

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В СТАЛІ 20 ТА ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА ЇХ ВЕЛИЧИНУ

Проведено аналіз впливу залишкових напружень на міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів при наявності покриттів. Наведені результати експериментальних досліджень залишкових напружень в дифузійних шарах після іонного азотування сталі 20 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.

V.A. GONCHAR

Khmelnitsky National University

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ION NITRIDING ON THE VALUE OF RESIDUAL STRESSES IN 20 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 20 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 20 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 20 розміром $200 \times 15 \times 1$ мм після їх іонного азотування в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. Технологічні параметри процесу азотування змінювалися в широких межах (температура азотування $T = 480\text{--}600$ °С; тиск в вакуумній камері $P = 80\text{--}400$ Па; час дифузійного насичення $\tau = 20\text{--}240$ хв; вміст аргону в суміші з азотом $Ar = 0\text{--}76\%$). 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 виміряного прогину пластини, використовуючи рівняння пружної лінії для балки, середні значення залишкових напружень σ_c визначалися за залежністю [8]:

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

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]:

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

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень в покритті;
 h_n – товщина покриття;
 k – коефіцієнт, що враховує вплив температури T °К нанесення дифузійного покриття. Наприклад, при іонному азотуванні $k = 900/T$ °К, 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). При цьому математична залежність залишкових напружень від технологічних параметрів процесу азотування описується рівнянням регресії, яке має вид:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4, \tag{3}$$

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, залежно 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 20

№ режиму азотування	Значення факторів режиму азотування				h_n , мкм	H_{100} , МПа	Прогин f , мм	σ_c , МПа	σ_n , МПа
	T , °С	P , Па	τ , хв	об. % Ar					
1	570	320	185	57	182	4137	2.48	139	276
2	510	320	185	57	147	3839	2.00	120	244
3	570	160	185	19	203	4312	2.62	142	289
4	510	160	185	19	169	4184	2.18	138	279
5	570	320	75	19	167	4627	2.86	165	323
6	510	320	75	19	94	3399	1.60	103	207
7	570	160	75	57	162	5652	4.28	215	425
8	510	160	75	57	124	3944	3.52	220	254
9	480	240	130	38	145	3039	1.32	79	163
10	600	240	130	38	233	5219	4.20	196	382
11	540	80	130	38	217	5529	3.92	206	413
12	540	400	130	38	169	3809	2.08	120	241
13	540	240	20	38	64	4319	2.14	148	292
14	540	240	240	38	162	3689	1.98	115	229
15	540	240	130	0	145	3804	2.06	124	240
16	540	240	130	76	109	3684	1.76	113	226
17	540	240	130	38	156	4500	2.40	151	310
18	540	240	130	38	159	4550	2.44	157	315
19	540	240	130	38	157	4520	2.42	155	311
20	540	240	130	38	161	4560	2.46	158	316

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:

$$\sigma_n \text{ (МПа)} = 302 + 71 x_1 - 63 x_2 - 45 x_3 - 22 x_4 - 79 x_1^2 - 38 x_2^2 - \tag{4}$$

$$- 68 x_3^2 - 88 x_4^2 - 55 x_1 x_2 + 3 x_1 x_3 - 29 x_1 x_4 - 19 x_2 x_3 - 11 x_2 x_4 - 51 x_3 x_4,$$

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

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 20 таким технологічним режимом є: $T = 565 \text{ }^\circ\text{C}$; $P = 80 \text{ Па}$; $\tau = 120 \text{ хв}$; 65 об.%N₂ + 35 об.% Ar, що забезпечує $\sigma_n = 718 \text{ МПа}$.

