

RELATIONSHIP POWER PUMP FOR MIXING VEGETABLE OIL AND SETTING DISK MIXER

G. Golub, M. Pavlenko, V. Chuba, S. Kuharets, O. Osypchuk

Annotation. *An experimental results influence the design parameters of equipment for the production of biodiesel at the pump power consumption when using a disk mixer while mixing vegetable oil are given.*

Key words: *power, hydro stations, pump, disk atomizer, diving depth*

УДК21.785.53

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ У СТАЛІ ШХ15 ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ

В. Г. Каплун, доктор технічних наук

Т. В. Донченко, кандидат економічних наук

Хмельницький національний університет

П. В. Матвіїшин, кандидат технічних наук

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

e-mail: pklen_@i.ua

Анотація. *Проаналізовано вплив залишкових напружень на міцність та експлуатаційні характеристики конструкційних покриттів. Наведено результати експериментальних досліджень залишкових напружень у дифузійних шарах після іонного азотування сталі ШХ15 у безводневих середовищах за різними технологічними режимами. На основі планування експериментів одержано аналітичні й графічні залежності величини залишкових напружень від зміни технологічних параметрів процесу іонного азотування, встановлено залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару від його твердості.*

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

Підвищення зносостійкості, надійності й довговічності конструкційних елементів є одним з найважливіших завдань машинобудування. Одним із перспективних напрямів у вирішенні цього завдання є зміцнення поверхні із застосуванням функціональних покриттів. Нині у промисловості застосовують багато методів нанесення покриттів із використанням процесів осадження, дифузії, імплантації, електроіскрового і лазерного легування тощо та існує понад 100 різних технологій зміцнення поверхні з використанням даних методів. При нанесенні покриттів у поверхневих

шарах виникають залишкові напруження, що впливають на напружено-деформований стан, міцність та експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [1–5]. Виникнення залишкових напружень у покриттях зумовлено різними факторами: різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи й покриття, наявністю захоплених атомів газу, дефектністю конденсату, тощо.

Дослідженнями [1, 3–5] показано, що в дифузійних покриттях виникають залишкові напруження стиску, які позитивно впливають на міцність і довговічність конструкційних елементів при розтягу, багатоцикловій втомі, згині та контактній витривалості, циклічному навантаженні. Залишкові напруження не рівномірно розподіляються по товщині покриття, а їх величина та характер розподілу залежать і керуються технологічними параметрами процесу дифузійного насичення.

На сьогодні існує багато способів визначення залишкових напружень, серед яких найпоширеніші експериментально-розрахункові методи. Для практики надзвичайно важливе значення має визначення величини й характеру залишкових напружень з урахуванням матеріалу і конструктивних особливостей деталей машин, виду покриттів та технології їх нанесення. Серед існуючих способів більшість присвячена визначенню середньої величини залишкових напружень у покриттях, що одержуються методом осадження, з допущенням їх рівномірного розподілу по товщині [6, 7, 9, 10]. Приклади визначення таких залишкових напружень у вакуум-плазмових покриттях описані в працях [9, 10]. Недоліком такого методу є низька точність визначення залишкових напружень при товщині пластинок із покриттям більшим за 1 мм.

Значно менша частина способів існує для визначення залишкових напружень у дифузійних покриттях, в яких має місце значна нерівномірність їх розподілу по товщині покриття, що є важливим для експлуатаційних характеристик. Прикладом визначення таких залишкових напружень у дифузійних покриттях є метод М. М. Давиденкова [2].

Величина залишкових напружень та їх розподіл по глибині дифузійного шару визначаються за методом М. М. Давиденкова [2] шляхом безперервного видалення травленням напруженого шару з одночасним автоматичним записом кривої деформації плоского зразка на приладі ПІОН. Розрахунок напружень проводиться за формулою:

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

де E – модуль пружності матеріалу, Па;

a – товщина зразка в середньому січенні без половини стравленого шару, мм;

b – половина віддалі між осями закріплюючих гвинтів, мм;

df/da – інтенсивність зміни стріли прогину зразка залежно від його товщини;

K – коефіцієнт, що дорівнює відношенню масштабів запису по осях X і Y .

