

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА ВЕЛИЧИНУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В СТАЛІ 45Х

Проведено аналіз впливу залишкових напружень на міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних при наявності покриттів. Наведені результати експериментальних досліджень залишкових напружень в дифузійних шарах після іонного азотування сталі 45Х в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. На основі планування експериментів одержані аналітичні і графічні залежності величини залишкових напружень від зміни технологічних параметрів процесу іонного азотування, встановлена залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару від його твердості. Зроблені висновки.

Ключові слова: іонне азотування, залишкові напруження, технологічні параметри, твердість

P.V. KAPLUN, V.A. GONCHAR

Khmelnytsky National University

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ION NITRIDING ON THE VALUE OF RESIDUAL STRESSES IN 45H STEEL

The analysis of influence of residual stresses on the strength and performance of construction parts having been coated. The experimental results of residual stresses in the diffusion layers after ion nitriding of 45H steel in hydrogen-free environments in different technological modes. Based on the planning experiments we have arrived at the results on analytical and graphical dependence of residual stress of changing technological parameters of ion nitriding. We specified the relation of residual stresses on the surface of the nitrided layer to its hardness. Conclusions.

Keywords: ion nitriding, residual stresses, technological parameters, hardness/

Вступ

Одним із перспективних напрямів підвищення зносостійкості, надійності і довговічності конструкційних елементів є зміцнення поверхні з застосуванням функціональних покриттів. При нанесенні покриттів в поверхневих шарах виникають залишкові напруження, що впливають на напружено-деформований стан, міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [1–6]. Залишкові напруження можуть досягати великих значень і мати різні знаки (стиску або розтягу) в залежності від технології та властивостей нанесених покриттів [1, 2, 5, 6]. Вплив залишкових напружень на експлуатаційні властивості конструкційних елементів може бути позитивним або негативним, відповідно підвищуючи або знижуючи їх значення, в залежності від величини та знаку [1–3, 5, 6]. Тому необхідність поглиблення уявлень про природу залишкових напружень в покриттях, а також визначення їх величини, характеру, розподілу по товщині та можливостей керування їх рівнем з метою покращення експлуатаційних характеристик конструкційних елементів в системі "основа-покриття" за рахунок удосконалення технології нанесення покриттів та створення відповідної конструкції поверхневого шару є очевидною.

Дослідженнями [1, 2, 4] показано, що в дифузійних покриттях виникають залишкові напруження стиску, які позитивно впливають на міцність і довговічність конструкційних елементів в процесі розтягу, багаточисловий втомі при згині та контактній витривалості в процесі циклічного навантаження. Залишкові напруження не рівномірно розподіляються по товщині покриття, а їх величина та характер розподілу залежать і керуються технологічними параметрами процесу дифузійного насичення.

Мета досліджень

Метою досліджень є визначення впливу технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталі 45Х на величину залишкових напружень, що виникають в азотованих шарах.

Методика досліджень

Для досягнення поставленої мети проводилися експериментальні дослідження величини залишкових напружень в тонких пластинках із сталі 45Х розміром 200Ч15Ч1 мм після їх іонного азотування в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. Технологічні параметри процесу азотування змінювалися в широких межах (температура азотування $T = 480 - 600$ °С; тиск в вакуумній камері $P = 80 - 400$ Па; час дифузійного насичення $\tau = 20 - 240$ хв; вміст аргону в суміші з азотом $Ar = 0 - 76\%$). Азотування поверхні зразків проводилося з однієї сторони після чого вимірювалися: прогин f зразків з точністю до 0,01 мм з використанням спеціального пристрою; товщину азотованого шару методом металографії; твердість поверхні азотованого шару з допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Виходячи з величини вимірюваного прогину пластини, використовуючи рівняння пружної лінії для балки, середні значення залишкових напружень σ_c визначалися за залежністю [8]:

$$s_c = \frac{32E_o h_o^3 f}{3a^2 h_n (1 - n_o)(2h_o + h_n)}, \quad (1)$$

де h_o, h_n – товщини основи і покриття;
 E_o, ν_o – модуль пружності основи першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи;
 f – прогин зразка;
 a – довжина зразка.

Величину залишкових напружень в будь-якій точці по товщині азотованого шару знаходили за формулою [9]:

$$\sigma_n = \sigma_c \cdot e^{-\frac{k(z-0.45h_n)}{(h_n-z)^{0.94}}}, \quad (2)$$

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень в покритті;
 h_n – товщина покриття;
 k – коефіцієнт, що враховує вплив температури (Т°К) нанесення дифузійного покриття. Наприклад, при іонному азотуванні $k = 900/ \text{T}^\circ\text{K}$, який знаходиться з експерименту.

