

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, С.О. Прокудін

**Методичні вказівки
до виконання курсової роботи з дисципліни
"Фізико-хімічні основи створення покриттів"
та курсового проекту з дисципліни
"Технологія напилення покриттів"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2006

УДК 621.792: 621.793 (076)

Дубовий О.М., Янковець Т.А., Прокудін С.О. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Фізико-хімічні основи створення покриттів" та курсового проекту з дисципліни "Технологія напилення покриттів". – Миколаїв: НУК, 2006. – 52 с.

Подано загальні вимоги, теоретичні передумови та рекомендації щодо тематики, змісту, порядку виконання та структури курсової роботи з дисципліни "Фізико-хімічні основи створення покриттів" і курсового проекту з дисципліни "Технологія напилення покриттів".

Методичні вказівки призначені для студентів та магістрів спеціальності 8.090103 "Композиційні та порошкові матеріали, покриття".

Рецензент канд. техн. наук Івлієв А.І.

ВСТУП

Захист деталей машин і металоконструкцій від корозії та зносу, підвищення довговічності машин та механізмів є однією з важливих міжнародних проблем. Близько 30 % щорічної виплавки металу або втрачається безповоротно у вигляді продуктів корозії та зносу, або перетворюється на металобрухт. Утрати робочого часу через поломки устаткування становить близько 80 % загального часу простою. Витрати на експлуатацію наближаються до вартості самого устаткування.

Одним із основних ефективних напрямів боротьби з корозією та зносом є застосування захисних покриттів. Механічна міцність деталі гарантується за рахунок використання одного матеріалу, а опір дії зовнішніх факторів забезпечується локальним формуванням на її поверхні тонких шарів зі спеціальними функціональними властивостями.

Серед різних технологій нанесення покриттів за останній час інтенсивного розвитку набула група газотермічних методів, із них найбільш універсальним є плазмовий.

Плазмове напилення – прогресивний технологічний процес нанесення покриттів. Під час плазмового напилення матеріал покриття у вигляді порошку або проволочки вводиться в плазмовий струмінь, де він інтенсивно нагрівається, плавиться, розпилюється і при взаємодії з поверхнею деталі, що обробляється, утворює покриття.

Ефективність плазмового струменя і, головним чином, усього процесу напилення визначається його енергетичними характери-

стиками, тобто здатністю перетворювати електричну енергію на теплову та передавати її матеріалу, що наноситься. Подальше удосконалення плазмового напилення здійснюється переважно шляхом автоматизації процесу та оптимізації технологічних параметрів.

Під час виконання курсової роботи і курсового проектування студенти набувають навичок моделювання технологічного процесу напилення покриттів, аналізування отриманих результатів розрахунків, визначення й оптимізації технологічних параметрів плазмового нанесення покриттів, розробки технологічного процесу, проектування ділянки та окреслювання економічної ефективності розробленої технології.

1. ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ "РОЗРАХУНОК І АНАЛІЗ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВОГО СТРУМЕНЯ"

Початкові дані завдання визначаються варіантом, номер якого складається із трьох цифр (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Варіанти завдань курсової роботи

Перша цифра варіанта (плазмоутворюючий газ)	1	Азот (N ₂)
	2	Аргон (Ar)
	3	Гелій (He)
	4	Водень (H ₂)
	5	Повітря (0,79N ₂ + 0,21O ₂)
Друга цифра варіанта (тип плазмотрона)	1	ПН-14М; $W_p = 7300$ Вт
	2	ПН-7; $W_p = 10500$ Вт
Третя цифра варіанта (тиск і ви- трата плазмоутворюю- чого газу)	1	$P = 405200$ Па; $V_r = 0,0003$ м ³ /с
	2	$P = 506500$ Па; $V_r = 0,0004$ м ³ /с

Наприклад, варіант № 412 розшифровує умови створення водневої (H₂) плазми (перша цифра 4) за допомогою плазмотрона ПН-14М зі значенням потужності, яка розсіюється у плазмотроні $W_p = 7300$ Вт (друга цифра 1) та при заданих значеннях тиску і витрати плазмоутворюючого газу $P = 506500$ Па, $V_r = 0,0004$ м³/с (третя цифра 2).

Розрахунки здійснювати для таких значень електричної потужності, яка подається на плазмотрон, кВт: 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60.

При цьому необхідно:

за допомогою програми (див. дод. А) отримати дані, побудувати та проаналізувати графіки залежності ступеня однократної іонізації від середньомасової температури на зрізі сопла плазмотрона при заданих значеннях електричної потужності (див. дод. Б, рис.1);

за допомогою програми (див. дод. А) отримати дані, побудувати та проаналізувати графік залежності питомої теплоємності плазмового струменя від його середньомасової температури на зрізі сопла плазмотрона при заданих значеннях електричної потужності (для ступеня однократної іонізації $\alpha \leq 0,95$) (див. дод. Б, рис. 2);

за допомогою програми (див. дод. А) отримати значення залежності швидкості плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона від середньомасової температури для таких витрат плазмоутворюючого газу $V_{\text{г}}$, м³/с: $3 \cdot 10^{-4}$; $4 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$ та $6 \cdot 10^{-4}$; побудувати та проаналізувати графіки отриманих залежностей (див. дод. Б, рис. 3);

розрахувати середньомасову температуру плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона за питомим внеском енергії (методика наведена у п.2.2) при заданих значеннях електричної потужності; побудувати графіки залежності середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона, значення якої отримано за цією методикою та за методикою, що ґрунтується на законі збереження енергії від заданих значень електричної потужності; проаналізувати їх і дати пояснення щодо причин розбіжності значень (див. дод. Б, рис. 4);

дати порівняльну характеристику фізико-хімічних процесів, які відбуваються при плазмовому напилюванні порошків із металічних сплавів інертними газами і повітрям та проаналізувати їх вплив на фізико-механічні властивості покриттів.

Курсова робота оформлюється відповідно до вимог ЕСКД і ЕСТД. Обсяг пояснювальної записки 20...25 аркушів формату А4.

Курсова робота захищається у встановлений керівником термін (початок III декади травня).

2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОЗРАХУНКУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВОГО СТРУМЕНЯ

2.1. Розрахунок середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла на основі закону збереження енергії

Оптимізація процесу плазмового напилювання покриттів є визначальним чинником під час розробки технології. Оскільки його специфіка не дозволяє надійно визначити температуру струменя на зрізі сопла плазмотрона $T_{3,c}$ експериментально, то математичне моделювання набуває особливо важливого значення для оптимізації й автоматизації плазмового напилювання.

Температуру струменя на зрізі сопла плазмотрона здебільшого визначають експериментально (відносна похибка отриманих значень може перевищувати 30 %), або на основі термодинамічних розрахунків без урахування змін тиску $P_{пл}$, питомої теплоємності плазми $C_{рг}$ і ступеня іонізації α (дисоціації x). Усе це спотворює результати аналізу процесів тепломасопереносу й оптимізацію технології напилювання. Математичний опис процесів формування плазмового струменя в каналі технологічного плазмотрона, розроблений на підставі сучасних уявлень про фізику плазми і на основі закону збереження енергії, являє собою систему чотирьох рівнянь виду:

$$P_{пл} = \frac{P}{3}(i+5) - \frac{2\mu_{г}}{3R} c_{рг} P; \quad (1)$$

$$c_{рг} = \frac{R}{2\mu_{г}} \left[i + 2 + \frac{e_0^3 \alpha^{3/2} \sqrt{P}}{K^2 T_{пл}^2 \epsilon_0^{3/2}} \right]; \quad (2)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{B}{1+B}}; \quad B = 3,2 \cdot 10^{-2} a^2 T_{пл}^{5/2} P_{пл}^{-1} \exp\left(-\frac{11600\phi_{г}}{T_{пл}}\right); \quad (3)$$

$$\frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{p\Gamma}}{RT_0}T_{3.c}^2 - \left[W - W_p + \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{p\Gamma}}{R} \right] T_{3.c} + \frac{E_{\Gamma}PV_{\Gamma}X}{K} + \frac{2\varphi_{\Gamma}e_0PV_{\Gamma}\alpha^2}{K(i+\alpha)} = 0, \quad (4)$$

де $T_{3.c}$ – температура плазми на зрізі сопла плазмотрона, К; $c_{p\Gamma}$ – питома теплоємність газу, кДж/ (кг·К); e_0 – заряд електрона, Кл; K – стала Больцмана, Дж/К; ϵ_0 – електрична стала, Ф/м; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); i – число ступенів вільності; μ_{Γ} – молярна маса газу плазми, кг/моль; φ_{Γ} – перший потенціал іонізації газу, В; a – коефіцієнт, залежить від положення елемента в періодичній системі; E_{Γ} – енергія дисоціації газу, Дж; T_0 , P – початкові температура і тиск плазмоутворюючого газу, α – ступінь однократної іонізації плазмоутворюючого газу; V_{Γ} – об'ємна витрата плазмоутворюючого газу, м³/с; W – електрична потужність, яка подається на плазмотрон, Вт; W_p – потужність, яка розсіюється у плазмотроні, Вт; $W_p = m_b c_b T$; m_b – масова витрата охолоджуючої води, кг/с; c_b – питома теплоємність води; $c_b = 4190$ Дж/(кг·К); T – зміна температури води на вході і виході із плазмотрона.

Розв'язання цієї системи методом ітерацій на ПЕОМ дозволяє установити уточнену залежність $T_{3.c}$, а від конструкції плазмотрона, роду і витрати плазмоутворюючого газу, а також величини потужності, яка подається на плазмотрон. Отримані результати узгоджуються з літературними й експериментальними даними. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі, що дозволяє визначити температуру плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона (див. систему рівнянь (1)–(4)), зроблена калориметруванням на спеціально створеній установці, показала, що відносна похибка у визначенні $T_{3.c}$ розрахунковим шляхом не перевищує 7 %. Якщо відома температура струменя на зрізі сопла плазмотрона, то можна розрахувати і швидкість струменя у тому ж місці за виразом

$$v_{3.c} = \frac{RT_{3.c}\rho_0V_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}P_0S},$$

де ρ_0 – густина газу плазми за нормальних умов, кг/м³; P_0 – тиск

навоколишнього середовища, Па; S – площа перерізу сопла плазмотрона, м².

