

УДК 621.762

А.В. Бєсов, А.М. Ніколенко¹

Розрахунок нагрівання порошку титана у плазмовому струмені

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
пр. Перемоги, 39, 02056, Київ, Україна, тел (044) 441-15-46
¹Українська інженерно-педагогічна академія,
вул. Університетська, 16, Харків, 61003, Україна*

Розроблено портативну плазмову установку, за допомогою якої на поверхні зубного протеза створюється ретенційний шар, що дозволяє збільшувати міцність зчеплення лицювального покриття з підкладкою. Зроблено розрахунок нагрівання порошку титана в плазмовому струмені. Показано, що частка титана, проходячи через плазмотрон, цілком чи майже цілком розплавляється.

Ключові слова: плазмова технологія, ретенційні покриття.

Стаття постуила до редакції 15.12.2002; прийнята до друку 4.02.2002.

В ортопедичній стоматології для збільшення міцності зчеплення лицювального покриття з матеріалом зубного протеза на його поверхні за допомогою плазмової технології створюють ретенційний шар [1].

Метод плазмового напилювання має великі можливості і не накладає значних обмежень на форму і розміри напилювальних виробів. Він дозволяє наносити високоякісні покриття з різних матеріалів на деталі – підкладки, виготовлені з металу, кераміки, гіпсу, створюючи тим самим розвитку поверхню.

Для проведення процесу плазмового напилювання в техніці використовуються промислові електродугові плазмові установки великої потужності. Тому цілком природно, що для рішення задачі нанесення покриття на ортопедичні стоматологічні вироби виникла нагальна потреба в розробці портативної плазмової установки малої потужності (0,5-2 кВт.), що могла б установлюватися на робочому столі зубного техника. У цьому зв'язку на кафедрі була

розроблена плазмова установка. При розробці такої установки була вирішена технічна задача, зв'язана з використанням для електроживлення, напруги побутової електромережі. Необхідно було збільшити розміри високотемпературної зони плазмового струменя для того щоб забезпечити достатній розгін і проплавлення напилювального матеріалу. Для цього в установці передбачена система подачі напилювального порошку безпосередньо в початок меж електродного проміжку, що збільшує час взаємодії матеріалу, який наноситься з потоком плазми.

Для того, щоб частка порошку брала участь у формуванні покриття, необхідно довести її до стадії плавлення чи до вископластичного стану. З використанням даних теоретичних і експериментальних досліджень дугової аргонної плазми [2-5] розрахуємо час, необхідний для переходу напилювальної частки в розплавлений стан:

$$\tau_p = \frac{\rho_r \cdot d_r}{2a} \cdot \left(\frac{c_r}{3} \cdot \ln \frac{T_r - T_{0r}}{T_r - T_{пл}} + \frac{L}{T_r - T_{пл}} \right), \quad (4.1)$$

де: ρ_r – щільність частки; d_r – діаметр частки; α – коефіцієнт тепловіддачі на границі частка-газ; C_r – теплоємність частки; T_r – температура газу; T_{0r} – початкова температура частки; $T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу частки; L – теплота плавлення матеріалу частки.

Розглядаємо як матеріал частки порошок ВТ 1-00. Щільність порошку $\rho_{вт} = 4,5 \text{ г/см}^3$, $T_{пл} = 1941 \text{ К}$. У проміжку розмірів $-01 + 0063$ виберемо розмір часток 008 чи $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Величина теплоємності: $C_r = 41868,00 \text{ Дж/кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{К}$. Температура аргонної плазми складає 10^4 К . Початкова температура часток порошку дорівнює кімнатної 293 К . Теплота плавлення приймається рівної $17179,00 \text{ Дж/моль}$. Для розрахунку коефіцієнта теплопередачі на границі розділу частка-газ скористаємося критерієм Біо

$$V_1 = \alpha \cdot \rho / \lambda, \quad (4.2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності.

