

УДК 621.726

В.Г. КАПЛУН, П.В. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР

Хмельницький національний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ТВЕРДОСТІ ПО ТОВЩИНІ АЗОТОВАНОГО ШАРУ ПРИ АЗОТУВАННІ В ТЛІЮЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглядаються питання математичного моделювання закономірностей розподілу твердості по товщині азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді різних матеріалів залежно від зміни технологічних параметрів процесу дифузійного насичення.

The questions of mathematical design of conformities to law of distribution of hardness are examined on the thickness of the nitrided layer at nitriding in the smouldering digit of different materials depending on the change of technological parameters of process of diffusive saturation.

Ключові слова: дифузія, азотування, тліючий розряд, твердість, азотований шар, товщина.

Досвід експлуатації механізмів і машин свідчить про те, що азотування є одним з ефективних способів зміцнення поверхні конструктивних елементів і значного підвищення їх експлуатаційних характеристик [1, 2, 7, 8]. Найбільш прогресивною технологією азотування є технологія газового азотування в плазмі тліючого розряду в безводневих насичуючих середовищах (сумішах азоту з аргоном), яка не тільки на порядок прискорює процеси дифузійного насичення поверхні азотом і його сполуками, але виключає водневе окрихчення металу і дозволяє керувати властивостями азотованого шару в широких межах [4, 6–9].

Експериментальні дослідження розподілу твердості по товщині азотованого шару багатьох авторів [1–5, 7, 8] показали (рис. 1), що твердість поступово зменшується від поверхні до основи за експоненціальною залежністю. При азотуванні в тліючому розряді різних матеріалів на характер розподілу твердості по товщині азотованого шару великий вплив мають технологічні параметри процесу азотування (температура, тиск, час дифузійного насичення, і склад середовища), які змінюють не тільки абсолютну величину твердості в кожній точці по товщині, але й величину градієнта твердості на різних ділянках в інтервалі від поверхні до основи (рис. 2). При цьому градієнт твердості по товщині азотованого шару є змінною величиною як для одного й того ж матеріалу, так і для різних матеріалів, що азотувалися.

Величина твердості матеріалу і її розподіл по товщині мають великий вплив на експлуатаційні характеристики конструкційних елементів (зносостійкість, втомну міцність при різних видах навантажень тощо). Ці характеристики потрібно знати при оцінці якості зміцнення поверхні та ефективності технологічного процесу для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик конструктивного елементу.

Експериментальне визначення характеру розподілу твердості по товщині азотованого шару методами металографії для кожного режиму процесу азотування є досить трудомістким, так як при наявності чотирьох змінних технологічних параметрах існує дуже велика кількість варіантів (4!) технологічних режимів. В зв'язку з цим створення математичної моделі визначення розподілу твердості по товщині азотованого шару залежно від технологічних параметрів процесу азотування є актуальним і важливим завданням як з наукової, так і з економічної точок зору.

Градієнт твердості в довільній точці по товщині азотованого шару $Grad H_i$ (рис. 2) знаходимо за формулою

$$Grad H_i = dH_i/dh_i = tg\alpha_i. \quad (1)$$

Математичну модель розподілу твердості по товщині азотованого шару при і азотуванні в тліючому розряді можна виразити наступною формулою:

$$H_i = H_0 + (H_{\max} \cdot k_4 - H_0) e^{-\frac{h_i}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (h_n - h_i)}} \quad (2)$$

Тоді

$$\frac{dH_i}{dh_i} = -(H_{\max} \cdot k_4 - H_0) \cdot e^{-\frac{h_i}{(h_n - h_i) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}} \cdot \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (h_n - h_i)} \quad (3)$$

де

H_0 – твердість основи;

$H_{\max}$ – твердість поверхні азотованого шару при оптимальному режимі азотування;

H_i – твердість i -го шару на відстані h_i від поверхні;

h_n – товщина азотованого шару, що складається з суми товщин нітридної зони h_n і зони внутрішнього азотування h_b , залежить від технологічних параметрів (температури T , тиску P , азотного потенціалу N_2 , часу дифузійного насичення τ) і визначається експериментально або на основі математичних

залежностей, одержаних з використанням планування експериментів [9, 10];

k_1, k_2, k_3, k_4 – коефіцієнти, що враховують вплив технологічних параметрів азотування в тліючому розряді на твердість.