Для одноатомних газів (Ar, He) система рівнянь (1)–(4) має вигляд:

$$P_{\text{пл}} = \frac{8P}{3} - \frac{2\mu_{\Gamma}}{3R} c_{Pr} P; \quad (5)$$

$$c_{Pr} = \frac{R}{2\mu_{\Gamma}} \left[5 + \frac{e_0^3 \alpha^{3/2} \sqrt{P}}{K^2 T_{\text{пл}}^2 \epsilon_0^{3/2}} \right]; \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{B}{1+B}}; \quad B = 3,2 \cdot 10^{-2} a^2 T_{\text{пл}}^{5/2} P_{\text{пл}}^{-1} \exp\left(-\frac{11600\phi_{\Gamma}}{T_{\text{пл}}}\right); \quad (7)$$

$$\frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{Pr}}{RT_0} T_{3.c}^2 - \left[W - m_{\text{в}}c_{\text{в}}T + \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{Pr}}{R} \right] T_{3.c} + \frac{2\phi_{\Gamma}e_0PV_{\Gamma}\alpha^2}{K(i+\alpha)} = 0. \quad (8)$$

Для азоту і водню при температурах вище 3000 К:

$$P_{\text{пл}} = \frac{10P}{3} - \frac{2\mu_{\Gamma}}{3R} c_{Pr} P; \quad (9)$$

$$c_{Pr} = \frac{R}{2\mu_{\Gamma}} \left[7 + \frac{e_0^3 \alpha^{3/2} \sqrt{P}}{K^2 T_{\text{пл}}^2 \epsilon_0^{3/2}} \right]; \quad (10)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{B}{1+B}}; \quad B = 3,2 \cdot 10^{-2} a^2 T_{\text{пл}}^{5/2} P_{\text{пл}}^{-1} \exp\left(-\frac{11600\phi_{\Gamma}}{T_{\text{пл}}}\right); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{Pr}}{RT_0} T_{3.c}^2 - \left[W - m_{\text{в}}c_{\text{в}}T + \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{Pr}}{R} \right] T_{3.c} + \\ & + \frac{E_{\Gamma}PV_{\Gamma}X}{K} + \frac{2\phi_{\Gamma}e_0PV_{\Gamma}\alpha^2}{K(i+\alpha)} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Для повітря при температурах вище 3000 К:

$$P_{\text{пл}} = \frac{11P}{3} - \frac{2\mu_{\Gamma}}{3R} c_{Pr} P; \quad (13)$$

$$c_{Pr} = \frac{R}{2\mu_{\Gamma}} \left[8 + \frac{e_0^3 \alpha^{3/2} \sqrt{P}}{K^2 T_{\text{пл}}^2 \epsilon_0^{3/2}} \right]; \quad (14)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{B}{1+B}}; \quad B = 3,2 \cdot 10^{-2} a^2 T_{\text{пл}}^{5/2} P_{\text{пл}}^{-1} \exp\left(-\frac{11600\phi_{\Gamma}}{T_{\text{пл}}}\right); \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{Pr}}{RT_0} T_{3.c}^2 - \left[W - m_B c_B T + \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{Pr}}{R} \right] T_{3.c} + \\ & + \frac{E_{\Gamma} P V_{\Gamma} X}{K} + \frac{2\phi_{\Gamma} e_0 P V_{\Gamma} \alpha^2}{K(i+\alpha)} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Для того щоб привести вирази (5)–(16) до вигляду, зручного для розрахунків на ПЕОМ, необхідно скористатися теплофізичними параметрами плазмоутворюючих газів.

Взагалі, останнє квадратне рівняння зручніше для розрахунків на ПЕОМ подати у такому вигляді, як, наприклад, для Ar:

$$T_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{\alpha^{3/2} N_A^{3/2} e_0^3}{\epsilon_0^{3/2} \sqrt{\frac{KR^3}{P} \left(\frac{W}{P V_{\Gamma}} - 2,5 - 2c_i \phi_{\Gamma} e_0 \frac{\alpha}{K T_{\text{пл}}} \right)}}}$$

Витрата плазмоутворюючого газу в середньому становить $(3...6) \cdot 10^{-4}$ м³/с (тиск 303900...506500 Па).

Електрична потужність, яка подається на плазмотрон, здебільшого на практиці складає 20...60 кВт.

У рівняння (12), (16) входять ще ступінь дисоціації X , енергія дисоціації молекули газу E_{Γ} , втрати потужності в електродах (каналі) плазмотрона W_p , які необхідно визначити.

Ступінь дисоціації X визначається через константу рівноваги реакції дисоціації:

$$X = \sqrt{\frac{K_p}{4P + k_p}}. \quad (17)$$

Константа рівноваги реакції дисоціації K_p визначається в залежності від термодинамічних властивостей плазмоутворюючого газу.

Температура дисоціації залежить переважно від роду газу і його парціального тиску. Прийmemo, що T відповідає рівновазі реакції дисоціації, наприклад, азоту $N \leftrightarrow 2N$. Тоді константа рівноваги, що залежить від тиску, визначиться з виразу

$$K_p = K_N P^n, \quad (18)$$

де K_N – константа рівноваги, виражена через мольні частки; n – збільшення числа молей газоподібних речовин у реакції; P – загальний тиск системи, Па.

У даному випадку це тиск плазмоутворюючого газу. На практиці при стандартних (нормальних) умовах K_p визначається з виразу

$$\lg K_p = -\frac{H_T^0}{19,15T} + \frac{S_T^0}{19,15}, \quad (19)$$

де H_T^0 – зміна ентальпії при заданій температурі, Дж/моль; S_T^0 – зміна ентропії при заданій температурі, Дж/(моль·К).

Для нестандартних умов вираз (19) набуде такого вигляду:

$$\lg K_p = -\frac{H_T^0}{19,15T} + \frac{S_T^0}{19,15} - \lg \Pi,$$

де Π – поправка, яка враховує нестандартні умови. У даному випадку $\Pi = P^{-1}$, тоді

$$\lg K_p = -\frac{H_T^0}{19,15T} + \frac{S_T^0}{19,15} - \lg P,$$

де P – тиск плазмоутворюючого газу, Па.

Для розрахунку K_p користуються довідковими значеннями H_{298}^0 і S_{298}^0 (за нормальних умов).

Зміна ентальпії визначиться за рівнянням Гесса:

$$H_T^0 = \sum_{i=1}^{N_2} (n_i H_{298}^0)_{\text{к.}} - \sum_{i=1}^{N_1} (n_i H_{298}^0)_{\text{п.}} \quad (20)$$

де n_i – число молей відповідного газу; N_1, N_2 – кількість речовин (початкових, кінцевих).

Зміна ентропії визначиться за виразом

$$S_T^0 = \sum_{i=1}^{N_2} (n_i S_{298}^0)_{\text{к.}} - \sum_{i=1}^{N_1} (n_i S_{298}^0)_{\text{п.}} \quad (21)$$

Підставляючи відповідні дані у рівняння (20) і (21), одержимо відповідні значення H і S для двохатомних плазмоутворюючих газів. Досвід експлуатації різних плазмотронів, у тому числі при напилюванні в динамічному вакуумі, показав, що тиск плазмоутворюючих газів у більшості випадків складає близько 4...5 атмосфер (405300...506625 Па). Тоді вираз для визначення константи рівноваги, що залежить від тиску, з урахуванням поправки набуде вигляду:

для азоту:

$$\lg K_p = -\frac{49295}{T} + 6,37; \quad (22)$$

для водню:

$$\lg K_p = -\frac{22765}{T} + 5,85T; \quad (23)$$

для кисню:

$$\lg K_p = -\frac{26623}{T} + 6,80. \quad (24)$$

Для визначення K_p за формулою (1/8) визначимо K_N і n . Константу рівноваги можна виразити через мольні частки: $KN = 1$. Збільшення кількості молей газоподібних речовин, що беруть участь у реакції, визначиться таким чином: $n = 1$.

Тоді, підставляючи відповідні значення KN, P і n у рівняння (18), одержимо значення $K_p = 5$.

Якщо відомо K_p , тоді за виразами (22)–(24) визначимо температури рівноваги дисоціації. Розрахунки дають наступні такі рівноважних температур дисоціації:

для азоту $T = 8700$ К;

для водню $T = 4420$ К;

для кисню $T = 4270$ К;

для повітря $T = 7770$ К.

Для приблизних розрахунків рівноважних температур дисоціації можна знехтувати втратою потужності, яка витрачається на дисоціацію. Однак ці втрати досить значні і з підвищенням температури збільшуються і вносять велику помилку у розрахунки. Для досить достовірних розрахунків третім членом рівнянь (12), (16) знехтувати не можна і для його визначення необхідно знати енергію дисоціації молекули плазмоутворюючого газу.

Енергію дисоціації моля газу можна визначити з виразу

$$E = RT^2 \frac{d \ln K_p}{dT} \quad (25)$$

Підставивши вирази (22)–(24) у (25) і здійснивши диференціювання, отримаємо:

для азоту $E = 113378,5 R$;

для водню $E = 52359,5 R$;

для кисню $E = 59850,6 R$.

Підставивши в отримані вирази значення універсальної газової постійної R і розділивши на число Авогадро N_A , одержимо наступні значення енергії дисоціації молекул плазмоутворюючих газів:

для азоту $E = 15,65 \cdot 10^{-19}$ Дж;

для водню $E = 7,23 \cdot 10^{-19}$ Дж;

для кисню $E = 8,26 \cdot 10^{-19}$ Дж;

для повітря $E = 0,21 \cdot 8,26 \cdot 10^{-19} + 0,79 \cdot 15,65 \cdot 10^{-19} = 14,10 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Для визначення ступеня дисоціації як функції від температури необхідно визначити значення K_p . Визначимо K_p із виразів (22)–(24):

для азоту $K_p = 10^{-\frac{49295}{T} + 6,37}$;

для водню $K_p = 10^{-\frac{22765}{T} + 5,85}$;

для кисню $K_p = 10^{-\frac{26023}{T} + 6,80}$.

