

УДК21.785.53

П.В. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, В.О. КУРСКАЯ

Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В АЗОТОВАНИХ ШАРАХ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ

Наведені результати досліджень і новий спосіб визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях на прикладі азотованих шарів після іонного азотування в безводневих середовищах сталі 40Х. Проведено порівняння величини залишкових напружень в азотованих шарах в ході їх визначення за новим та іншими відомими способами. Показано переваги нового способу.

Ключові слова: залишкові напруження, шар, азотування, покриття.

P.V. KAPLUN, V.A. GONCHAR, T.V. DONCHENKO, V.O. KURSKAJA

Khmelnytskyi National University

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN LAYERS NITRIDED AFTER ION NITRIDING

Analysis of different methods of determining residual stresses in coatings applied to metals with different technologies discussed their advantages and disadvantages. A new method for determining residual stresses in the diffusion coatings. The results of studies of residual stresses in the diffusion coatings on the example of a new way of nitrided layers after ion nitriding in nonhydrogen environments steel 40H. A comparison of the value of residual stresses in the nitrided layers defined by new and known methods.

Keywords: residual stresses, layer, nitriding, coating.

Вступ

Підвищення зносостійкості, надійності і довговічності конструкційних елементів є одним з важливіших завдань машинобудування. Одним із перспективних напрямів в вирішенні цього завдання є зміцнення поверхні з застосуванням функціональних покриттів. В даний час в промисловості застосовується багато методів нанесення покриттів з використанням процесів осадження, дифузії, імплантації, електроіскрового і лазерного легування тощо та існує більше сотні різних технологій зміцнення поверхні з використанням даних методів. При нанесенні покриттів в поверхневих шарах виникають залишкові напруження, що впливають на напружено-деформований стан, міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [1–11]. Залишкові напруження можуть досягати великих значень і мати різні знаки (стиску або розтягу) в залежності від технології та властивостей нанесених покриттів [1, 2, 6, 10, 11]. 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, 6, 7, 12]. 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. Виникнення залишкових напружень в покриттях обумовлено різними факторами: різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи і покриття, наявністю захоплених атомів газу, дефектністю конденсату, тощо.

Дослідженнями [1, 6, 9] показано, що в дифузійних покриттях виникають залишкові напруження стиску, які позитивно впливають на міцність і довговічність конструкційних елементів при розтягу, багатоциклової втомі при згині та контактній витривалості при циклічному навантаженні. Залишкові напруження не рівномірно розподіляються по товщині покриття, а їх величина та характер розподілу залежать і керуються технологічними параметрами процесу дифузійного насичення.

Виділяють два механізми виникнення залишкових напружень в покриттях, що отримуються методом осадження: структурний та температурний. Структурні напруження в PVD-покриттях пов'язують з дефектністю при формуванні конденсату, вони є чутливими до мікроструктури покриття і залежать від умов конденсації, а також від часу нанесення, тобто від товщини покриття [12–14]. Температурна складова напружень обумовлена різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів покриття та основи. PVD-покриттям, як правило, притаманні залишкові напруження стиску, які, в залежності від товщини покриття та матеріалу основи, можуть переходити в слабо розтягуючі. Високий рівень залишкових напружень стиску багато в чому обумовлює підвищення тріщиностійкості та зносостійкості поверхонь, модифікованих вакуум-плазмовими покриттями, а також позитивно впливає на такі характеристики, як границя витривалості та границя текучості. Разом з тим, значні за величиною залишкові напруження стиску роблять покриття більш крихким, можуть призводити до його спонтанного відшарування ще до початку експлуатації або до порушення зчеплення основи з покриттям в процесі експлуатації.

Основна частина

В даний час існує багато способів визначення залишкових напружень, серед яких найбільш

поширені експериментально-розрахункові методи. Для практики надзвичайно велике значення має визначення величини і характеру залишкових напружень з врахуванням матеріалу і конструктивних особливостей деталей машин, виду покриттів та технології їх нанесення. Серед існуючих способів більшість присвячена визначенню середньої величини залишкових напружень в покриттях, що одержуються методом осадження, з допущення їх рівномірного розподілу по товщині [7, 12, 15–17]. Приклади визначення таких залишкових напружень в вакуум-плазмових покриттях описані в роботах [16, 17] і здійснювалися на основі експериментально-розрахункового методу гнучкого зразка, який полягає в тому, що під дією залишкових напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку воно нанесено, деформується у вигляді дуги кола. Прогин або радіус кривизни деформованого зразка дозволяє розрахувати залишкові напруження [16, 17]. Перевагою такого розрахунково-експериментального методу є те, що напруження розраховуються за остаточним результатом, тобто їх походження не має значення. Вакуум-плазмові покриття наносили на сталеві зразки розміром 120×5×0,5 мм методом конденсації з плазмової фази в умовах іонного бомбардування поверхні на устаткуванні ННВ-6,6-ІІ («Булат-20»). Після нанесення покриття визначали прогин, набутий в результаті дії залишкових напружень.