Для скорочення кількості експериментів при дослідженні впливу зазначених вище технологічних параметрів на фізико-механічні властивості та залишкові напруження в азотованому шарі було застосовано метод планування експериментів – 4-факторний план другого порядку Хартлі [7], відповідно до якого азотування проводилося за 20 режимами (табл. 1). Для скорочення кількості експериментів при дослідженні впливу зазначених вище технологічних параметрів на фізико-механічні властивості та залишкові напруження в азотованому шарі було застосовано метод планування експериментів – 4-факторний план другого порядку Хартлі [7], відповідно до якого азотування проводилося за 20 режимами (табл. 1). При цьому математична залежність залишкових напружень від технологічних параметрів процесу азотування описується рівнянням регресії, яке має вид:

$$j(x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 + \\ + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4, \quad (3)$$

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).

Результати досліджень

В таблиці 1 наведені результати експериментальних досліджень властивостей (товщини і твердості поверхні) азотованого шару та величини прогину зразків після іонного азотування в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. За формулами (1) і (2) розраховані середні значення залишкових напружень σ_c в азотованих шарах та їх максимальне значення σ_n , що виникають на поверхні, в залежності від режимів азотування.

Таблиця 1

Вплив технологічних режимів іонного азотування на товщину h_n і мікротвердість H_{100} азотованого шару та залишкові напруження на поверхні σ_n і середні σ_c в сталі 45X

№ режиму азотування	Значення факторів режиму азотування				h_n , мкм	H_{100} , МПа	Прогин f , мм	σ_c , МПа	σ_n , МПа
	T , °C	P , Па	τ , хв.	об. % Ar,					
1	570	320	185	57	317	7248	5.01	228	450
2	510	320	185	57	230	6828	3.34	200	410
3	570	160	185	19	306	8110	5.58	274	540
4	510	160	185	19	218	6450	1.97	185	375
5	570	320	75	19	248	8105	3.92	292	540
6	510	320	75	19	162	7970	1.74	262	527
7	570	160	75	57	216	8660	4.16	305	596
8	510	160	75	57	171	7115	1.59	220	440
9	480	240	130	38	158	6680	1.28	200	398
10	600	240	130	38	312	8060	5.90	278	536
11	540	80	130	38	188	7440	1.99	238	474
12	540	400	130	38	280	7190	3.79	224	450
13	540	240	20	38	120	7249	1.01	233	467
14	540	240	240	38	300	6891	4.04	208	423
15	540	240	130	0	277	7374	3.85	232	467
16	540	240	130	76	233	7902	3.11	260	520
17	540	240	130	38	276	8780	4.92	299	608
18	540	240	130	38	274	8670	4.82	293	597
19	540	240	130	38	278	8800	5.01	299	608
20	540	240	130	38	275	8790	5.03	294	602

З таблиці 1 видно, що технологічні параметри процесу азотування мають великий вплив на властивості та залишкові напруження в азотованих шарах, які змінюються в широких межах. Зокрема середнє значення залишкових напружень σ_c знаходиться в межах 185–305 МПа, а максимальні залишкові напруження на поверхні σ_n – в межах 375–608 МПа при даних режимах азотування. При цьому вони залежать від твердості та товщини азотованого шару. На основі експериментальних даних одержана математична залежність σ_n від технологічних параметрів процесу азотування в вигляді рівняння регресії другого порядку:

$$\sigma_n(\text{МПа}) = 600 + 110 x_1 - 92 x_2 - 63 x_3 - 36 x_4 - 120 x_1^2 - 52 x_2^2 - 114 x_3^2 - 130 x_4^2 - 81 x_1 x_2 + 5 x_1 x_3 - 44 x_1 x_4 - 29 x_2 x_3 - 15 x_2 x_4 - 77 x_3 x_4, \quad (4)$$

де $x_1 = \frac{(T-540)}{60}$; $x_2 = \frac{(P-240)}{160}$; $x_3 = \frac{(t-130)}{110}$; $x_4 = \frac{(Ar-38)}{38}$.

На рис. 1 і 2 наведені графіки залежності σ_n від технологічних параметрів процесу іонного азотування, що побудовані на основі рівняння (4), з яких видно, що ці залежності мають екстремальний характер і існують певні значення кожного з технологічних параметрів (температури, тиску, часу дифузійного насичення і вмісту аргону в насичуючому середовищі), при яких залишкові напруження досягають екстремального значення. При цьому існує технологічний режим азотування, що забезпечує максимальне значення залишкових напружень. Для сталі 45X таким технологічним режимом є: $T = 565^\circ\text{C}$; $P = 80$ Па; $\tau = 120$ хв; 65 об.% $\text{N}_2 + 35$ об.% Ar , що забезпечує $\sigma_n = 718$ МПа.

