. – 1987. – С. 97-101.
5. Каплун В.Г. Влияние ионного азотирования на сопротивление усталости стали 20 при изгибе / В.Г.Каплун, А.В. Капинос, Ю.И. Бабей // Физико-химическая механика материалов. – № 5. – 1988. – С. 108-109.
6. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск: изд. БГУ. – 1982. – 302 с.
7. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений / Н.Н. Давиденков // Заводская лаборатория. – № 8. – 1937. – С. 987-990.

Надійшла 20.9.2009 р.

UDC 621

RENATA DWORNICKA

Cracow University of Technology, Institute of Computing Science, dwornick@mech.pk.edu.pl

## PN-EN 12952-3 BASED CALCULATIONS OF ALLOWABLE HEATING AND COOLING RATES FOR T-PIPE MADE FROM STEEL 13HMF

### 1. Introduction

В статті представлено методику визначення максимальних допустимих швидкостей нагрівання і охолодження, розроблену на основі європейського стандарту PN-EN 12952-3. Об'єктом досліджень є трійник, виконаний із сталі 13 HMF. У праці приведено геометричний опис трійника, властивості матеріалів, а також характеристику робочих умов. Представлені також отримані значення максимальних допустимих швидкостей нагрівання і охолодження.

Calculation based on PN-EN 12952-3 code will be done for determination of the maximum heating or cooling rate of temperature changes. Calculated results are of great practical significance because it will be possible to use them in power plants. Temperature step change can be easily implemented by suddenly opening hot water or steam supply into the interior of a pressure element, which has a lower initial temperature. A quasi-steady state is not assumed and element geometry can be complicated.

Ключові слова: нагрівання та охолодження в металах, європейський стандарт PN-EN 12952-3.