Виходячи з величини виміряного прогину, використовуючи рівняння пружної лінії для балки, залишкові напруження можна визначити за залежністю [16]:

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

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.

З використанням методу розрахунку тонких пластин на вигин можна визначити $\sigma_n^{зал}$ наступним чином [17]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{4E_o H_o^3}{3R h_n (1 - \nu_o^2)(2H_o + h_n)}, \quad (2)$$

де R – радіус кривизни, який отримує зразок в результаті деформації, що спричиняється залишковими напруженнями і визначається через прогин f і хорду.

Для визначення структурної складової залишкових напружень зразок з покриттям нагрівали до температури, що відповідає температурі нанесення покриття, в результаті релаксації термічної складової залишкових напружень зразки втрачають частину прогину. Прогин зразка, що залишився в умовах температури нанесення покриття, відповідає дії залишкових напружень структурного походження.

Значно менша частина способів існує для визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях, в яких має місце значна нерівномірність їх розподілу по товщині покриття, що є важливим для експлуатаційних характеристик. Прикладом визначення таких залишкових напружень в дифузійних покриттях є метод М.М. Давиденкова [5].

Величина залишкових напружень і їх розподіл по глибині дифузійного шару визначається за методом М.М. Давиденкова [5] шляхом безперервного видалення травленням напруженого шару с одночасним автоматичним записом кривої деформації плоского зразка на приладі ПІОН. Розрахунок напружень проводиться за формулою:

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

де E – модуль пружності матеріалу, Па;

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

b – половина віддалі між осями зажимних гвинтів, мм;

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

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

Недоліком методу є те, що він складний, вимагає спеціального обладнання і відповідних травників для покриття.

Нами запропоновано більш простий експериментально-розрахунковий спосіб визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях, який включає визначення параметра відхилення зразка в вигляді пластини певного сечення 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 з дифузійним покриттям і без покриття. За цією різницею прогинів з формули прогину консольної балки визначають силу P_1 , по якій знаходять величину залишкових напружень за формулою згину консольної баки при дії відомого згинального моменту і моменту опору сечення зразка.

Алгоритм реалізації наступний. На сталеву пластину шириною b і товщиною h з одного боку наносять дифузійне покриття методом іонного азотування за певним режимом, консольно закріплюють

зразок до верху покриттям. Протилежний кінець зразка на віддалі L навантажують силою P і з 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:

$$Y = Y_2 - Y_1. \quad (4)$$

З формули прогину консольної балки під дією сили P_1

$$Y = \frac{P_1 L^3}{3EJ_z}, \quad (5)$$

знаходимо P_1 .

$$P_1 = \frac{3YEJ_z}{L^3}, \quad (6)$$

де E – модуль Юнга матеріалу пластини;
 J_z – момент інерції поперечного січення пластини.

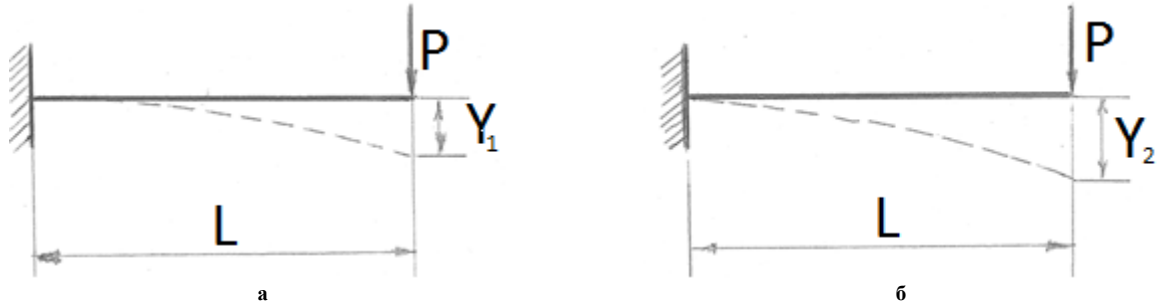


Рис. 1. Схема навантаження пластини при випробуваннях:
а – пластинка з покриттям; б – пластинка без покриття

Визначаємо середнє значення залишкових напружень за формулою:

$$\sigma = \frac{6P_1 L}{bh^2}. \quad (7)$$

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

$$\sigma_z = \sigma \cdot e^{-\frac{k(z-0.45h_n)}{(h_n-z)^{0.94}}}, \quad (8)$$

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень в 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.