Недоліком методу є те, що він складний, потребує спеціального обладнання й відповідних травників для покриття.

Ми застосували експериментально-розрахунковий спосіб визначення залишкових напружень у дифузійних покриттях [11], який включає визначення параметра відхилення зразка у вигляді пластини певного січення від прямолінійного положення при навантаженні консольно защемленого зразка з покриттям на верхній площині та ідентичного зразка без покриття однаковим вантажем величиною P , який створює в зразку без покриття максимальні напруження згину, що мають величину більшу за залишкові напруження, але не перевищують границю пропорційності матеріалу. Вимірюють відхилення кожного зразка від початкового положення і знаходять різницю прогинів зразків із дифузійним покриттям і без покриття. За цією різницею прогинів із формули прогину консольної балки визначають силу P_1 , по якій знаходять величину залишкових напружень за формулою згину консольної бази при дії відомого згинального моменту й моменту опору січення зразка.

Мета досліджень – визначення залишкових напружень у сталі після іонного азотування.

Матеріали та методика досліджень. На стальну пластину, завширшки b і завтовшки h , з одного боку наносять дифузійне покриття методом іонного азотування за певним режимом, консольно прикріплюють зразок покриттям уверх. Протилежний кінець зразка на віддалі L навантажують силою P і за допомогою лазерного датчика з великою точністю заміряють стрілу прогину Y_1 . Аналогічно вимірюємо стрілу прогину Y_2 для зразка без покриття (рис. 1). Знаходимо різницю прогинів:

$$Y = Y_2 - Y_1. \quad (2)$$

З формули прогину консольної балки під дією сили P_1

$$Y = \frac{P_1 L^3}{3EJ_z}, \quad (3)$$

знаходимо P_1 .

$$P_1 = \frac{3YEJ_z}{L^3}, \quad (4)$$

де E – модуль Юнга матеріалу пластини;

J_z – момент інерції поперечного січення пластини.

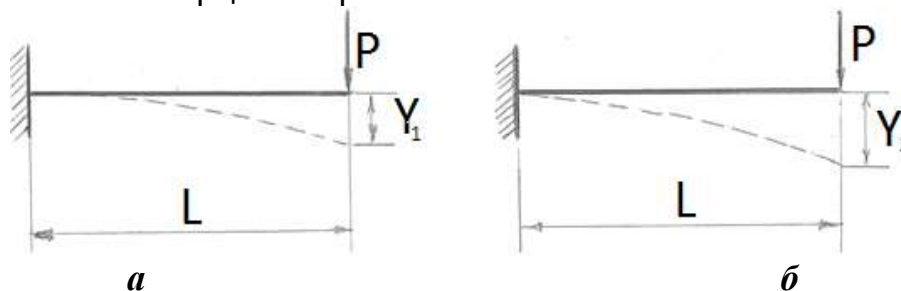


Рис. 1. Схема навантаження пластини при випробуваннях:
а – пластини з покриттям; б – пластини без покриття

Визначаємо середнє значення залишкових напружень за формулою:

$$\sigma = \frac{6P_1L}{bh^2}. \quad (5)$$

Величину залишкових напружень в будь-якій точці покриття знаходимо за формулою:

$$\sigma_z = \sigma \cdot e^{-\frac{k(z-0.45h_n)}{h_n-z}}, \quad (6)$$

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень у покритті;

h_n – товщина покриття;

k – коефіцієнт, що враховує вплив температури $T^\circ\text{K}$ нанесення дифузійного покриття. Наприклад, при іонному азотуванні $k = 900/T^\circ\text{K}$, який знаходиться з експерименту.

Наведемо конкретний приклад реалізації запропонованого способу.

Пластини зі сталі ШХ15 завтовшки 3 мм і завширшки 12 мм після іонного азотування за різними режимами (табл. 1) навантажували силою $P = 60$ Н на віддалі $L = 140$ мм від защемленого кінця і замірювали прогин пластини Y_1 у місці прикладання сили. Аналогічно навантажували ідентичну пластину без покриття такою самою силою P і замірювали прогин Y_2 . Використовуючи формули (4), (6) і (7) знаходимо Y , P_1 і σ для кожного режиму іонного азотування.