Підставляючи отримані значення K_p у формулу (17), одержимо вираз залежності ступеня дисоціації плазмоутворюючих газів від температури.

Втрати електричної потужності в електродах (каналі) плазмотрона можна приблизно розрахувати, якщо прирівняти їх до втрат на нагрівання охолоджуючої води $W_p = m_b c_b T$.

Для визначення втрат потужності в електродах (каналі) плазмотрона необхідно знати витрату m_b і зміну температури води на виході з плазмотрона T .

У роботі (розрахунках) використовуються два типи плазмотронів (ПН-14М і ПН-7), для яких характерні відповідні середні витрати для охолодження води 0,13 кг/с (8 л/хв) і 0,17 кг/с (10 л/хв). Зміни температури води відповідно такі: 13 і 15 К.

Розрахунки дають наступні значення W_p : для ПН-14м – 7300 Вт; для ПН-7 – 10500 Вт.

2.2. Розрахунок середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона за питомим внеском енергії

Методика розрахунку середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона за питомим внеском енергії полягає у наступному [10]. Оскільки струмінь утворюється шляхом нагрівання за допомогою електричної дуги, величина питомого внеску енергії ε , кВт·год/м³, пов'язана із ентальпією співвідношенням

$$\varepsilon = \frac{H - H_0}{3600V_0},$$

де H – ентальпія плазмового струменя, кДж/кг; H_0 – ентальпія початкових плазмоутворюючих газів за стандартних умов, кДж/кг; V_0 – питомий об'єм плазмоутворюючого газу, м³/кг.

З іншого боку,

$$\varepsilon = \frac{W - W_p}{V_\Gamma},$$

де W – електрична потужність, яка подається на плазмотрон, кВт; W_p – потужність, яка розсіюється у плазмотроні, кВт; V_Γ – витрата плазмоутворюючого газу, м³/год.

Якщо прирівняти ці вирази та взяти до уваги, що $c_p = \frac{dH}{dT}$, або приблизно $\Delta H = \Delta T c_p$, тоді

$$\Delta T = V_0 \frac{W - W_p}{c_p V_\Gamma},$$

де $\Delta T = T_{з.с} - T_0$, T_0 – початкова температура плазмоутворюючого газу, $T_0 \approx 293$ К, c_p – питома теплоємність газу, кДж/(кг·К).

Звідси

$$T_{з.с} = T_0 + 3600 V_0 \frac{W - W_p}{c_p V_\Gamma},$$

де T_0 – початкова температура плазмоутворюючого газу, К; V_0 – питомий об'єм плазмоутворюючого газу, м/кг; W – електрична потужність, яка подається на плазмотрон, кВт; W_p – потужність, яка розсіюється у плазмотроні, кВт; c_p – питома теплоємність газу, кДж/кг·К; V_Γ – витрата плазмоутворюючого газу, м³/год.

Програма для розрахунку середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона за питомим внеском енергії написана мовою Turbo Pascal і наведена у дод. А.

3. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТУ З ДИСЦИПЛІНИ "ТЕХНОЛОГІЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ"

3.1. Задачі та приклади тем курсових проектів

Курсове проектування з дисципліни "Технологія напилення покриттів" є першою роботою, пов'язаною з організацією технології напилення функціональних покриттів.

Проект складається з таких основних етапів:

вивчення та аналіз конструкції та умов роботи виробу;

вибір методу, способу і обладнання для напилення покриттів;

вибір типу, складу, конструкції покриття і його товщини;

модернізація обладнання для напилення покриттів;

розрахунок (вибір) режиму напилення функціонального покриття;

нормування технологічних операцій, визначення витрат матеріалів;

призначення методів контролю якості покриттів, загальні відомості про охорону праці та техніку безпеки;

розробка технологічної інструкції щодо напилення функціональних покриттів;

проектування ділянки для напилення покриттів;

формування, складання та розробка загальних висновків, списку літератури, додатків та креслень.

Курсовий проект оформлюється відповідно до вимог ЕСКД і ЕСТД обсягом 25...30 аркушів формату А4 пояснювальної записки і двох аркушів креслення формату А1 і виконується у два етапи: перший – пояснювальна записка; другий – креслення.

Приклади тем курсових проектів наведені в табл. 3.1.

Курсовий проект захищається у встановлений керівником термін.

Таблиця 3.1. Приклади тем курсових проектів

№ п/п	Тема	Річна програма, шт.
1.	Розробка технології та модернізація обладнання для нанесення ущільнювальних покриттів на над роторні вставки ГТД газополуменевим напилюванням	1500

Продовж. табл. 3.1

№ п/п	Тема	Річна програма, шт.
2.	Розробка технології та модернізація обладнання для виготовлення керамічних деталей плазмовим напилюванням	
3.	Розробка технології та модернізація обладнання для напилення теплозахисних покриттів на соплові лопатки ГТД плазмовим методом	500
4.	Розробка технології та модернізація обладнання для відновлення колінчастих валів електродуговим напилюванням	300
5.	Розробка технології та модернізація обладнання для нанесення ущільнюючих покриттів на надроторні вставки ГТД плазмовим методом	500
6.	Розробка технології та модернізація обладнання для напилення зносостійких покриттів на кільця поршнів плазмовим методом	50000
7.	Розробка технології та модернізація обладнання для виготовлення прес-форми газополуменевим методом	300
8.	Розробка технології та модернізація обладнання для газополуменевого напилення полімерних покриттів на вироби побутового призначення	
9.	Розробка технології та модернізація обладнання для відновлення автомобільних колінчастих валів газополуменевим напилюванням	300
10.	Розробка технології та модернізація обладнання для напилення металополімерних зносостійких покриттів електродуговим методом	
11.	Розробка технології та модернізація обладнання для напилення конденсаційних покриттів на різальний інструмент	50000

3.2. Зміст пояснювальної записки

Вступ.

1. Аналіз конструкції та умов роботи виробу.

2. Вибір методу, способу і обладнання для напилення. Вибір і розрахунок типу, складу і товщини покриття.

3. Розрахунок технологічних параметрів напилення покриття. Розробка технологічної інструкції щодо напилення покриття.

4. Проектування дільниці для напилення покриттів. Розрахунок економічної ефективності застосування розробленої технології напилення.

5. Призначення методів контролю якості, загальні відомості про охорону праці та техніку безпеки.

Загальні висновки.

Список джерел інформації.

Додатки.

Зміст креслень:

загальний вигляд деталі не більше 0,5 аркуша формату А1;
складальне креслення вузла установки, плазмотрона, пальника, електродугового напилювача тощо і модернізованого вузла (деталі), 0,5 аркуша формату А1;

планування дільниці для нанесення покриттів, 1 аркуш формату А1.

Вступ до пояснювальної записки повинен містити пояснення щодо призначення виробу, особливості його конструкції та умов роботи, доцільності напилення покриттів; відомості про стан та перспективи напилених покриттів щодо підвищення технічних характеристик виробів; стисле обґрунтування та формування мети проектування.

Аналіз конструкції та умов роботи виробу містить всебічний аналіз особливостей конструкції та умов роботи, що визначають вимоги до покриття.

Вибір методу, способу і обладнання для напилення здійснюється у залежності від конструкції та умов роботи виробу, за [3, 11, 17].

Під час вибору методу і способу напилення функціонального покриття рекомендується користуватися табл. 3.2.

Вибір і розрахунок типу (конструкції), складу і товщини покриття визначається в залежності від умов роботи виробу та способу нанесення з урахуванням припусків на обробку напиленого шару [1, 3, 10, 16, 17].

Розрахунок технологічних параметрів напилення покриття залежить від методу нанесення покриттів. Наприклад, далі наведено розрахунок та оптимізація технологічних параметрів плазмового напилення покриттів [1 – 3, 13, 17].

Таблиця 3.2. Застосування методів напилення функціональних покриттів на робочі поверхні виробів

Методи нанесення захисного або відновлювального покриття	Тип з'єднання деталей, виробів, інструменту										
	Вал – підшипник ковзання	Кулачковий вал – штовхач	Вал – ущільнення	Фіксатори, ковпачки фореунок ГТД	Кокільні форми	Лопатки ГТД	Ущільнення ротор-статор ГТД	Керамічні труби	Корпуса суден, конструкції мостів	Інструмент	Лапа культиватора
Газополуменевий	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+
Електродуговий	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Плазмовий	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Конденсаційний	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-

Розрахунок та оптимізація технологічних параметрів плазмового напилення покриттів за допомогою математичної моделі. Визначення швидкості переміщення струменя вздовж (поперек) виробу, частоти обертання виробу циліндричної форми, а також вибір режиму напилення розрахунковим методом та інші наведено у [1, 3, 10, 11, 17].

Режим плазмового напилення покриттів з різних матеріалів вибирається головним чином експериментально. На практиці напилення покриттів здійснюють на великих електричних потужностях (часто понад 10...15 кВт) [3, 13, 14], що підвищує собівартість продукції. Ефективний ККД електричної потужності складає лише 7...10 % [6]. Це викликає потребу у зниженні енергетичних витрат при плазмовому нанесенні покриттів.

Раціональніше оптимізувати процес, що дозволить знизити теплову потужність плазмового напилення, можна за допомогою математичних моделей з розрахунками на ПЕОМ.

Розроблено кілька моделей, які мають ряд припущень і дозволяють розрахувати газодинамічні і теплофізичні параметри плазмового напилення, температуру й швидкість газу на зрізі сопла, температуру й швидкість частинок порошку в потоці плазми. Вплив припущень на результати розрахунків не однозначний і залежить від їх кількості і ступеня коректності. Оскільки на процес плазмового напилення покриттів впливають кілька десятків факторів,

що важко піддаються оптимізації, то можливість укладання узагальненої математичної моделі, яка дозволить ефективно управляти процесом шляхом вибору і корегування більш точних моделей окремих стадій напилювання, має велике теоретичне і практичне значення.

За основу узагальненої моделі прийнята математична модель двофазного плазмового струменя [4]. Вибрані рівняння (26)–(30), які дозволяють визначити температуру і швидкість плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона.