Наводимо конкретні приклади реалізації запропонованого способу:

Пластини із сталі 40Х товщиною 3 мм і шириною 12 мм після іонного азотування за різними режимами (табл. 1) навантажували силою $P = 60$ Н на віддалі $L = 140$ мм від защемленого кінця і заміряли прогин пластини Y_1 в місці прикладання сили. Аналогічно навантажували ідентичну пластину без покриття такою ж силою P і заміряли прогин Y_2 . Використовуючи формули (4), (6) і (7) знаходимо Y , P_1 і σ для кожного режиму іонного азотування. Результати експериментів та розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність середніх залишкових напружень в сталі 40Х після різних режимів іонного азотування в безводневих середовищах

Режим азотування	Технологічні параметри				Мікротвердість H_{100} , МПа	Товщина покриття h_n , мкм	Прогин $Y = Y_2 - Y_1$, мм	Навантаження P_1 , Н	Середні залишкові напруження σ , МПа
	Температура T , $^\circ\text{C}$	Тиск P , Па	Час азотування τ , год	Вміст азоту N_2 в суміші, %					
1	560	235	3	100	6100	210	5,76	24,03	-160,2
2	560	235	3	75	9500	220	8,12	33,86	-225,2
3	560	235	3	50	5050	200	4,7	19,76	-138,4

Аналіз даних, які наведені в таблиці 1, показує, що в азотованому шарі виникають залишкові напруження стиску. Властивості азотованого шару та середнє значення залишкових напружень в азотованому шарі залежать від технологічних параметрів процесу іонного азотування і, в даному випадку, від процентного вмісту азоту в суміші з аргонном. Очевидним є те, що при зміні інших технологічних

параметрів залишкові напруження і властивості азотованого шару будуть змінюватися. Це свідчить про можливість керування величиною залишкових напружень в азотованому шарі з допомогою зміни режимів іонного азотування. Тобто, в залежності від умов експлуатації конструкційних елементів величину залишкових напружень можна оптимізувати для отримання максимальних експлуатаційних характеристик.

З метою порівняння величини залишкових напружень, що визначалися за запропонованим способом, і за формулою (1) при вимірюванні прогину пластини з використанням рівняння пружної лінії для балки, проведено іонне азотування пластин із сталі 40X товщиною 3 мм і довжиною 240 мм за аналогічними режимами, що наведені в таблиці 1. Результати вимірювань прогину та розрахунків за формулою (1) наведені в таблиці 2. Порівнюючи величини середніх залишкових напружень в табл. 1 і 2, бачимо, що різниця не перевищує 2,5%, що свідчить про добру збіжність результатів і прийнятність запропонованого способу визначення залишкових напружень в азотованих шарах.

Відомо [1], що в азотованих шарах твердість та модуль пружності пов'язані з 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 запропонована формула (8), з використанням якої одержані графіки (рис. 2) за даними табл. 1. 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.

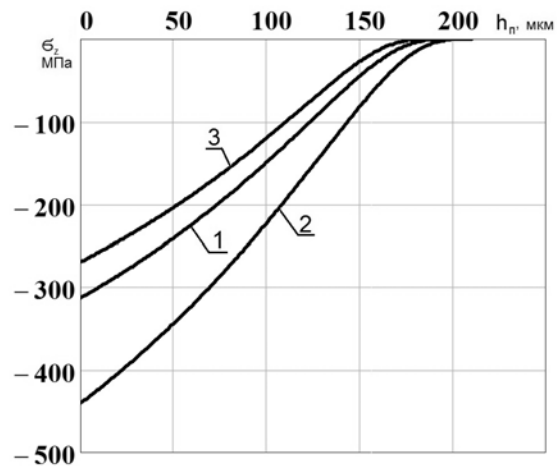


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень в азотованому шарі сталі 40X після іонного азотування в різних середовищах (1 – 100%N₂; 2 – 25%Ar + 75%N₂; 3 – 50%Ar + 50%N₂) при постійних значеннях інших факторів (T = 560°C; p = 265 Па; τ=3 год)

Таблиця 2

Залежність середніх залишкових напружень в сталі 40X після різних режимів іонного азотування з використанням рівняння (1) пружної лінії для балки