З формули (3) видно, що товщина азотованого шару h_n має великий вплив на градієнт твердості по його товщині, який збільшується при зменшенні h_n .

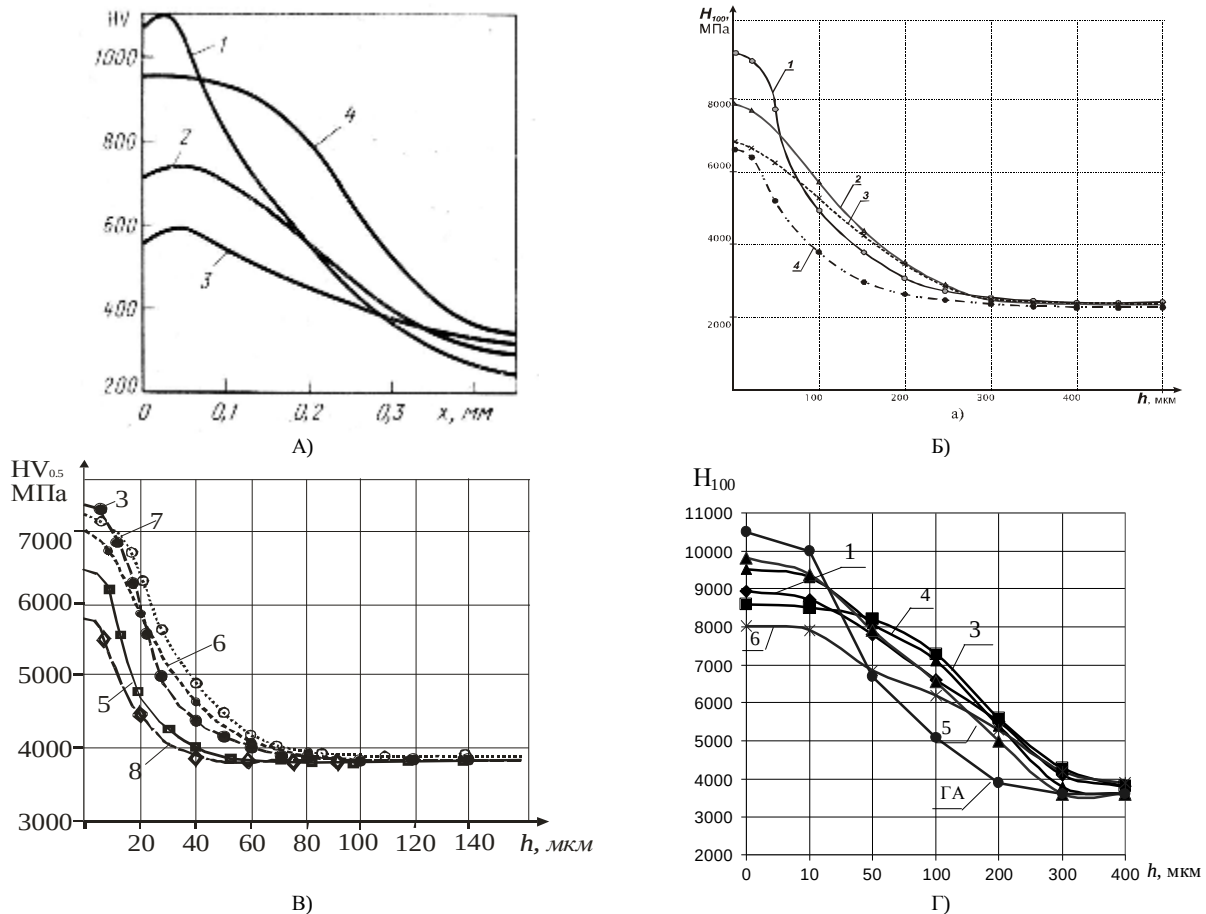


Рис. 1. Розподіл твердості по товщині азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді різних матеріалів за різними режимами:

- а) азотування сталей при 530°C, в середовищі аміаку, 1- 38Х2МЮА; 2- 30ХЗМФ; 3 – 40ХФА; 4 – 20ХЗМВФ [2];
 б) сталь ШХ15 після азотування в середовищі суміші 75 % N₂+25 % Ar протягом 4 годин за режимами: 1 – T = 570°C, P = 320 Па, τ = 240 хв.; 2 – T = 540°C, P = 320 Па; 3 – T = 570°C, P = 80 Па; 4 – T = 480°C, P = 240 Па [7];
 в) титановий сплав ВТ8 після азотування середовищі суміші 52 % N₂+48 % Ar протягом 4 годин за режимами: 3 – T- 660°C, P-160 Па; 5 – T-560°C, P-240 Па; 6 – T-680°C, P-240 Па; 7 – T-620°C, P-125 Па; 8 – T-620°C, P-355 Па [8];
 г) ГА – газове азотування сталі 38ХМЮА в середовищі аміаку при температурі 540°C протягом 45 годин та азотуванні в тліючому розряді в середовищі суміші 75 % N₂+25 % Ar протягом 8 годин за режимами: 1 – T-600°C, P-320 Па; 3 – T-600°C, P-160 Па; 4 – T-520°C, P-160 Па; 5 – T-500°C, P-240 Па; 6 – T-620°C, P-240 Па [4]

Експериментальні дослідження [4, 6– 9] показують, що існують екстремальні залежності твердості від технологічних параметрів процесу азотування (температури T , тиску в вакуумній камері P і азотного потенціалу N в дифузійному середовищі), які при оптимальних їх значеннях забезпечують максимальну твердість поверхні для даного матеріалу. Ці залежності в загальному виді можуть бути описані рівнянням 2-го порядку

$$y = a \cdot X^2 + bX + c, \quad (4)$$

де X – технологічний параметр процесу азотування;
 a, b, c – коефіцієнти, що характеризують вид кривої.

В нашому випадку крива (4), що описує залежність твердості від кожного технологічного параметру процесу азотування, є параболою з вертикальною віссю ($x = -b/2a$), в якій $a < 0$ і функція спочатку зростає, досягаючи максимуму, а потім спадає (рис. 3а). Екстремум функції точка А має координати $x = -b/2a$ і

$$y = \left(4ac - b^2\right) / 4a. \text{ Точка В перетину функції (4) з віссю } y \text{ має координати В } (0, c).$$

Вплив кожного з технологічних параметрів (T, P, N) на твердість азотованого шару H_T, H_P, H_N буде описуватися рівнянням (4), в якому змінна X буде замінена відповідним технологічним параметром і вільний член C при нульових значеннях технологічних параметрів T, P, N прийме значення H_0 , а саме:

$$H_T = aT^2 + bT + H_0, \quad (4a)$$

$$H_P = aP^2 + bP + H_0, \quad (4б)$$

$$H_N = aN^2 + bN + H_0. \quad (4в)$$

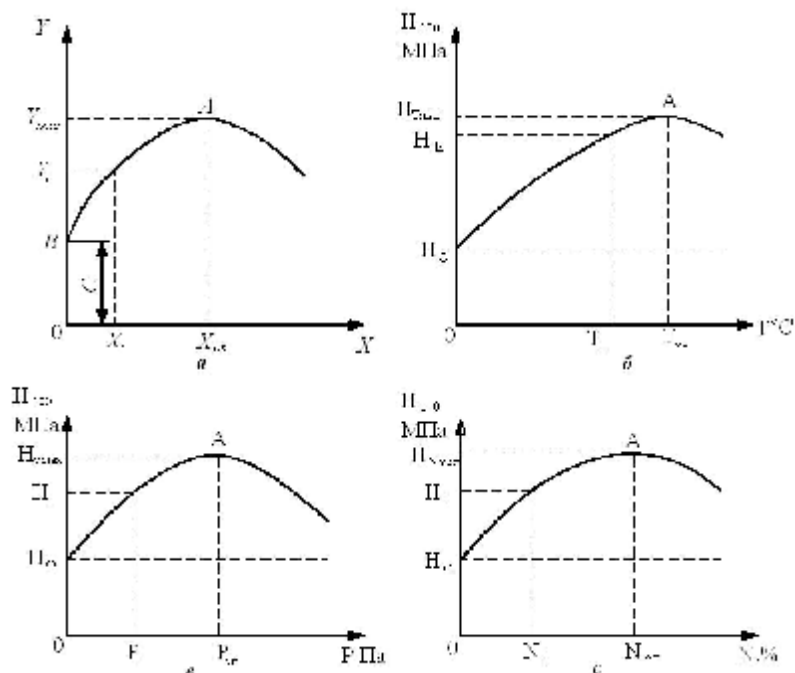


Рис. 2. Вплив технологічних параметрів процесу азотування на твердість азотованого шару

Вплив температури T на процес дифузійного насичення при азотуванні матеріалу визначається коефіцієнтом k_1 . Температура T при азотуванні сталей і чавунів змінюється в межах від 500 до 600 °С.

$$k_1 = H_T / H_{Tmax}, \quad (5)$$

де H_T – твердість даної марки сталі при заданій температурі азотування і визначається за формулою (4а, рис. 3б);

H_{Tmax} – максимальна твердість сталі при оптимальній температурі азотування.

Коефіцієнт k_2 описує вплив тиску P на твердість азотованого шару. Тиск P при азотуванні сталей і чавунів змінюється в межах від 80 до 600 Па.

$$k_2 = H_P / H_{Pmax}, \quad (6)$$

де H_P – значення твердості даної марки сталі при азотуванні з заданим тиском P і визначається за формулою (4б, рис. 3в);

H_{Pmax} – максимальне значення твердості поверхні азотованого шару при оптимальному тиску в вакуумній камері.

Коефіцієнт k_3 описує вплив азотного потенціалу N_2 % в насичуючій суміші на твердість азотованого шару дано говиду матеріалу. Діапазон зміни азотного потенціалу при азотуванні сталей знаходиться в межах від 10 до 100 % N_2 .

$$k_3 = H_N / H_{Nmax}, \quad (7)$$

де H_N – твердість матеріалу після азотування при заданому азотному потенціалі в насичуючій суміші і визначається за формулою (4в, рис. 3с);

H_{Nmax} – максимальна твердість азотованого шару при оптимальному значенні азотного потенціалу в процесі азотування.

При азотуванні в тліючому розряді постійно діють два конкуруючих процеси: дифузії та утворення нітридів і зворотного катодного розпилення. Співвідношення цих конкуруючих процесів впливає на фазовий склад поверхневого шару та його властивості: твердість, пластичність, товщину нітридної зони. При значній перевазі катодного розпилення над процесом нітридоутворення і дифузії можна отримати азотовані шари без нітридної зони, а лише зону внутрішнього азотування з твердим розчином азоту в металі, яка має невисоку твердість. Співвідношення цих конкуруючих процесів при азотуванні в тліючому розряді враховується коефіцієнтом k_4 .

$$k_4 = k_1^2, k_2, k_3. \quad (8)$$

Таким чином, маючи значення коефіцієнтів k_1, k_2, k_3, k_4 , товщину азотованого шару h_n , вихідну твердість матеріалу H_0 , технологічні параметри оптимального режиму азотування в тліючому розряді і значення максимальної твердості H_{max} азотованого шару при оптимальному режимі дифузійного насичення, використовуючи формулу (2), можна розрахувати розподіл твердості по товщині азотованого шару при різних режимах азотування.

Розглянемо розрахунок твердості по товщині азотованого шару на прикладі сталей ШХ15 і 38ХМЮА, що азотувалися в тліючому розряді за різними режимами (рис. 1б і 1г). Оптимальний режим азотування сталі ШХ15: $T=560^\circ\text{C}$; $P = 240$ Па; $N_2 = 65$ %; час дифузійного насичення – 4 год. Максимальна

твердість поверхні після азотування $H_{\max} = 10000$ МПа. Твердість основи $H_0 = 2800$ МПа. Товщина азотованого шару 300 мкм. Оптимальний режим азотування для сталі 38ХМЮА: $T = 520^\circ\text{C}$; $P = 240$ Па; $N_2 = 75\%$; час дифузійного насичення – 4 год. Максимальна твердість поверхні після дифузійного насичення $H_{\max} = 9800$ МПа. Твердість основи $H_0 = 3800$ МПа. Товщина азотованого шару – 290 мкм.