Для визначення температури та швидкості газу в кожному елементарному об'ємі були використані рівняння (35), (36), що наведені в [6, 12]. Рівняння, які входять до складу математичної моделі [4] і дозволяють визначити згадані параметри, містять в собі коефіцієнт абсолютної чорноти тіла, довідкові значення якого для окремих матеріалів відрізняються інколи на порядок. Тому ці обставини, а також урахування сил аеродинамічного опору частинок порошку і обумовили використання рівнянь (35), (36).

Для визначення температури та швидкості частинок порошку в кожному елементарному об'ємі використані рівняння (37)–(42), які взяті із математичної моделі [4].

Таким чином, остаточно узагальнена і скорегована математична модель містить 17 рівнянь і має вигляд:

$$P_{\text{пл}} = \frac{P}{3}(i+5) - \frac{2\mu_{\Gamma}}{3R} c_{\text{пл}} P; \quad (26)$$

$$c_{\text{пл}} = \frac{R}{2\mu_{\Gamma}} \left[i+2 + \frac{e_0^3 \alpha^{3/2} \sqrt{P}}{K^2 T_{\Gamma(i-1)}^2 \epsilon_0^{3/2}} \right]; \quad (27)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{B}{1+B}}; \quad B = 3,2 \cdot 10^{-2} a^2 T_{\Gamma(i-1)}^{5/2} P_{\text{пл}}^{-1} \exp\left(-\frac{11600\phi_{\Gamma}}{T_{\Gamma(i-1)}}\right); \quad (28)$$

$$\left[\frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{\text{пл}}}{RT_0} T_{\Gamma(i-1)}^2 - \left[W - W_p + \frac{P\mu_{\Gamma}V_{\Gamma}c_{\text{пл}}}{RT_0} \right] T_{\Gamma(i-1)} \right] + \frac{E_{\Gamma}PV_{\Gamma}X}{K} + \frac{2\phi_{\Gamma}e_0PV_{\Gamma}\alpha^2}{K(1+\alpha)} = 0; \quad (29)$$

$$w_{\Gamma 0} = \frac{RT_{\Gamma(i-1)}\rho_{\Gamma}V_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}P_0S}; \quad (30)$$

$$\eta_{\Gamma i} = \eta_{\Gamma(i-1)} \sqrt{\frac{T_{\Gamma(i-1)}}{273}} \cdot \frac{1 + \frac{\zeta}{273}}{1 + \frac{\zeta}{T_{\Gamma(i-1)}}}; \quad (31)$$

$$\text{Re}_i = \frac{d_{\text{q}}\rho_{\Gamma}w_{\Gamma(i-1)}}{\eta_{\Gamma i}}; \quad (32)$$

$$C_{Di} = \frac{24}{\text{Re}_i}; \quad (33)$$

$$\alpha_{Ti} = \frac{Nu\lambda_{\Gamma}}{d_{\text{q}}}; \quad (34)$$

$$w_{\Gamma i} = w_{\Gamma(i-1)} \exp\left[-\frac{G_{\text{q}}}{3600V_{\Gamma}\rho_{\Gamma}} \cdot \sqrt{\frac{3\rho_{\Gamma}C_{Di}\Delta x_i}{2\rho_{\text{q}}d_{\text{q}}}}\right]; \quad (35)$$

$$T_{\Gamma i} = T_{\Gamma(i-1)} \exp\left[-\frac{12\alpha_{Ti}G_{\text{q}}}{w_{\Gamma i}c_{\text{пл}}3600V_{\Gamma}\rho_{\Gamma}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta x_i}{3\rho_{\Gamma}\rho_{\text{q}}C_{Di}d_{\text{q}}}}\right]; \quad (36)$$

$$a_{wi} = \frac{d_{\text{q}}^2\rho_{\text{q}}w_{\Gamma i}}{18\eta_i}; \quad (37)$$

$$a_{Ti} = \frac{d_{\text{q}}^2C_{\text{q}}\rho_{\text{q}}w_{\Gamma i}}{6Nu\lambda_{\Gamma}}; \quad (38)$$

$$\Delta T_{\text{qi}} = [T_{\Gamma i} - T_{\text{q}(i-1)}] \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta x_i}{a_{Ti}}\right)\right]; \quad (39)$$

$$\Delta w_{\text{qi}} = [w_{\Gamma i} - w_{\text{q}(i-1)}] \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta x_i}{a_{wi}}\right)\right]; \quad (40)$$

$$w_{qi} = w_{q(i-1)} + \Delta w_{qi}; \quad (41)$$

$$T_{qi} = T_{q(i-1)} + \Delta T_{qi}. \quad (42)$$

де $T_{з.с}$ – температура плазми на зрізі сопла плазмотрона, К; c_{pg} – питома теплоємність газу, кДж/(кг·К); e_0 – заряд електрона, Кл; K – стала Больцмана, Дж/К; ϵ_0 – електрична стала, Ф/м; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); i – кількість ступенів вільності; μ_r – молярна маса газу плазми, кг/моль; ϕ_r – перший потенціал іонізації газу, В; a – коефіцієнт, що залежить від положення елемента в періодичній системі; E_r – енергія дисоціації газу, Дж; T_0 , P – початкові температура і тиск плазмоутворюючого газу, α – ступінь однократної іонізації плазмоутворюючого газу; V_r – об'ємна витрата плазмоутворюючого газу, м³/с; W – електрична потужність, яка подається на плазмотрон, Вт; W_p – потужність, яка розсіюється у плазмотроні, Вт; $W_p = m_b c_b T$; m_b – масова витрата охолоджуючої води, кг/с; c_b – питома теплоємність води, $c_b = 4190$ Дж/(кг·К); T – зміна температури води на вході і виході із плазмотрона; P_0 – тиск навколишнього середовища, Па; S – площа перерізу сопла плазмотрона, м²; ΔT_{qi} – зміна середньої температури частинки в i -му елементі, К; $T_{q(i-1)}$ – середня температура частинки на вході в i -й елемент об'єму, К; T_{ri} – середня температура плазми в i -му елементі об'єму, К; Nu – критерій Нуссельта; λ_r – теплопровідність плазми, Вт/(м·К); Δw_{qi} – зміна середньої швидкості частинок, що вводяться в плазму, м/с; $\Delta w_{q(i-1)}$ – середня швидкість частинок на вході в i -й елемент об'єму, м/с; w_{ri} – середня швидкість плазми в i -му елементі об'єму, м/с; η_i – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с; w_{0r} – швидкість газу в перерізі введення порошку у потік, м/с; ρ_r – густина плазмоутворюючого газу, кг/м³; ρ_q – теоретична густина матеріалу частинок, кг/м³; G_r – витрата плазмоутворюючого газу, кг/год; G_q – витрата порошку (продуктивність процесу), кг/год; C_D – коефіцієнт аеродинамічного опору частинок порошку; d_q – діаметр частинок порошку (дисперсність матеріалу), м; Δx – шлях, який пройдено частинкою (дистанція напилення), м; T_{r0} – початкова температура газу, К; α_T – коефіцієнт тепловіддачі від газу до частинки, Вт/(м³·К); $C_{пл}$ – середня теплоємність плазмоутворюючого газу при постійному тиску, кДж/(кг·К); w_r – швидкість плазмоутворюючого газу, м/с.

За цією математичною моделлю здійснюється оптимізація параметрів нанесення покриттів. Оптимальна дистанція напилення (відстань від зрізу сопла до поверхні виробу) складає 0,100...0,300 м [13]. Дистанція напилення залежить від порошку, режиму напилення, конструктивних особливостей виробу та технічних характеристик установки плазмового напилення й плазмотрона.

Оптимальна дистанція нанесення покриттів фіксується в момент досягнення частинкою порошку температури плавлення за умови проплавлення 0,9 її маси. Це можна пояснити тим, що при нанесенні покриттів основою повної питомої енергії частинок є внутрішня складова.

На основі узагальненої математичної моделі складено програму розрахунку та оптимізації технологічних параметрів напилення покриттів (див. дод. В). Для виконання розрахунків за допомогою ПЕОМ необхідні такі початкові дані: вид плазмоутворюючого газу; витрати газу V_r і порошку G_p , кг/год; діаметр частинок порошку d_p , м; питома теплоємність порошку c_p , кДж/(кг·К); температура плавлення порошку $T_{пл}$, К; початковий тиск газу P , Па; теоретична густина матеріалу частинок ρ_p , кг/м³.

Розробка технологічної інструкції здійснюється відповідно до типових технологічних процесів та [3, 9].

Проектування ділянки для напилення покриттів рекомендується здійснювати відповідно до [12, 17].

Розрахунок економічної ефективності застосування розробленої технології напилення приблизно визначається за методикою оцінки матеріальних витрат [17] та за допомогою методики визначення економічної ефективності виробництва і застосування виробів зі зміцнюючими покриттями [2, 9, 10].

Закінчується пояснювальна записка **загальними висновками**, у яких необхідно відобразити шляхи удосконалення розробленої технології.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Білик І.І. Технологія та обладнання напилених покриттів: Навч. посібник. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2004. – 92 с.
2. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. – К.: Техніка, 1986. – 224 с.
3. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Арда-товская – К.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
4. Дубовой А.Н. Математическая модель двухфазной плазменной струи // Автоматическая сварка. – 1999. – №11. – С. 26–28.
5. Дубовой А.Н. Разработка математической модели технологической плазменной струи// В кн.: Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. Матер. к VI междунар. Науч.-технич. конф. – Запорожье: ЗГТУ, 1995. – Ч.1 – С. 88–90.
6. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко и др. – Минск: Бестпринт, 1998. – 212 с.
7. Кох Б.А. Основы термодинамики металлургических процессов сварки: Учебное пособие. – Л.: Судостроение. – 1975. – 240 с.
8. Кузнецов В.Д., Пащенко В.М., Фізико-хімічні основи створення покриттів: Навч. посібник. – К.: НМЦ ВО, 1999. – 176 с.
9. Методика определения экономической эффективности производства и применение изделий с упрочняющими покрытиями / Н.И. Панащенко, Г.И. Трусов, Л.В. Шевчук и др. – Киев, 1987. – 28 с.
10. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко / за ред. К.А. Ющенко. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.
11. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники / В.Н. Ляшников, В.С. Украинский, Г.Ф. Богатырев – Саратов, изд-во Саратовского ун-та, 1985. – 199с.
12. Порошковая металлургия и напыленные покрытия // Под ред. Б.С. Митина – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
13. Расчет траектории, скорости и нагрева частиц в плазменных струях / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.Б. Соболевский и др. // Математические модели физических процессов и их свойства: Тез. междунар. конф. JСММР – 97. – Таганрог, 1997. – С. 50–51.