Режим азотування	Технологічні параметри				Мікротвердість H ₁₀₀ , МПа	Товщина покриття h _п , мкм	Прогин f, мм	Товщина основи H ₀ , мм	Середні залишкові напруження σ, МПа
	Температура T, °C	Тиск P, Па	Час азотування τ, год	Вміст азоту N ₂ в суміші, %					
1	560	235	3	100	6100	210	0,81	2,790	-162,2
2	560	235	3	75	9500	220	1,15	2,780	-230,3
3	560	235	3	50	5050	200	0,70	2,800	-140,2

Таблиця 3

Розподіл залишкових напружень по товщині азотованого шару після іонного азотування сталі 40X за різними режимами

Віддаль від поверхні покриття	Запропонований спосіб			Метод Давиденкова М.М.			Відхилення від методу Давиденкова М.М., %		
	Режим			Режим			Режим		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	-312	-440	-269	-300	-450	-250	4	2	8
25	-278	-395	-238	-290	-425	-238	4	7	0
50	-240	-344	-203	-260	-375	-208	8	8	2
75	-197	-286	-164	-210	-290	-157	6	1	4
100	-148	-222	-115	-145	-208	-100	2	7	15
125	-96	-152	-71	-94	-140	-63	2	9	13
150	-48	-81	-29	-55	-80	-35	13	1	17
175	-22	-35	-10	-26	-40	-12	15	13	17
200	-5	-10	0	-5	-12	0	0	17	0

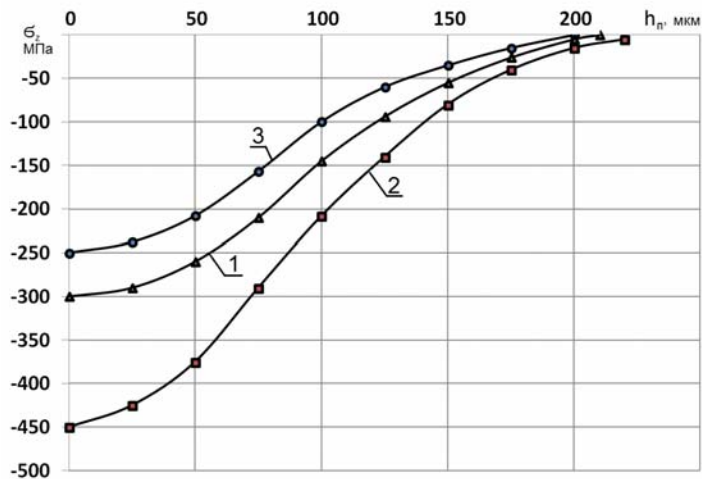


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень в азотованому шарі сталі 40X після іонного азотування в різних середовищах (1 – 100%N₂; 2 – 25%Ar + 75%N₂; 3 – 50%Ar + 50%N₂) при постійних значеннях інших факторів (T = 560°C; p = 265 Па; t=3 год)

На рис. 3 і табл. 3 показані графіки зміни залишкових напружень та величини по товщині азотованих шарів в пластинах із сталі 40X після іонного азотування за різними режимами (табл. 1), що визначалися за методом М.М. Давиденкова [5] і формулою (3).

Порівнюючи графіки рис. 2 і 3, бачимо, що вони близькі за характером зміни та величиною залишкових напружень по товщині азотованого шару. Різниця абсолютних значень залишкових напружень в відповідних точках азотованого шару (табл. 3), визначених за запропонованим способом і методом М.М. Давиденкова, є не значною, а відхилення в верхніх шарах дифузійного покриття між ними не перевищує 8 %.

Висновки

Таким чином, на основі проведених досліджень показано, що в азотованих шарах виникають залишкові напруження стиску, величиною яких можна керувати за рахунок зміни технологічних параметрів процесу азотування.

Запропонований спосіб визначення залишкових напружень в азотованих шарах дає результати, що близькі до існуючих в літературі способів, і є прийнятним для експериментальних досліджень розподілу залишкових напружень по товщині дифузійних покриттів. Даний спосіб характеризується простотою і не вимагає складного обладнання.