Рівняння, що описують вплив технологічних факторів на твердість сталі ШХ15, будуть мати наступний вигляд:

$$H_T = -0,024T^2 + 26,8T + 2800, \quad (4a')$$

$$H_P = -0,13P^2 + 62,5P + 2800, \quad (4б')$$

$$H_N = -1,8N^2 + 230,8N + 2800, \quad (4в')$$

Рівняння, що описують вплив технологічних факторів на твердість сталі 38ХМЮА, будуть мати наступний вигляд:

$$H_T = -0,022T^2 + 23,1T + 3800, \quad (4a'')$$

$$H_P = -0,1P^2 + 50P + 3800, \quad (4б'')$$

$$H_N = -1,07N^2 + 160N + 3800, \quad (4в'')$$

Рівняння, що описують вплив технологічних факторів на твердість титанового сплаву ВТ– 8, будуть мати наступний вигляд:

$$H_T = -0,007T^2 + 10,57T + 3800, \quad (4a''')$$

$$H_P = -0,144P^2 + 56,5P + 3800, \quad (4б''')$$

$$H_N = -1,42N^2 + 148,0N + 3800, \quad (4в''')$$

Значення коефіцієнтів k_1, k_2, k_3, k_4 для даних сталей і відповідних режимів азотування (рис. 1б, рис. 1в і рис. 1г), знайдені за формулами (5 – 8), наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів k_1, k_2, k_3, k_4 для різних режимів азотування в тліючому розряді

№ реж.	Режим азотування			Коефіцієнти			
	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$	$N_2, \%$		k_2	k_3	k_4
Сталь ШХ15							
1	570	320	75	0,998	0,92	0,981	0,90
2	540	150	75	0,997	0,85	0,981	0,85
3	570	80	75	0,998	0,667	0,981	0,653
4	480	240	75	0,983	1	0,981	0,964
Сталь 38ХМЮА							
1	600	320	85	0,994	0,975	0,9	0,89
3	600	160	85	0,994	0,943	0,875	0,84
4	520	160	75	1,0	0,943	1	0,943
5	500	240	75	1,0	1	1	1
6	620	240	95	0,985	1	0,81	0,8
7	520	80	25	1,0	0,73	0,73	0,53
8	600	400	10	0,994	0,796	0,54	0,43
Титановий сплав ВТ8							
3	660	160	52	0,99	0,96	1	0,95
5	560	240	52	0,96	0,85	1	0,82
6	680	240	52	0,99	0,85	1	0,84
7	620	125	52	0,98	0,94	1	0,92
8	620	355	52	0,98	0,26	1	0,25

На основі рівняння (2) і значень коефіцієнтів k_1, k_2, k_3, k_4 (табл. 1) побудовані графіки розподілу твердості по товщині азотованих шарів сталей ШХ15 і 38ХМЮА (рис. 3) після азотування за різними режимами. Порівнюючи дані графіки з графіками рис. 1б і рис. 1г, які побудовані на основі експериментальних вимірювань, бачимо, що вони подібні і мало відрізняються від експериментальних.

Таким чином, запропонована модель (2) і методика розрахунку може використовуватися для наближеного визначення і побудови графіків розподілу твердості по товщині азотованого шару при азотуванні різних сталей в тліючому розряді за різними технологічними режимами.