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 [12], відповідно до якого, азотування проводилося за 17 режимами (табл.1). При цьому математична залежність залишкових напружень від технологічних параметрів процесу азотування описується рівнянням регресії, яке має вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi(x) = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \\ & + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\varphi(x)$ – функція відклику (вихідна змінна);

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ij}$ – коефіцієнти рівняння регресії;

x_i, x_j – незалежні змінні величини (фактори).

Результати досліджень. Результати експериментів та розрахунків наведено в табл. 1. З таблиці видно, що технологічні параметри процесу азотування мають значний вплив на властивості та залишкові напруження в азотованих шарах, які змінюються у широких межах. Зокрема, середнє значення залишкових напружень σ_c знаходиться в межах 262–346 МПа, а максимальні залишкові напруження на поверхні σ_n – у межах 477–651 МПа за даних режимів азотування. При цьому вони залежать від твердості й товщини азотованого шару. На основі експериментальних

даних одержано математичну залежність σ_n від технологічних параметрів процесу азотування як рівняння регресії другого порядку:

$$\sigma_n (\text{МПа}) = 620 + 85 x_1 + 62,5 x_2 + 12,2 x_3 - 16,8 x_4 - 52,9 x_1^2 - 33,2 x_2^2 - 25,7 x_3^2 - 91,6 x_4^2 - 58,9 x_1 x_2 + 21,4 x_1 x_3 - 29,6 x_1 x_4 - 30 x_2 x_3 - 32,1 x_2 x_4 - 95,8 x_3 x_4, \quad (8)$$

$$\text{Де } x_1 = \frac{T - 540}{60}; \quad x_2 = \frac{P - 240}{160}; \quad x_3 = \frac{\tau - 130}{110}; \quad x_4 = \frac{Ar - 38}{38}$$

На рис. 2 і 3 наведено графіки залежності σ_n від технологічних параметрів процесу іонного азотування, побудовані на основі рівняння (8), 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 насичувальному середовищі), за яких залишкові напруження досягають екстремального значення. При цьому існує технологічний режим азотування, що забезпечує максимальне значення залишкових напружень. Для сталі ШХ15 таким технологічним режимом є: $T = 570 \text{ }^\circ\text{C}$; $P = 240 \text{ Па}$; $\tau = 240 \text{ хв}$; 81об.%N₂+19об.% Ar, що забезпечує $\sigma_n = 718 \text{ МПа}$.

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 , у сталі ШХ15

| № режиму азотування | Значення факторів режиму азотування | | | | h_n , мкм | H_{100} , МПа | γ , мм | σ_c , МПа | σ_n , МПа |
|---------------------|-------------------------------------|----------|--------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|------------------|------------------|
| | T , $^\circ\text{C}$ | P , Па | τ , хв. | об. % Ar, | | | | | |
| 1 | 570 | 320 | 185 | 57 | 317 | 8248 | 6,82 | 313 | 589 |
| 2 | 510 | 320 | 185 | 57 | 230 | 7828 | 6,54 | 300 | 559 |
| 3 | 570 | 160 | 185 | 19 | 306 | 9110 | 7,54 | 346 | 651 |
| 4 | 510 | 160 | 185 | 19 | 218 | 7450 | 6,55 | 286 | 520 |
| 5 | 570 | 320 | 75 | 19 | 248 | 9105 | 7,48 | 349 | 650 |
| 6 | 510 | 320 | 75 | 19 | 162 | 7970 | 6,82 | 313 | 545 |
| 7 | 570 | 160 | 75 | 57 | 216 | 8660 | 7,26 | 333 | 619 |
| 8 | 510 | 160 | 75 | 57 | 171 | 7115 | 6,08 | 279 | 480 |
| 9 | 480 | 240 | 130 | 38 | 158 | 6680 | 5,61 | 262 | 430 |
| 10 | 600 | 240 | 130 | 38 | 312 | 9060 | 6,50 | 344 | 647 |
| 11 | 540 | 80 | 130 | 38 | 188 | 7440 | 6,37 | 292 | 510 |
| 12 | 540 | 400 | 130 | 38 | 280 | 9190 | 7,70 | 353 | 656 |
| 13 | 540 | 240 | 20 | 38 | 120 | 8249 | 7,22 | 331 | 589 |
| 14 | 540 | 240 | 240 | 38 | 300 | 8591 | 7,11 | 326 | 614 |
| 15 | 540 | 240 | 130 | 0 | 277 | 8374 | 6,92 | 318 | 598 |
| 16 | 540 | 240 | 130 | 76 | 233 | 7902 | 6,55 | 300 | 564 |
| 17 | 540 | 240 | 130 | 38 | 276 | 8780 | 7,26 | 330 | 627 |