14. РД 5.9910 – 91. Покрытия антифрикционные, износостойкие, коррозионностойкие. Нанесение покрытий методом напыления. Типовой технологический процесс. Введен 01.07.92.

15. Справочник по физике / *И.М. Дубровский, Б.В. Егоров, К.П. Рябошапка* – К.: Наукова думка. – 1986. – 560 с.

16. *Сухарев Э.А.* Технология и свойства защитных покрытий в машинах // Учебное пособие. – Ровно, 2004. – 182 с.

17. Технология нанесения газотермических порошковых покрытий / *А.Н. Дубовой, Э.Б. Хачатуров, С.А. Лой* // Учеб. Пособие – Николаев, 1986. – 66 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Типова програма розрахунків середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона (для N₂, Ar, He, H₂, повітря)

```
name$ = "c:\result.txt"
OPEN name$ FOR OUTPUT AS #1
'data block
R = 8314
Ez = 1.602 * 10 ^ -19
K = 1.38 * 10 ^ -23

Eps = 8.85 * 10 ^ -12
Tz = 298

Pz = 101300
S = .0000283#
Na = 6.02 * 10 ^ 26
PRINT "Введіть значення P"
INPUT P
PRINT "Введіть значення Vg"
INPUT Vg
PRINT #1, "P="; P, "Vg="; Vg
GOTO 8
1 'дані для азоту
I = 5
Mug = 14
Fig = 14.54
A = 1.5
Eg = 15.65 * 10 ^ -19
Ro = 1.251
Cpl = 2000
GOTO 9
2 'дані для аргону
I = 3
Mug = 39.95
Fig = 15.75
A = 4
```

```

Eg = 0
Ro = 1.784
Cpl = 520
GOTO 9
3 'дані для гелію
  I = 3
  Mug = 4
  Fig = 24.59
  A = 4
  Eg = 0
  Ro = .179
  X = 0
  Cpl = 5200
GOTO 9
4 'дані для водню
  I = 5
  Mug = 1
  Fig = 13.59
  A = 1
  Eg = 7.23 * 10 ^ -19
  Ro = .09
  Cpl = 29100
GOTO 9
5 'дані для повітря
  I = 6
  Mug = 14.42
  Fig = 14.34
  A = 1.74
  Eg = 14.1 * 10 ^ -19
  Ro = 1.177
  Cpl = 2306
GOTO 9
'end data
8  CLS
   PRINT "Виберіть плазмоутворюючий газ"
   PRINT "      азот (N2) – 1"
   PRINT "      аргон (Ar) – 2"
   PRINT "      гелій (He) – 3"
   PRINT "      водень (H2) – 4"

```

```

PRINT "      повітря      - 5"
INPUT Gp
IF Gp = 1 THEN 1
IF Gp = 2 THEN 2
IF Gp = 3 THEN 3
IF Gp = 4 THEN 4
IF Gp = 5 THEN 5
9
  J = 0
  M = 1
  PRINT "Розрахунок термодинамічних параметрів плазми"
  PRINT
  PRINT "Значення W, що вводиться повинно бути >15      ";
  INPUT "(Kw) W=", W1
  W2 = W1
  '      для плазмотрону типу ПН-14м
  Wp = 7300
10
  INPUT "Введіть початкове значення ступеня іонізації (0...1) A1=", A1
  INPUT "Введіть початкове значення Tp>15000      Tp=", Tp
  Tp1 = Tp
15  W = W1 * 1000 - Wp
20  Tp = Tp + 20
  IF Gp = 1 THEN 21
  IF Gp = 2 THEN 22
  IF Gp = 3 THEN 22
  IF Gp = 4 THEN 23
  IF Gp = 5 THEN 24
21
'дані для азоту
  D1 = 10 ^ (-49295 / Tp + 6.14)
  D2 = 12 + D1

  X = SQR(D1 / D2)
GOTO 25
22
'дані для аргону и гелію
  X = 0
GOTO 25

```

23

'дані для водню

$$D1 = 10^{(-22765 / T_p + 5.63)}$$

$$D2 = 12 + D1$$

$$X = \text{SQR}(D1 / D2)$$

GOTO 25

24

'дані для повітря

$$D11 = 10^{(-26023 / T_p + 6.58)}$$

$$D12 = 12 + D11$$

$$D21 = 10^{(-49295 / T_p + 6.14)}$$

$$D22 = 12 + D21$$

$$X = .21 * \text{SQR}(D11 / D12) + .79 * \text{SQR}(D21 / D22)$$

'end data

25

IF M = 1 THEN Tip\$ = " ПН-14м"

IF M = 2 THEN Tip\$ = " ПН-7"

' розрахунок тиску в плазмі

$$So1 = (P / 3) * (I + 5) - (2 / 3)$$

$$So2 = (Mug / R) * Cpl * P$$

$$Ppl = (P / 3) * (I + 5) - (2 / 3) * So2$$

' розрахунок теплоємності

$$D21\# = (Ez \wedge 3) * (A1 \wedge 1.5) * \text{SQR}(P)$$

$$D22\# = K * K * T_p * T_p * (Eps \wedge 1.5)$$

$$S3 = D21\# / D22\#$$

$$Cpl = R / (2 * Mug) * (I + 2 + S3)$$

' розрахунок ступеня іонізації

$$B = .032 * A * A * (T_p \wedge 2.5) / Ppl * \text{EXP}(-11600 / T_p * Fig)$$

$$A1 = \text{SQR}(B / (1 + B))$$

' розрахунок температури плазми

$$S41 = (Tz + (W * R * Tz) / (P * Mug * Vg * Cpl)) * T_p$$

$$S42 = (Eg * Na * Tz * X) / (Mug * Cpl)$$

$$S43 = (2 * Ez * Na * Tz * A1 * A1) / (Mug * Cpl * (1 + A1))$$

$$Tpl = \text{SQR}(S41 - S42 - S43)$$

'розрахунок швидкості плазми

$$Vcc = (R * Tpl * Ro * Vg) / (Mug * Pz * S)$$

26 IF T_p > Tpl THEN T_p = T_p - 40

IF ABS(Tpl - T_p) < 50 THEN 30

GOTO 20

```

'      вивід даних
30
'   PRINT "Потужність, що підводиться до плазми (Kw)      W="; W1
'   PRINT "Розрахункове значення температури плазми (K) Tpl=";
'   PRINT USING "#####"; Tpl
'   PRINT "Коефіцієнт іонізації – альфа ,      Al=" ;
'   PRINT USING "#.##"; Al
'   PRINT "Тиск плазми      Ppl=";
'   PRINT USING "#####.#"; Ppl
'   PRINT "Теплоємність плазми      Cpl=" ;
'   PRINT USING "#####.#"; Cpl
'   PRINT "Швидкість газу      Vcc=";
'   PRINT USING "#####.#"; Vcc
' Вивід даних на принтер
'   PRINT "Вивести дані на принтер Y/N"
'   INPUT Y$
'   IF Y$ = "Y" THEN 35
'   IF Y$ = "y" THEN 35
'GOTO 50
35
'   I1$ = "Термодинамічні параметри азотної плазми"
'   I2$ = " Термодинамічні параметри аргонної плазми "
'   I3$ = " Термодинамічні параметри гелевої плазми "
'   I4$ = " Термодинамічні параметри водневої плазми "
'   I5$ = " Термодинамічні параметри повітряної плазми "

'   IF J > 0 THEN 36
'   IF Gp = 1 THEN PRINT #1, I1$
'   IF Gp = 2 THEN PRINT #1, I2$
'   IF Gp = 3 THEN PRINT #1, I3$
'   IF Gp = 4 THEN PRINT #1, I4$
'   IF Gp = 5 THEN PRINT #1, I5$
36
'   PRINT #1, ; Tip$;
'   PRINT #1, " "; "W=";
'   PRINT #1, USING "##"; W1;
'   PRINT #1, " "; "Tpl=";
'   PRINT #1, USING "#####"; Tpl;
'   PRINT #1, " "; "Al=";

```

```
PRINT #1, ; USING "#.##"; Al;
PRINT #1, " "; "Cpl=";
PRINT #1, USING "#####"; Cpl;
PRINT #1, " "; "Ppl=";
PRINT #1, USING "#####"; Ppl;
PRINT #1, " "; "Vcc=";
PRINT #1, USING "#####.#"; Vcc
J = J + 1
' Цикл варіювання потужності
  W1 = W1 + 5
  IF W1 >= 65 THEN 40
GOTO 15
40
  M = M + 1
  IF M > 2 THEN 8
  W1 = W2
  Wp = 10500
  Tp = Tp1
GOTO 15
50 CLOSE #1
  END
```

Приклади зображень графічних залежностей

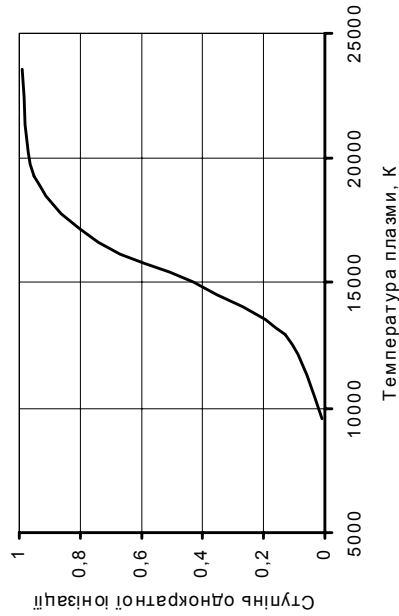


Рис. 1. Залежність ступеня однократної іонізації від середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона