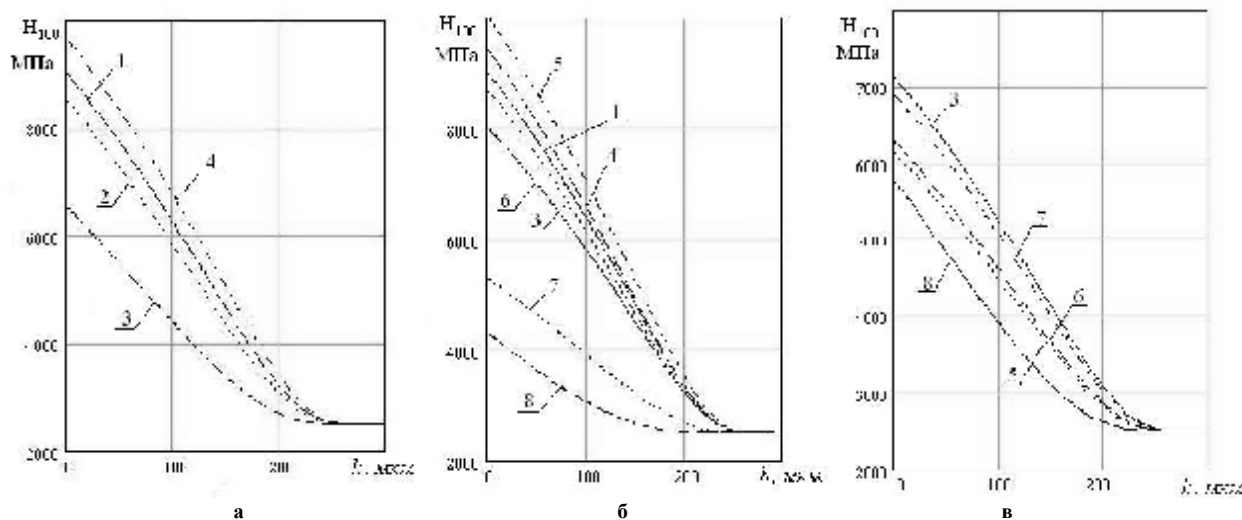


Рис. 3. Розподіл твердості по товщині азотованих шарів за різними режимами азотування в тліючому розряді (табл. 1), розрахований за формулою (2): а – сталь 38ХМЮА, б – сталь 38ХМЮА, в – титановий сплав BT8

Література

1. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Ипис, З. Бемер // М. Металлургия, – 1991. – 320 с.
2. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах / Арзамасов Б.Н. – М., Машиностроение. – 1976. – 224 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю. Елисеев, Т.А.Панайоти // М.,Изд.МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – 400 с.
4. Каплун В.Г. Оптимізація технології азотування сталі 38ХМЮА в тліючому розряді за параметрами зносостійкості в розплаві склонаповнених пластмас / В.Г. Каплун, П.В.Матвійшин, Н.С. Машовець // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2011. – № 3. – С. 106 – 109.
5. Прокошин Д.А. Исследование ионного азотирования титана / Д.А. Прокошкин, Т.А. Панайоти, Г.В. Соловьев // Изв. Вузov, Машиностроение. – 1995. – № 5. – С. 107– 110.
6. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков, ХФТИ. – 2006. – 364 с.
7. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Каплун П.В. – К., 2004. – 181 с.
8. Машовець Н.С. Трибологічні характеристики титанових сплавів після низькотемпературного безводневого азотування в тліючому розряді: дис. ... канд. тех. наук 05.02.04. / Машовець Н.С. – Хмельницький, 2009. – 194 с.
9. Каплун В.Г. Оптимизация технологии ионного азотирования в безводородных средах по параметрам прочности / В.Г.Каплун, Н.Ф. Семенюк, А.В. Паршенко // Управление трибологическими и прочностными свойствами механических систем. К., УМКВО. – 1990. – С. 113– 118.
10. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Б.В.Филаретов. – Минск: Изд. БГУ, 1982. – 302 с.

Надійшла 5.5.2012 р.
Статтю представляє: дт.н. Каплун В.Г.

УДК 621.78/ (66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, М.В. ЛУК'ЯНИЮК, В.О. КУРСКАЯ
Хмельницький національний університет

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ВМІКАННЯ СТРУМУ В УСТАНОВЦІ ДЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Виконано аналіз зміни струму в установці для азотування в тліючому розряді зі змінним живленням

The analysis of change of current is executed in a nitridings plant in a gas discharge with a variable feed

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, вмикання, струм

В роботі [1] обґрунтовані початкові положення визначення електричних параметрів технологічного режиму азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням. Там же встановлено, що в подальшому варіанти моделі камери у вигляді дипольника індуктивного характеру передбачається використати для