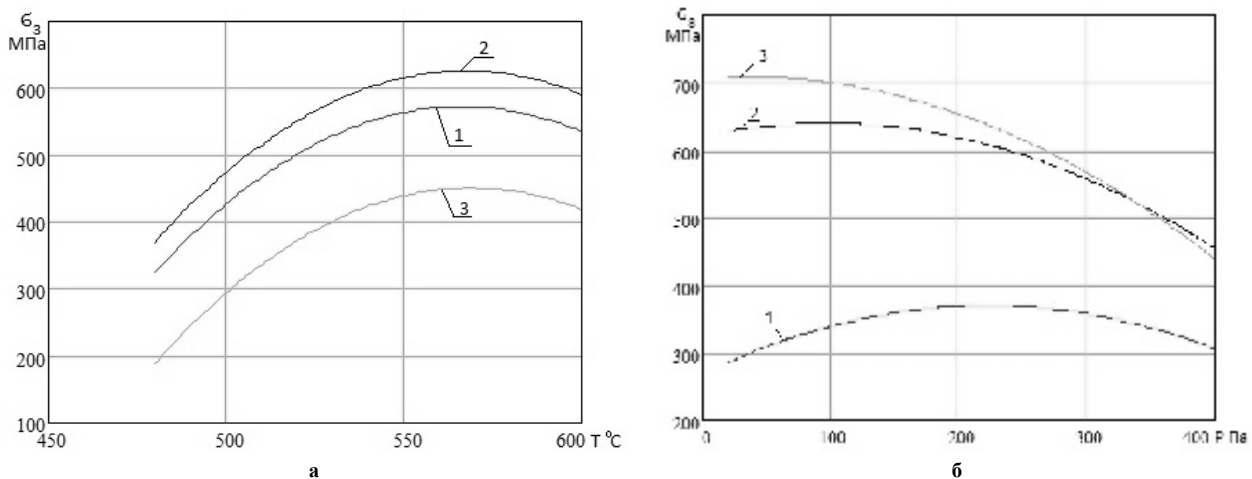


Рис. 1. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 45X від температури іонного азотування і тиску в вакуумній камері:

а) $\sigma_3 = f(T^\circ\text{C})$ при $P = 240$ Па, суміші 62 об.% $\text{N}_2 + 38$ об. % Ar , часі насичення τ : 1 – 20 хв, 2 – 130 хв, 3 – 240 хв.

б) $\sigma_3 = f(P)$ при часі дифузійного насичення $\tau = 130$ хв, в суміші 62 об.% $\text{N}_2 + 38$ об. % Ar та при різних температурах азотування: 1 – 480 C, 2 – 540 C, 3 – 570 °C

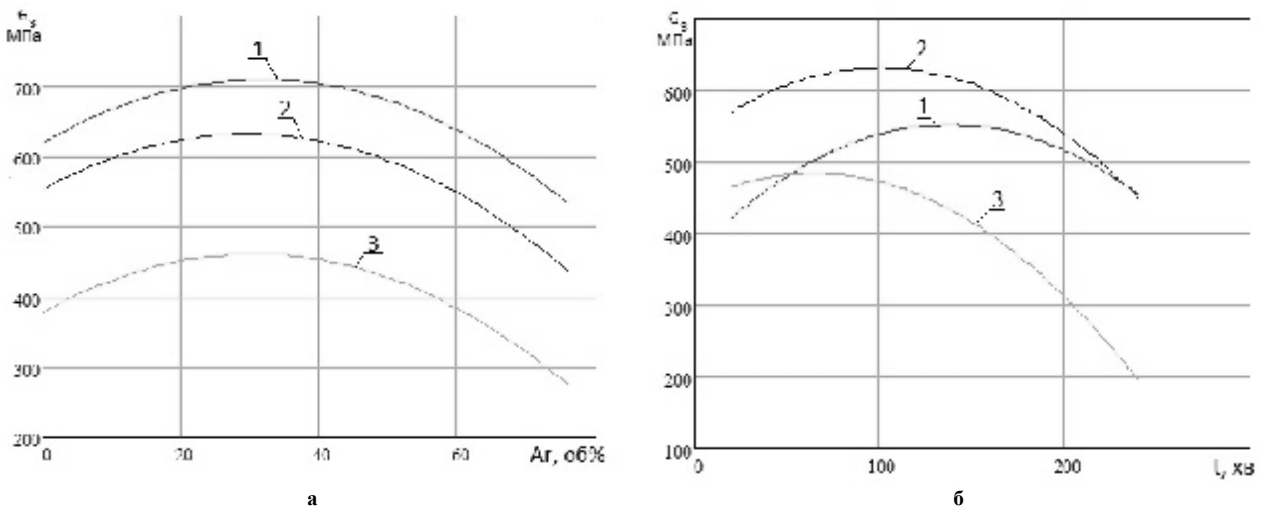


Рис. 2. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 45X від вмісту аргону в насичуючому середовищі та часу дифузійного насичення при температурі 570°C:

а) $\sigma_3 = f(\text{Ar об. \%})$ при часі азотування $\tau = 130$ хв і різних тисках P в вакуумній камері: 1 – 80 Па, 2 – 240 Па, 3 – 400 Па;

б) $\sigma_3 = f(\tau)$ при тиску $P = 240$ Па та в різних середовищах: 1 – 100 об. % N_2 , 2 – 62 об. % $\text{N}_2 + 38$ об. % Ar , 3 – 25 об. % $\text{N}_2 + 75$ об. % Ar .