На рис. 4 наведено залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі ШХ15 від твердості цієї поверхні за різних режимів іонного азотування в безводневих середовищах. З рисунка

видно, що існує кореляційна залежність між цими характеристиками, яку можна описати такою формулою:

$$H_n = H_o + k \cdot \sigma_n, \quad (9)$$

де H_n / H_o – твердість поверхні азотованого шару й твердість основи сталі;

k – коефіцієнт пропорційності, який знаходиться з експерименту для кожної марки сталі після азотування. Коефіцієнт $k = \text{ctg} \alpha = (H_n - H_o) / \sigma_n$ і для сталі ШХ15 дорівнює 10,2.

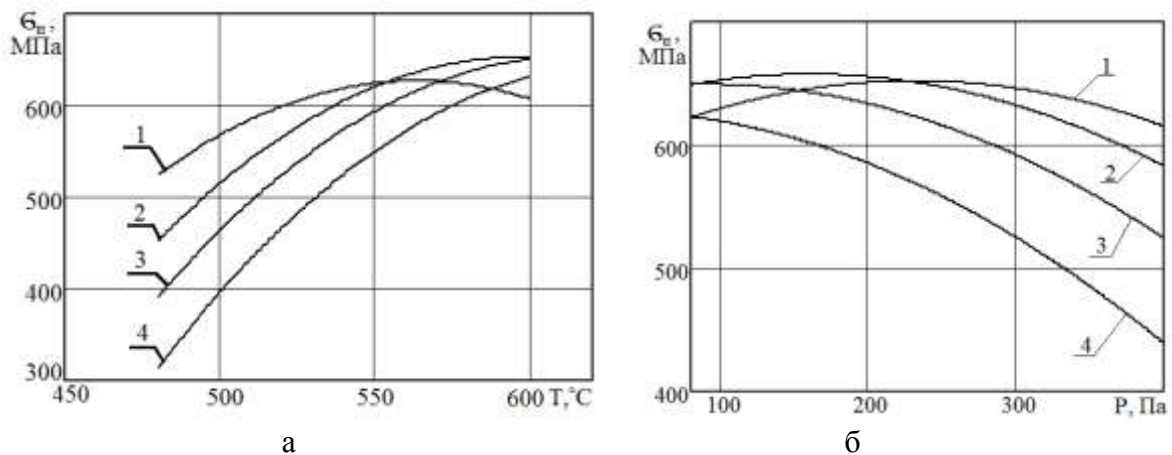


Рис. 2. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі ШХ15 від температури іонного азотування й тиску у вакуумній камері: а) $\sigma_n = f(T, ^\circ\text{C})$ при $t = 130$ хв, суміші 81 об. % N_2 + 19 об. % Ar , тиску: 1 – 80 Па, 2 – 240 Па, 3 – 320 Па, 4 – 400 Па; б) $\sigma_n = f(P)$ при часі дифузійного насичення $t = 130$ хв, в суміші 62 об. % N_2 + 38 об. % Ar та за різних температур азотування: 1 – 600 °C, 2 – 570 °C, 3 – 540 °C, 4 – 510 °C