Література

1. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун П.В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.
2. Береговенко А.Ю. Влияние азотирования на демпфирующие свойства некоторых металлических материалов / А.Ю. Береговенко, В.Г. Каплун, А.П. Яковлев, И.М. Пастух // Проблемы прочности. – 1993. – № 8 – С. 73–77.
3. Самойлов Л.И. Определение термических напряжений в бездиффузионных жаростойких покрытиях системы (Co) SA / Л.И. Самойлов, И.А. Игнатов, А.М. Воробьев, В.С. Козлова // Заводская лаборатория. – 1984. – № 21. – С. 18–22.
4. Барвинок В.А. Определение остаточных напряжений в покрытиях плазменного напыления / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Ф.И. Катаев и др. // Сварочн. производство. – 1981. – № 5. – С. 11–15.
5. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений / Н.Н. Давиденков // Заводская лаборатория. – 1937. – № 8. – С. 987–990.
6. 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.
7. Биргер И.А. Остаточные напряжения / Биргер И.А. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
8. 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.
9. 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.
10. Каплун В.Г. Коррозионная стойкость стали 45X, азотированной в тлеющем разряде / В.Г. Каплун, А.Е. Рудык, Я.Н. Гладкий, М.С. Стечишин // Защитные покрытия на металлах. – 1987. – Вып. 21. – С. 75–77.
11. Трапезон А.Г. О влиянии вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана / А.Г. Трапезон, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Пробл. прочности. – 1995. – № 11-12. – С. 32–38.

12. 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.
13. Teixeira V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings / V. Teixeira // Vacuum. – 2002. – V. 64, № 3-4. – С. 393–399.
14. The interrelationship between internal stress, processing parameters and microstructure of physically vapour deposited and thermally sprayed coatings / D.S. Rickerby, G. Eckold, K.T. Scott / Thin Solid Films. – 1987. – V. 154, № 1-2. P. 125–141.
15. Пат. 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.
16. Пат. 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
17. 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.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р.

Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Капун В.Г.

УДК 669.1:537.5

І.М. ПАСТУХ, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ
Хмельницький національний університет

ВНУТРІШНІ ЛОКАЛЬНІ ВИНЯТКИ ПОВЕРХНІ, АЗОТОВАНОЇ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Кваліфіковані типи локальних винятків поверхні, розглянуто їх вплив на концентрацію електричного поля та її зміну як фактор нерівномірності результатів модифікації. Введено критерій концентрації поля, вирішена аналітична задача взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень можуть бути використані для точного визначення розподілу густини струму по поверхні як параметра технологічного режиму.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, поверхня, внутрішні локальні винятки.

I.M. PASTUKH, V.V. LUHOVEC
Khmelnitsky National University

INSIDE LOCAL EXCEPTIONS OF SURFACE NITRIDING BY GLOW DISCHARGE

The kinds of local exceptions of surface are qualified. Their influence on the concentration of the electric field and its change as a factor of the uneven modification results is considered. The criterion of concentration field is established. Analytical problem of relationship of surface geometry and parameters of the electric field is solved. The influence of the internal local exceptions size to the concentration of the electric field is investigated. The research results can be used for accurately determination of the current density distribution on the surface as a parameter of technological regime. The proposed analytical apparatus can be used for calculating the parameters of the electric field concentration in a glow discharge, which is used for the surface modification of metal parts.

Keywords: nitriding, glow discharge, surface, internal local exceptions.

Вступ

Розподіл густини струму по металевій поверхні, яка модифікується азотуванням в тліючому розряді, відіграє суттєву роль насамперед як параметр режиму, котрий відноситься до групи енергетичних характеристик технології. Наявність локальних винятків поверхні – як зовнішніх у вигляді гострих ребер, виступів, тощо, так і внутрішніх, що мають форму пазів, отворів – призводить в цих місцях до концентрації поля і густини струму. В свою чергу локальне підвищення передачі енергії, яке характерне для локальних винятків, обумовлює більш інтенсивне порівняно з рештою поверхні її нагрівання. Негативні наслідки подібного ходу процесу можуть призвести до місцевого перегрівання поверхні, відтак – до відпуску, зниження фізико-механічних показників модифікованої деталі. До подібних же наслідків призводить також більша порівняно з іншою частиною поверхні швидкість нагрівання садки.

Теоретичні основи взаємодії електричного поля із зовнішніми локальними винятками поверхні розглянуті в [1, 2]. Стосовно питань, пов'язаних з теорією внутрішніх локальних винятків поверхні, там же наводяться тільки самі загальні відомості про них та основні принципи вирішення задачі. З цієї причини головною метою цієї роботи є розробка аналітичних основ взаємодії електричного поля з внутрішніми локальними винятками поверхні. При цьому в якості моделі вибрано найбільш загальний варіант – внутрішній локальний виняток клиновидної форми. Пази прямокутного перетину, отвори відносно малого діаметра становлять окремі, більш простий варіант прийнято до розгляду схеми.