На рис.3 наведена залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 45Х від твердості цієї поверхні при різних режимах іонного азотування в безводневих середовищах. З рисунка видно, що існує кореляційна залежність між цими характеристиками, яку можна описати такою формулою:

$$H_n = H_o + k \cdot \sigma_n, \quad (5)$$

де H_n і H_o – твердість поверхні азотованого шару і твердість основи сталі; k – коефіцієнт пропорційності, який знаходиться з експерименту для кожної марки сталі після азотування. Коефіцієнт $k = \sigma_n = (H_n - H_o) / \sigma_n$ і для сталі 45Х дорівнює 10,2.

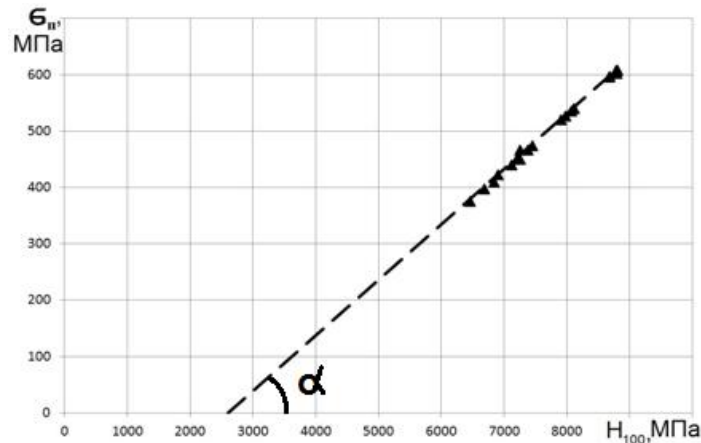


Рис. 3. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару σ_n від твердості H_{100} азотованої поверхні

Висновки

Технологічні параметри процесу іонного азотування мають великий вплив на залишкові напруження стиску, що виникають в азотованих шарах і їх величину можна змінювати в широких межах за рахунок зміни температури, тиску, складу насичуючого середовища та часу дифузійного насичення.

Залежність залишкових напружень в азотованих шарах від технологічних параметрів процесу азотування має екстремальний характер з вираженим максимумом, що дозволяє оптимізувати процес зміцнення з метою одержання оптимальних значень залишкових напружень для забезпечення максимальних експлуатаційних характеристик конструкційних елементів.

Залишкові напруження на поверхні азотованих шарів мають кореляційний зв'язок з твердістю поверхні азотованого шару.

Література

1. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун, П.В. Каплун // Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.
2. Карпенко Г.В. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий / Г.В. Карпенко, В.И. Похмурский, В.Б. Далисов, В.С. Замиховский. – Киев : Наук, думка, 1971. – 167 с.
3. Барвинок В.А. Теоретические и экспериментальные исследования формирования напряженного состояния плазменных покрытий / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, А.Г. Цидулко // Температуроустойчивые покрытия. – Л. : Наука, 1985. – С. 141–145.
4. Похмурский В.И. Характер распределения остаточных напряжений первого рода в поверхностных слоях сталей и сплавов с защитными покрытиями / В.И. Похмурский, Г.В. Карпенко // Физико-химическая механика металлов. – 1968. – Т. 4. – № 4. – С. 381–383.
5. Трапезон А.Г. О Влияние вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана / А.Г. Трапезон, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Пробл. прочности. – 1995. – № 11-12. – С. 32–38.
6. Антонюк В.С. Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N / В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, А.В. Рутковский, В.І. Мірненко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2004. – № 7(77) (Частина 2). – С. 206–210.
7. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. – Минск : Изд. БГУ, 1982. – 302 с.
8. Патент UA №28383: GO 1L1/06. Спосіб визначення структурних і температурних складових залишкових напружень в покриттях / Антонюк В.С., Сорока О.Б., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю. – № u200707507 ; заявл. 04.07.2007 ; опубл. 10.12.2007.
9. Каплун П.В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування / П.В. Каплун, В.А. Гончар, Т.В. Донченко, В.О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету, серія: технічні науки. – 2015. – № 6. – С. 7–12.