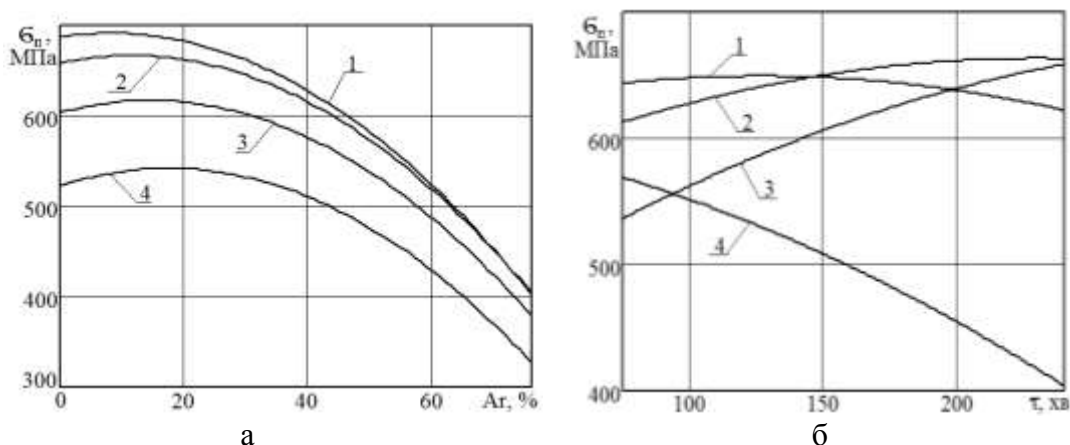


Рис. 3. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі ШХ15 від вмісту аргону в насичувальному середовищі та часу дифузійного насичення: а) $\sigma_n = f(\text{Ar об. \%})$ при часі азотування $t = 240$ хв. і тиску $P = 240$ Па та за різних температур азотування: 1 – 600 °C, 2 – 570 °C, 3 – 540 °C, 4 – 510 °C; б) $\sigma_n = f(\tau)$ при тиску $P = 240$ Па і температурі 570 °C та в різних середовищах: 1 – 62 об. % N_2 + 38 Ar об. %, 2 – 84 об. % N_2 + 19 Ar об. %, 3 – 100 об. % N_2 , 4 – 24 об. % N_2 + 76 Ar об. %

Відомо [1], що в азотованих шарах твердість та модуль пружності пов'язані зі структурою матеріалу і зменшуються по товщині від поверхні в глибину за експоненціальною залежністю. Залишкові напруження в азотованому шарі також пов'язані з його структурою і розподіляються по товщині покриття нерівномірно. Для визначення розподілу залишкових напружень по товщині азотованого шару запропоновано формулу (6), з використанням якої одержано графіки (рис. 5) розподілу залишкових напружень по товщині азотованих шарів, отримані після азотування за режимами (табл. 1).

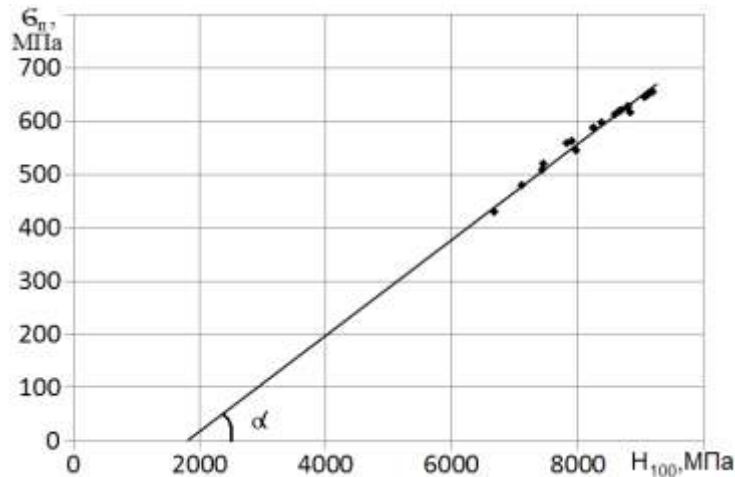
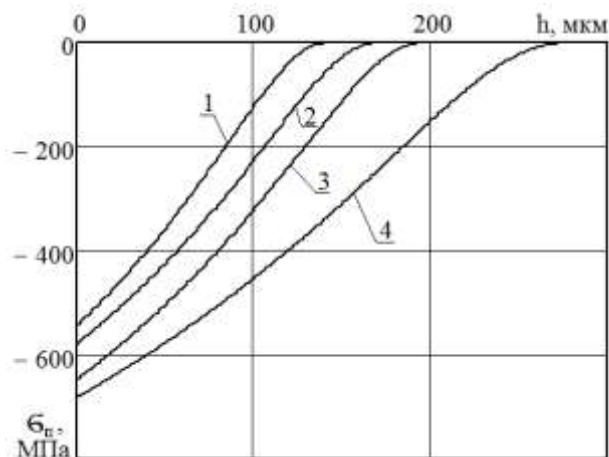