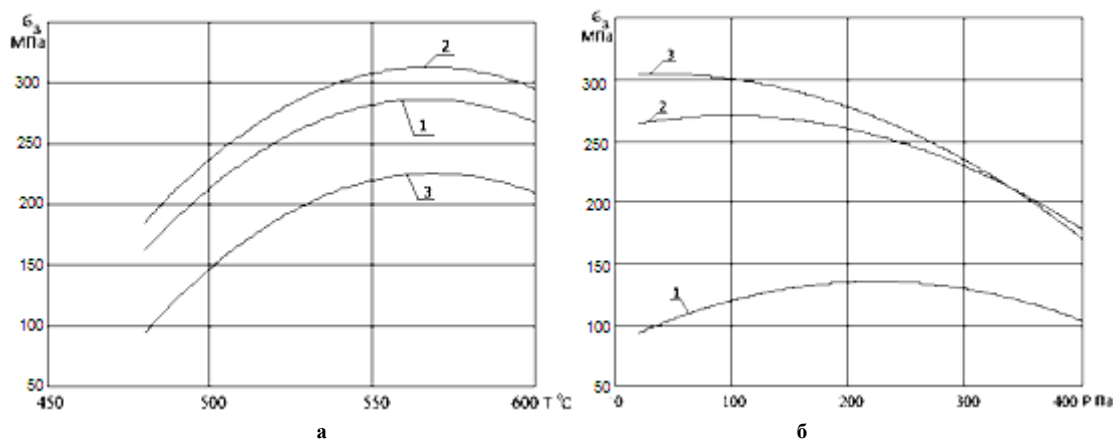


Рис. 1. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 20 від температури іонного азотування і тиску в вакуумній камері:

- а) $\sigma_n = f(T)$ при $P = 240 \text{ Па}$, суміші 62 об.% N₂ + 38 об. % Ar, часі насичення τ : 1 – 20 хв., 2 – 130 хв, 3 – 240 хв;
- б) $\sigma_n = f(P)$ при часі дифузійного насичення $\tau = 130 \text{ хв}$, в суміші 62 об.%N₂ + 38 об. % Ar та при різних температурах азотування: 1 – 480 С, 2 – 540 С, 3 – 570 °С

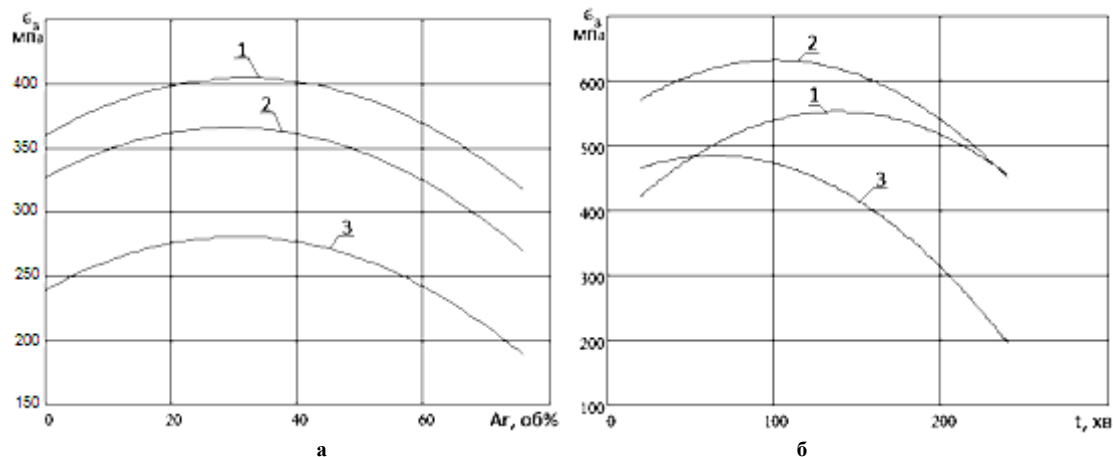


Рис. 2. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 20 від вмісту аргону в насичуючому середовищі та часу дифузійного насичення при температурі 570 °С:

- а) $\sigma_n = f(\text{Ar об. \%})$ при часі азотування $\tau = 130 \text{ хв}$ і різних тисках P в вакуумній камері: 1 – 80 Па, 2 – 240 Па, 3 – 400 Па;
- б) $\sigma_n = f(\tau)$ при тиску $P = 240 \text{ Па}$ та в різних середовищах: 1 – 100 об. %N₂, 2 – 62 об. % N₂ + 38 Ar об. %, 3 – 25 об. % N₂ + 75 Ar об. %

На рис. 3 наведена залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 20 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:

$$H_n = H_o + k \cdot \sigma_n, \tag{5}$$

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 20 дорівнює 8.1.

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.