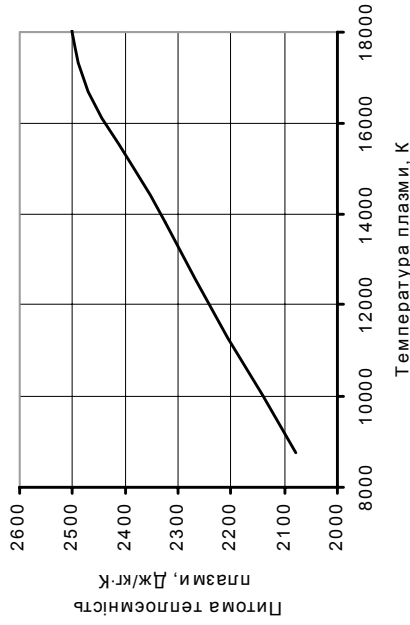


Рис. 2. Залежність питомої теплоємності плазми від середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона

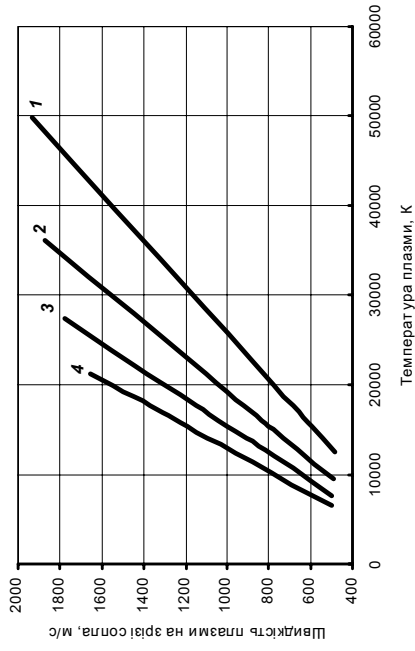


Рис. 3. Залежність швидкості плазмового струменя від середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона при витратах газу, м³/с:

I – 0,0003; 2 – 0,0004; 3 – 0,0005; 4 – 0,0006

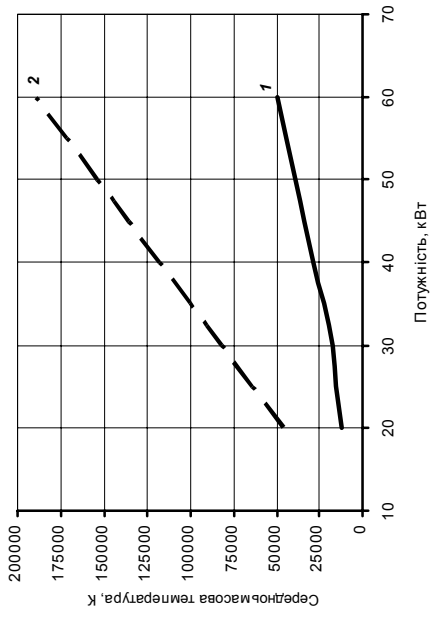


Рис. 4. Залежність середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона, розрахованої за різними методами, від потужності процесу:

I – методика на основі закону збереження енергії;
 2 – методика за питомим внеском енергії

**Програма розрахунку та оптимізації технологічних параметрів
напилення покриттів**

unit CountNew;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, Math, Mask, Buttons;

type

TForm1 = class(TForm)
 GroupBox1: TGroupBox;
 Label2: TLabel;
 MEOsK: TMaskEdit;
 MESTK: TMaskEdit;
 Label3: TLabel;
 Label4: TLabel;
 Label5: TLabel;
 Label6: TLabel;
 MER: TMaskEdit;
 Label7: TLabel;
 Label8: TLabel;
 MEOsEz: TMaskEdit;
 Label9: TLabel;
 MESTEz: TMaskEdit;
 Label10: TLabel;
 Label11: TLabel;
 Label12: TLabel;
 MEP0: TMaskEdit;
 Label14: TLabel;
 MEOsEpsilon: TMaskEdit;
 Label17: TLabel;
 MESTEpsilon: TMaskEdit;
 Image3: TImage;
 Label15: TLabel;
 Label16: TLabel;

Label18: TLabel;
MEONa: TMaskEdit;
Label19: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
MENu: TMaskEdit;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
MEStNa: TMaskEdit;
 GroupBox2: TGroupBox;
Label1: TLabel;
Label24: TLabel;
METz: TMaskEdit;
Label26: TLabel;
Label27: TLabel;
MES: TMaskEdit;
Label28: TLabel;
 GroupBox3: TGroupBox;
 CBTipPl: TComboBox;
Label29: TLabel;
Label30: TLabel;
Label31: TLabel;
Label32: TLabel;
MEWp: TMaskEdit;
Label33: TLabel;
 CBGas: TComboBox;
 GroupBox4: TGroupBox;
Label34: TLabel;
Image1: TImage;
MEMug: TMaskEdit;
Label35: TLabel;
Image2: TImage;
MEFig: TMaskEdit;
Label36: TLabel;
MEA: TMaskEdit;
Label37: TLabel;
Label38: TLabel;
Label39: TLabel;
Label40: TLabel;

MEOsEg: TMaskEdit;
Label41: TLabel;
MEStEg: TMaskEdit;
Label42: TLabel;
Image4: TImage;
MEEta: TMaskEdit;
Label43: TLabel;
Image5: TImage;
MERo: TMaskEdit;
Label44: TLabel;
Label45: TLabel;
Label46: TLabel;
Label47: TLabel;
MECpl: TMaskEdit;
Label48: TLabel;
Label49: TLabel;
MEI: TMaskEdit;
Label50: TLabel;
Image6: TImage;
MELambda: TMaskEdit;
Label51: TLabel;
Label52: TLabel;
Image7: TImage;
MEOsNu: TMaskEdit;
Label53: TLabel;
MEStNu: TMaskEdit;
Label13: TLabel;
Label25: TLabel;
Label54: TLabel;
Label55: TLabel;
MEW1: TMaskEdit;
MEW2: TMaskEdit;
MEWStep: TMaskEdit;
Label56: TLabel;
Label57: TLabel;
MEP: TMaskEdit;
Label58: TLabel;
Label59: TLabel;
Label60: TLabel;

Label61: TLabel;
MEVg: TMaskEdit;
Label62: TLabel;
Image8: TImage;
MEAlfa: TMaskEdit;
Label63: TLabel;
METp: TMaskEdit;
Label64: TLabel;
Label65: TLabel;
Label66: TLabel;
Label67: TLabel;
MEX1: TMaskEdit;
MEX2: TMaskEdit;
MEStepX: TMaskEdit;
Label68: TLabel;
Label69: TLabel;
Label70: TLabel;
MEGch: TMaskEdit;
Label71: TLabel;
Label72: TLabel;
Label73: TLabel;
MECch: TMaskEdit;
Label74: TLabel;
Label75: TLabel;
Image9: TImage;
MERoCh: TMaskEdit;
Label76: TLabel;
Label77: TLabel;
Label78: TLabel;
MEDch: TMaskEdit;
Label82: TLabel;
Image10: TImage;
Label83: TLabel;
Label84: TLabel;
ENazM: TEdit;
Label85: TLabel;
Label86: TLabel;
METm: TMaskEdit;
Label87: TLabel;

```

Label88: TLabel;
Label89: TLabel;
Label90: TLabel;
MEWch: TMaskEdit;
BBCount: TBitBtn;
procedure Count;
procedure CBTipPIChange(Sender: TObject);
procedure CBGasChange(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure BBCountClick(Sender: TObject);
procedure MERKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
  Shift: TShiftState);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;

implementation
var F1,F2,F3: TextFile;
    NazPlaz: String;

{$R *.dfm}

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  NazPlaz:='азотной';
end;

procedure TForm1.Count;
var R,K,Ez,Pz,Eps,Na,Nu,Tz,S,Wp :Real; //константи
    Mug,Fig,A,Eg,Eta,Ro,Cpl0,I,Lam,Nug,X :Real; //залежить від
    P,Al,Vg,Dch,Gch,Roch,Cch,Tr0 :Real; //задається

Wat,WStep,Ppl,B,S41,S42,S43,S44,Tpl,Vcc,Wc1,Cplp,Alp,Wg0,Wg,N1,Tg,iX,X1,X2,Delx,
Aw,DelW,At,DelT,Tc0,DelT0,DelT00,Wc0 :Real; //розрахункові величини

```

Npp,Npp01,iX01,Wg01,Tg01,Wc01,Tc01,Npp02,iX02,Wg02,Tg02,Wc02,Tc02,Npp03,
iX03,Wg03,Tg03,Wc03,Tc03,Npp04,iX04,Wg04,Tg04,Wc04,Tc04: Real; //оптимізація
Cikl: Boolean;
N0,Tg0,W,W2,WO :Real;
//Ciklw,W,W2 :Word;

begin

//фізичні постійні

R:=StrToFloatDef(Trim(MER.Text),0);
K:=StrToFloatDef(Trim(MEOsK.Text),0)*IntPower(10,StrToIntDef(Trim(MESStK.Text),0));
Ez:=StrToFloatDef(Trim(MEOsEz.Text),0)*IntPower(10,StrToIntDef(Trim(MESStEz.Text),0));
Pz:=StrToFloatDef(Trim(MEP0.Text),0);

Eps:=StrToFloatDef(Trim(MEOsEpsilon.Text),0)*IntPower(10,StrToIntDef(Trim(MESStEpsilon.Text),0));
Na:=StrToFloatDef(Trim(MEOsNa.Text),0)*IntPower(10,StrToIntDef(Trim(MESStNa.Text),0));
Nu:=StrToFloatDef(Trim(MENu.Text),0);

//постійні

Tz:=StrToFloatDef(Trim(METz.Text),0); S:=StrToFloatDef(Trim(MES.Text),0);