Рис. 4. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару σ_r від твердості H_{100} азотованої поверхні сталі ШХ15

З графіків видно, що максимальні залишкові напруження стиску виникають на поверхні, зменшуються по товщині азотованого шару за експоненціальною залежністю і досягають мінімального значення на границі з основою.



**Рис. 5. Розподіл залишкових напружень в азотованому шарі сталі ШХ15 після іонного азотування за різними режимами (табл. 1):
1 – режим № 9, 2 – режим № 11, 3 – режим № 7, 4 – режим № 3**

Висновки

Технологічні параметри процесу іонного азотування значною мірою впливають на залишкові напруження стискання, що виникають в азотованих шарах, і їх величину можна змінювати в широких межах за рахунок зміни температури, тиску, складу насичувального середовища та часу дифузійного насичення.

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

Залишкові напруження на поверхні азотованих шарів мають кореляційний зв'язок із твердістю поверхні азотованого шару та зменшуються по товщині азотованого шару за експоненціальною залежністю.

Список літератури

1. Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В. Г. Каплун, П. В. Каплун // Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.
2. Давиденков Н. Н. Об измерении остаточных напряжений / Н. Н. Давиденков // Заводская лаборатория. – 1937. – № 8. – С. 987–990.
3. Карпенко Г. В. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий / Г. В. Карпенко, В. И. Похмурский, В. Б. Далисов, В. С. Замиховский. – К. : Наук. думка, 1971. – 167 с.
4. Барвинок В. А. Теоретические и экспериментальные исследования формирования напряженного состояния плазменных покрытий / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, А. Г. Цидулко // В кн.: Температуроустойчивые покрытия. – Л. : Наука, 1985. – С. 141–145.
5. 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.
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. – 2004. – № 7 (77), ч. 2. – С. 206–210.
7. Teixeira V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings / V. Teixeira // Vacuum. – 2002. – V. 64, № 3–4. – С. 393–399.
8. Патент 101477030 CN. G01N19/04. Measuring method for residual stress in coating / Binshi Xu, Xiancheng Zhang, Haidou Wang; Yixiong Wu. – № 200810055923.1; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 08.07.2009.
9. Патент № 28383 Україна: 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
10. А.С. 1805307. G01L1/00. Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Колмогоров Г. Л. – № 4888114/28 ; заявл. 06.12.1990 ; опубл. 30.03.1993, Бюл. № 12.

11. 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.

12. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛИ ШХ15 ПОСЛЕ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

В. Г. Каплун, Т. В. Донченко, П. В. Матвишин

Аннотация. Проанализировано влияние остаточных напряжений на прочность и эксплуатационные характеристики конструкционных покрытий. Приведены результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в диффузионных слоях после ионного азотирования стали ШХ15 в безводородных средах за разными технологическими режимами. На основе планирования экспериментов получены аналитические и графические зависимости величины остаточных напряжений от изменения технологических параметров процесса ионного азотирования, установлена зависимость остаточных напряжений на поверхности азотированного слоя от его твердости.

Ключевые слова: ионное азотирование, остаточные напряжения, технологические параметры, твердость

RESIDUAL STRESSES IN SHH15 STEEL AFTER ION NITRIDING

V. Kaplun, T. Donchenko, P. Matviishin

Annotation. The analysis of influence of residual stresses on the strength and performance of construction parts. The experimental results of residual stresses in the diffusion layers after ion nitriding of SHH15 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.

Key words: ion nitriding, residual stresses, technological parameters, hardness