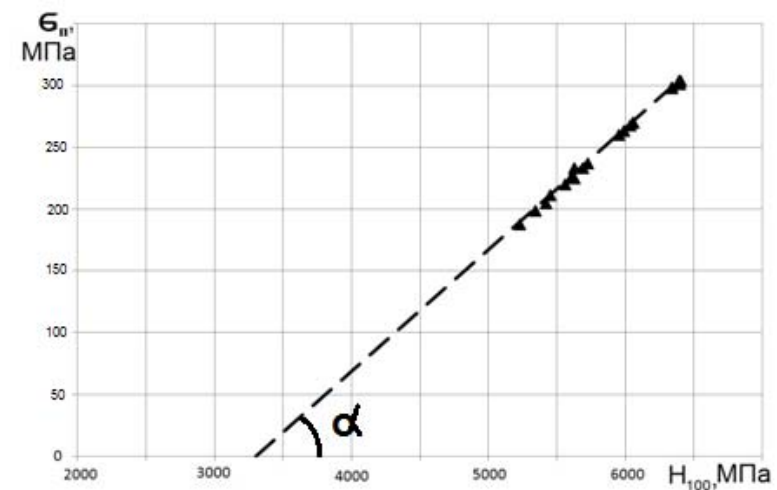


Рис. 3. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару σ_{res} від твердості H_{100} азотованої поверхні

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. Траpezон А.Г. О влиянии вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана / А.Г. Траpezон, 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. Рутковський, 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 / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – 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.

References

1. Kaplun V.H. Yonnoe azotyrovanye v bezvodородnykh seredakh / V.H. Kaplun P.V. Kaplun // Khmelnytskyi : KhNU, 2015. – 344 s.
2. Karpenko H.V. Vlyanye dyffuzyonnykh pokrytyi na prochnost stalnykh yzdelyi / H.V. Karpenko, V.Y. Pokhmurskiy, V.B. Dalysov, V.S. Zamykhovskiy. – Kiev : Nauk. dumka, 1971. – 167 s.
3. Barvynok V.A. Teoreticheskye y eksperymentalnye yssledovanyia formyrovanyia napriazhennoho sostoianiya plazmennykh pokrytyi / V.A. Barvynok, V.Y. Bohdanovych, A.H. Tsydulko // Temperaturostoichyvye pokrytyia. – L. : Nauka, 1985. – S. 141–145.
4. Pokhmurskiy V.Y. Kharakter raspredeleniya ostatochnykh napriazheniy pervoho roda v poverkhnostnykh sloiakh staley i splyavov s zashchytynymy pokrytyiamy / V.Y. Pokhmurskiy, H.V. Karpenko // Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka metal lov. – 1968. – Т. 4. – № 4. – С. 381–383.
5. Trapezon A.H. O vlyianyy vakuumnykh pokrytyi na soprotyvlenye ustalosty tekhnicheskoho tytana / A.H. Trapezon, B.A. Liashenko, A.V. Rutkovskiy // Probl. prochnosty. – 1995. – # 11–12. – С. 32–38.
6. Antoniuk V.S. Zalyshkovy napruzhennia v vakuum-plazmovykh pokryt'tyakh TiN, (TiAl)N, (TiC)N / V.S. Antoniuk, O.B. Soroka, A.V. Rutkovskiy, V.I. Mirnenko // Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. Volodymyra Dalia. – Luhansk, 2004. – # 7(77) (Chastyna 2). – С. 206–210.
7. Krasovskiy H.Y. Planyrovanye eksperymenta / H.Y. Krasovskiy, H.F. Fylaretov. – Mynsk : Yzd. BHU, 1982. – 302 s.
8. Patent UA #28383: GO 1L1/06. Sposib vyznachennia strukturykh i temperaturnykh skladovykh zalyshkovykh napruzhen v pokryt'tyakh / Antoniuk B.C., Soroka O.B., Klymenko S.A., Kopeikina M.Yu. – # u200707507 ; zaavil. 04.07.2007 ; opubl. 10.12.2007.
9. Kaplun P.V. Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen v azotovanykh sharakh pislia ionnoho azotuvannia / P.V. Kaplun, V.A. Honchar, T.V. Donchenko, V.O. Kurskaia // Herald of Khmelnytskyi National University, serii : Tekhnichni nauky. – 2015. – # 6. – С. 7–12.

Рецензія/Peer review : 13.07.2017 р.

Надрукована/Printed : 05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Каплун В.Г.