//задається

P:=StrToFloatDef(Trim(MEP.Text),0);
Al:=StrToFloatDef(Trim(MEAlfa.Text),0);
Tp0:=StrToFloatDef(Trim(METp.Text),0);
W:=StrToFloatDef(Trim(MEW1.Text),0);
W2:=StrToFloatDef(Trim(MEW2.Text),0);
WStep:=StrToFloatDef(Trim(MEWStep.Text),0);
Vg:=StrToFloatDef(Trim(MEVg.Text),0);

//залежить від газу

Mug:=StrToFloatDef(Trim(MEMug.Text),0);
I:=StrToFloatDef(Trim(MEI.Text),0);
Fig:=StrToFloatDef(Trim(MEFig.Text),0);
A:=StrToFloatDef(Trim(MEA.Text),0);
Eg:=StrToFloatDef(Trim(MEOsEg.Text),0)*IntPower(10,StrToIntDef(Trim(MESStEg.Text),0));
Cpl0:=StrToFloatDef(Trim(MECpl.Text),0);
Ro:=StrToFloatDef(Trim(MERo.Text),0);
Nug:=StrToFloatDef(Trim(MEOsNu.Text),0)*IntPower(10,StrToIntDef(Trim(MESStNu.Text),0));
Eta:=StrToFloatDef(Trim(MEEta.Text),0);
Lam:=StrToFloatDef(Trim(MELambda.Text),0);

```

//залежить від плазмотрону
Wp:=StrToFloatDef(Trim(MEWp.Text),0);

//розрахунок
DelT0O:=1000000; Npp04:=0; iX04:=0; Wg04:=0; Tg04:=0; Wc04:=0; Tc04:=0;
while W<=W2 do begin
  Cikl:=False;
  While Cikl=False do begin
    Tp0:=Tp0+20;
    if CBGas.ItemIndex=0 then begin //азот
      X:=Sqrt(Power(10,((-49295/Tp0+6.14)))/(12+Power(10,((-49295/Tp0+6.14)))));
    end;
    if (CBGas.ItemIndex=1) or (CBGas.ItemIndex=2) or (CBGas.ItemIndex=5) then
      X:=0; //аргон гелій інший
    if CBGas.ItemIndex=3 then begin //водень
      X:=Sqrt(Power(10,((-22765/Tp0+5.63)))/(12+Power(10,((-22765/Tp0+5.63)))));
    end;
    if CBGas.ItemIndex=4 then begin //повітря
      X:=0.21*(Sqrt(Power(10,((-26023/Tp0+6.58)))/(12+Power(10,((-26023/
      Tp0+6.58))))))+0.79*(Sqrt(Power(10,((-49295/Tp0+6.14)))/(12+Power(10,((-49295/
      Tp0+6.14))))));
    end;
    Ppl:=(P/3)*(I+5)-((2*Mug)/(3*R)*Cpl0*P);

    Cpl0:=R/(2*Mug)*(I+2+((IntPower(Ez,3)*Power(A1,1.5)*Sqrt(P))/
    (IntPower(K,2)*IntPower(Tp0,2)*Power(Eps,1.5))));
    B:=0.032*A*A*Power(Tp0,2.5)*Power(Ppl,-1)*Exp(-11600*Fig/Tp0);
    Al:=Sqrt(B/(1+B));
    Wat:=W*1000-Wp;
    S41:=(Tz+(Wat*R*Tz)/(P*Mug*Vg*Cpl0))*Tp0;
    S42:=(Eg*Na*Tz*X)/(Mug*Cpl0);
    S43:=(2*Ez*Na*Tz*Al*Al)/(Mug*Cpl0*(1+Al));
    if (S41-S42-S43)<0 then begin
      W:=W+WStep; Continue;
    end;
    Tpl:=Sqrt(S41-S42-S43);
    Vcc:=(R*Tpl*Ro*Vg)/(Mug*Pz*S);
    if Tp0>Tpl then Tp0:=Tp0-40;
    if Abs(Tpl-Tp0)<50 then begin
      Tpl:=Round(Tpl);

```



```

Alp:=SimpleRoundTo(Al,-2);
Cplp:=Round(Cpl0);
Ppl:=Round(Ppl);
Vcc:=SimpleRoundTo(Vcc,-1);
Writeln(F1, Format(' W= %5.1f', [W]), Format(' Tpl= %5g', [Tpl]), Format(' Al= %2f',
[Alp]), Format(' Cpl= %3g', [Cplp]), Format(' Ppl= %6g', [Ppl]), Format(' Vcc= %6.1f',
[Vcc]));
iX:=StrToFloatDef(Trim(MEWch.Text),0);
X1:=StrToFloatDef(Trim(MEX1.Text),0);
X2:=StrToFloatDef(Trim(MEX2.Text),0);
DelX:=StrToFloatDef(Trim(MESStepX.Text),0);
Tc0:=Tz;
Npp01:=0; iX01:=0; Wg01:=0; Tg01:=0; Wc01:=0; Tc01:=0;
Npp02:=0; iX02:=0; Wg02:=0; Tg02:=0; Wc02:=0; Tc02:=0;
Npp03:=0; iX03:=0; Wg03:=0; Tg03:=0; Wc03:=0; Tc03:=0;
DelT0:=1000000;
Npp:=0;
N0:=Nug; Tg0:=Tpl; Wg0:=Vcc; Tg:=Tpl;
X2:=X2+DelX;
Wc0:=StrToFloatDef(Trim(MEWch.Text),0);
Writeln(F2, 'Потужність ', Format('%5.1f', [W]), ' кВт');
Writeln(F2, '-----');
Writeln(F2, '№ пп| Відстань від |Швидкість газу|Температура|Швидкість части-
нок| Температура ');
Writeln(F2, ' |зрізу сопла, м| м/с (WГ) |газу,К (ТГ)| м/с (Wч) |частинок,К (Тч)');
Writeln(F2, '-----');
repeat
N1:=N0*Sqrt(Tg/273)*((1+(Eta/273))/(1+(Eta/Tg))); {1}
S41:=StrToFloatDef(Trim(MEGch.Text),0);
S42:=StrToFloatDef(Trim(MERoch.Text),0);
S43:=StrToFloatDef(Trim(MEDch.Text),0);
Wg:=Wg0*Exp((-S41/(3600*Vg*Ro))*Sqrt((3*Ro*(24/((S43*Ro*Wg0)/N1))*iX)/
(2*S42*S43))); {2}
Tg:=Tg0*Exp((-12*(Nu*Lam/S43)*S41)/(Wg*Cpl0*3600*Vg*Ro))*Sqrt(2*iX/
(3*Ro*S42*(24/((S43*Ro*Wg0)/N1))*S43))); {3}
Aw:=(S43*S43*S42*Wg)/(18*N1); {4}
DelW:=(Wg-Wc0)*(1-Exp(-iX/Aw)); {5}
Wc1:=Wc0+DelW; {6}
Wc0:=Wc1;

```

```

S41:=StrToFloatDef(Trim(MECch.Text),0);
At:=(S43*S43*S41*S42*Wg)/(6*Nu*Lam); {7}
DelT:=(Tg-Tc0)*(1-Exp(-iX/At)); {8}
Tc0:=Tc0+Delt; {9}
if Wc1>Wc01 then begin
Npp01:=Npp; iX01:=iX; Wg01:=Wg; Tg01:=Tg; Wc01:=Wc1; Tc01:=Tc0;
end;
if Tc0>Tc02 then begin
Npp02:=Npp; iX02:=iX; Wg02:=Wg; Tg02:=Tg; Wc02:=Wc1; Tc02:=Tc0;
end;
if (Abs(Tc0-StrToFloatDef(Trim(METm.Text),0))<DelT0) and (Tc0-
StrToFloatDef(Trim(METm.Text),0)>0) then begin
DelT0:=Abs(Tc0-StrToFloatDef(Trim(METm.Text),0));
Npp03:=Npp; iX03:=iX; Wg03:=Wg; Tg03:=Tg; Wc03:=Wc1; Tc03:=Tc0;
if DelT0<DelT00 then begin
DelT00:=DelT0; WO:=W;
Npp04:=Npp; iX04:=iX; Wg04:=Wg; Tg04:=Tg; Wc04:=Wc1; Tc04:=Tc0;
end;
end;
if (iX>=X1) and (iX<=X2) then begin
Writeln(F2, Format('%4g', [Npp]),' | ',Format('%5.3f', [iX]),' | ',Format('%6.1f',
[Wg]),' | ',Format('%5.0f', [Tg]),' | ',Format('%8.3f', [Wc1]),' | ',Format('%7.1f', [Tc0]),' ');
end;
iX:=iX+DelX;
Npp:=Npp+1;
//Tg0:=Tg; N0:=N1; Wg0:=Wg;
until iX>X2;
break;
end;
end;
Writeln(F3, Format('%4g', [Npp01]),' | ',Format('%5.1f', [W]),' | ',Format('%5.3f',
[iX01]),' | ',Format('%6.1f', [Wg01]),' | ',Format('%5.0f', [Tg01]),' | ',Format('%8.3f',
[Wc01]),' | ',Format('%7.1f', [Tc01]),' ');
Writeln(F3, Format('%4g', [Npp02]),' | ',Format('%5.3f', [iX02]),' | ',Format(
' %6.1f', [Wg02]),' | ',Format('%5.0f', [Tg02]),' | ',Format('%8.3f', [Wc02]),' |
',Format('%7.1f', [Tc02]),' ');
Writeln(F3, Format('%4g', [Npp03]),' | ',Format('%5.3f', [iX03]),' | ',Format(
' %6.1f', [Wg03]),' | ',Format('%5.0f', [Tg03]),' | ',Format('%8.3f', [Wc03]),' |
',Format('%7.1f', [Tc03]),' ');

```

```

Writeln(F3, '-----');
W:=W+WStep;
if W>W2 then break;
end;
Writeln(F3, '          Мінімальна потужність оптимізаційного процесу');
Writeln(F3, '-----');
Writeln(F3, '№ пп|Потужність| Відстань від |Швидкість газу|Температура|Швидкість
частинок| Температура ');
Writeln(F3, ' | кВт |зрізу сопла, м| м/с (WГ) |газу,К (ТГ)| м/с (Wч) |частинок,К
(Тч));
Writeln(F3, '-----');
Writeln(F3, Format('%4g', [Npp04]),' | ',Format('%5.1f', [WO]),' | ',Format('%5.3f',
[iX04]),' | ',Format('%6.1f', [Wg04]),' | ',Format('%5.0f', [Tg04]),' | ',Format('%8.3f',
[Wc04]),' | ',Format('%7.1f', [Tc04]));
Writeln(F3, '-----');
end;

```

```

procedure TForm1.BBCountClick(Sender: TObject);
var str :String;
begin
  GetDir(0, str);
  str:=str+'\result1.txt';
  AssignFile(F1, str);
  rewrite(F1);
  GetDir(0, str);
  str:=str+'\result2.txt';
  AssignFile(F2, str);
  rewrite(F2);
  GetDir(0, str);
  str:=str+'\result3.txt';
  AssignFile(F3, str);
  rewrite(F3);
  Writeln(F1, 'Термодинамічні параметри ', NazPlaz, ' плазми');
  Writeln(F1, 'Тип плазмотрону ', СВТірPl.Text);
  Writeln(F2,'          Результати розрахунку швидкості та температури газу і
порошку');
  Writeln(F2, ENazM.Text, ' температура плавління ', METm.Text, ' К');
  Writeln(F3,'          Результати оптимізації процесу');
  Writeln(F3, ENazM.Text, ' температура плавління ', METm.Text, ' К');

```

```

Writeln(F3, '-----');
Writeln(F3, '№ пп|Потужність| Відстань від |Швидкість газу|Температура|Швидкість
частинок| Температура ');
Writeln(F3, ' | кВт |зрізу сопла, м| м/с (WГ) |газу,К (ТГ)| м/с (Wч) |частинок,К
(Тч)');
Writeln(F3, '-----');
Count;
CloseFile(F1); CloseFile(F2); CloseFile(F3);
MessageDlg('Розрахунок закінчено', mtInformation, [mbOk], 0);
Application.Terminate;
end;

```

```

procedure TForm1.CBTipPlChange(Sender: TObject);
begin
if CBTipPl.ItemIndex=0 then MEWp.Text:=' 7300';
if CBTipPl.ItemIndex=1 then MEWp.Text:='10500';
if CBTipPl.ItemIndex=2 then MEWp.Text:=' 0';
MEWp.SetFocus;
end;

```

```

procedure TForm1.CBGasChange(Sender: TObject);
begin
if CBGas.ItemIndex=0 then begin //азот
MEMug.Text:='14,00'; MEFig.Text:='14,45';
MEA.Text:='1,5'; MEOsEg.Text:='15,65'; MEstEg.Text:='-19'; MEstEg.Visible:=True;
Label41.Visible:=True;
MEEta.Text:='113,50'; MERo.Text:='1,251'; MECpl.Text:=' 2000';
MEI.Text:='5'; MELambda.Text:='0,0241';
MEOsNu.Text:='16,5'; MEstNu.Text:='-6';
NazPlaz:='азотної';

```

```

end;
if CBGas.ItemIndex=1 then begin //апрон
MEMug.Text:='39,95'; MEFig.Text:='15,75';
MEA.Text:='4,0'; MEOsEg.Text:='0,00'; MEstEg.Visible:=False;
Label41.Visible:=False;
MEEta.Text:='128,00'; MERo.Text:='1,784'; MECpl.Text:=' 520';
MEI.Text:='3'; MELambda.Text:='0,0163';
MEOsNu.Text:='21,1'; MEstNu.Text:='-6';

```

```

    NazPlaz:='аргонової';
end;
if CBGas.ItemIndex=2 then begin //гелій
MEMug.Text:=' 4,00'; MEFig.Text:='24,59';
    MEA.Text:='4,0'; MEOsEg.Text:='0,00';    MESTeg.Visible:=False;
Label41.Visible:=False;
MEEta.Text:=' 6,03'; MERo.Text:='0,179'; MECpl.Text:=' 5200';
MEI.Text:='3'; MELambda.Text:='0,1400';
MEOsNu.Text:='18,8'; MESTNu.Text:='-6';
    NazPlaz:='гелієвої';
end;
if CBGas.ItemIndex=3 then begin //водень
MEMug.Text:=' 1,00'; MEFig.Text:='13,59';
MEA.Text:='1,0'; MEOsEg.Text:=' 7,23'; MESTeg.Text:='-19'; MESTeg.Visible:=True;
Label41.Visible:=True;
MEEta.Text:=' 29,6'; MERo.Text:='0,090'; MECpl.Text:='29100';
MEI.Text:='5'; MELambda.Text:='0,1700';
MEOsNu.Text:=' 8,5'; MESTNu.Text:='-6';
    NazPlaz:='водневої';
end;
if CBGas.ItemIndex=4 then begin //повітря
MEMug.Text:='14,42'; MEFig.Text:='14,34';
MEA.Text:='1,74'; MEOsEg.Text:='14,10'; MESTeg.Text:='-19'; MESTeg.Visible:=True;
Label41.Visible:=True;
MEEta.Text:='116,9'; MERo.Text:='1,177'; MECpl.Text:=' 2306';
MEI.Text:='6'; MELambda.Text:='0,0240';
MEOsNu.Text:='17,1'; MESTNu.Text:='-6';
    NazPlaz:='повітряної';
end;
if CBGas.ItemIndex=6 then NazPlaz:=''; //інший
MEMug.SetFocus;
end;
procedure TForm1.MERKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
begin
if Key=VK_RETURN then begin
if Sender=MER then MEOsK.SetFocus;
if Sender=MEOsK then MESTK.SetFocus;
if Sender=MESTK then MEOsEz.SetFocus;

```

```
if Sender=MEOsEz then MESTez.SetFocus;
if Sender=MESTez then MEPO.SetFocus;
if Sender=MEPO then MEOsEpsilon.SetFocus;
if Sender=MEOsEpsilon then MESTepsilon.SetFocus;
if Sender=MESTepsilon then MEOsNa.SetFocus;
if Sender=MEOsNa then MESTna.SetFocus;
if Sender=MESTna then MENu.SetFocus;
if Sender=MENu then METz.SetFocus;
if Sender=METz then MEWch.SetFocus;
if Sender=MEWch then MES.SetFocus;
if Sender=MES then CBTipPl.SetFocus;
if Sender=CBTipPl then MEWp.SetFocus;
if Sender=MEWp then MEW1.SetFocus;
if Sender=MEW1 then MEW2.SetFocus;
if Sender=MEW2 then MEWStep.SetFocus;
if Sender=MEWStep then MEX1.SetFocus;
if Sender=MEX1 then MEX2.SetFocus;
if Sender=MEX2 then MESTepX.SetFocus;
if Sender=MESTepX then CBGas.SetFocus;
if Sender=CBGas then MEMug.SetFocus;
if Sender=MEMug then MEFig.SetFocus;
if Sender=MEFig then MEA.SetFocus;
if Sender=MEA then MEOsEg.SetFocus;
if Sender=MEOsEg then begin
    if (CBGas.ItemIndex=1) or (CBGas.ItemIndex=1) then MEEta.SetFocus else
MESTeg.SetFocus;
end;
if Sender=MESTeg then MEEta.SetFocus;
if Sender=MEEta then MERo.SetFocus;
if Sender=MERo then MECpl.SetFocus;
if Sender=MECpl then MEI.SetFocus;
if Sender=MEI then MELambda.SetFocus;
if Sender=MELambda then MEOsNu.SetFocus;
if Sender=MEOsNu then MESTnu.SetFocus;
if Sender=MESTnu then MEP.SetFocus;
if Sender=MEP then MEVg.SetFocus;
if Sender=MEVg then MEAlfa.SetFocus;
if Sender=MEAlfa then METp.SetFocus;
if Sender=METp then MEGch.SetFocus;
```

```
if Sender=MEGch then MECch.SetFocus;
if Sender=MECch then MERoch.SetFocus;
if Sender=MERoch then MEDch.SetFocus;
if Sender=MEDch then ENazM.SetFocus;
if Sender=ENazM then METm.SetFocus;
if Sender=METm then BBCount.SetFocus;
end;
end;

end.
```

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Завдання до курсової роботи "Розрахунок і аналіз газодинамічних параметрів плазмового струменя".....	5
2. Розробка алгоритмів розрахунку газодинамічних параметрів плазмового струменя.....	7
2.1. Розрахунок середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла на основі закону збереження енергії.....	7
2.2. Розрахунок середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона за питомим внеском енергії.....	14
3. Зміст та структура курсового проекту з дисципліни "Технологія нанесення покриттів".....	16
3.1. Задачі та приклади тем курсових проектів.....	16
3.2. Зміст пояснювальної записки.....	17
Рекомендована література.....	24
Додаток А. Типова програма розрахунків середньомасової температури плазмового струменя на зрізі сопла плазмотрона (для N_2 , Ar, He, H_2 , повітря).....	26
Додаток Б. Приклади зображень графічних залежностей.....	32
Додаток В. Програма розрахунку та оптимізації технологічних параметрів напилення покриттів.....	33

Навчальне видання

Дубовий Олександр Миколайович,
Янковець Тетяна Анатоліївна,
Прокудін Степан Олександрович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи з дисципліни
"Фізико-хімічні основи створення покриттів"
та курсового проекту з дисципліни
"Технологія напилення покриттів"

Навчальний посібник
(українською мовою)

Комп'ютерна правка *І.Ю. Цицюра*
Комп'ютерна верстка *В.Г. Мазанко*
Макетування *В.Г. Мазанко*
Коректор *М.О. Паненко*

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 17.10.06. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 2,8. Обл.-вид. арк. 3,0.
Тираж 100 прим. Вид № 32. Зам. № 289. Ціна договірна

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5



ВИДАВНИЦТВО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника в повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі ІВМ РС, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублюкатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати *підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки*, – ми до Ваших послуг.

© Національний університет кораблебудування

✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,
видавництво НУК

☎ 8(0512) 47-83-86; 39-81-42, 39-73-39, fax 8(0512) 42-46-52;

E-mail: publishing@usmtu.edu.ua