При нагріванні часток плазмовим струменем присутні конвекційний і променистий теплообмін. З формули критерію Біо:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_K + \alpha_{ч}. \quad (4.3)$$

Для інженерних розрахунків приймається:

$$\alpha_\Sigma = (1,8 \div 1,15) \alpha_{ч}; \quad \alpha_{ч} = (\alpha_K + \alpha_{н})/2, \quad (4.4)$$

$$\alpha_{н} = C_{пр} [(T_r/10)^4 - (T_r^H/100)^4] / (T_r - T_r^H), \quad (4.5)$$

$$\alpha_K = C_{пр} [(T_r/10)^4 - (T_r^K/100)^4] / (T_r - T_r^K), \quad (4.6)$$

де: T_r – температура середовища, К; T_r^H і T_r^K – температури частки початкова і кінцева, відповідно; $C_{пр} = 1,5 \div 2,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ (для інженерних розрахунків у захисному і відновлювальному середовищі).

Підставивши вихідні дані у формули (4.5) і (4.6), одержуємо

$$\alpha_{н} = 25701,50 \text{ Вт/м}^2,$$

$$\alpha_K = 30977,192 \text{ Вт/м}^2,$$

$$\alpha_{ч} = (25701,50 + 30977,192)/2 = 28339,35 \text{ Вт/м}^2,$$

$$\alpha_\Sigma = 1,15 \cdot 28339,35 = 32590,25 \text{ Вт/м}^2.$$

Підставивши отримані значення коефіцієнта тепловіддачі у формулу (4.1), одержуємо:

$$\tau_p = 0,014 \text{ с.}$$

Таким чином, для переходу частки титана в розплавлений стан при середньому розмірі часток 80 мкм потрібен час, рівне $0,014 \text{ с}$.

Тепер по формулі (4.1) розрахуємо, за який час у розплавлений стан буде переведена частка титана розміром 50 мкм . Одержуємо значення $\tau_p = 0,009 \text{ с}$.

Отже, у порівнянні з часткою розмірів 80 мкм , час необхідне для повного розплавлення частки зменшилося на $0,005 \text{ с}$.

Розрахуємо, скільки часу частка знаходиться в зоні нагрівання. Використовуємо рівняння руху частки в газовому середовищі [2-5]

$$v_r = v_{0r} \cdot \sqrt{(3 \cdot C_a \cdot \rho_r / 2 \cdot d_r \cdot \rho_r)} \cdot X \cdot e^{(-G_r / G_r) \cdot \sqrt{(3 \cdot C_a \cdot \rho_r / 2 \cdot d_r \cdot \rho_r)} \cdot X}, \quad (4.7)$$

де: v_{0r} – швидкість газу в площині введення порошку в сопло; C_a – коефіцієнт аеродинамічного опору; ρ_r – щільність газу; ρ_r – щільність матеріалу частки; d_r – діаметр частки; G_r – витрата порошку; G_r – розхід газу; X – шлях, який проходить частка в плазмотроні.

Щільність аргону складає $1,78 \text{ кг/м}^3$, щільність матеріалу 4500 кг/м^3 , витрати порошку і газу відповідно рівні $6,9 \cdot 10^{-7} \text{ кг/с}$ і $22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{год}$, для газу також $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$,

з огляду на сумарні витрати плазмоутворюючого і транспортуючого газів. Діаметр камери плазмотрона складає $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, довжина $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, на цьому шляху відбувається нагрівання частки діаметром 80 мкм .

Плазмоутворюючий газ разом із транспортуючим, утворюючи плазму, нагрівається до 10^4 К , і отже, змінює свій обсяг і в замкнутому просторі плазмотрона збільшує свою швидкість. Розрахуємо швидкість газу. Знаючи, що один кіломоляр ар-

гону $M = 39,8$ кг/кмоль, обсяг камери плазмотрона $V_{пл} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$, маса аргону, що надійшов у камеру $m = V_{пр} \rho = 5,0 \cdot 10^{-7}$ кг, обчислимо збільшення обсягу при нагріванні. Прийемо, що плазма високої щільності і застосуємо рівняння Менделєєва-Клайперона:

$$P \cdot V = (m/M) \cdot R \cdot T; \quad (4.8)$$

$$V_1 = (m/P \cdot M) \cdot R \cdot T_1; \quad V_2 = (m/P \cdot M) \cdot R \cdot T_2 \quad (4.9)$$

де: V_1 і V_2 – обсяги газу до і після нагрівання в плазмотроні відповідно; T_1 і T_2 – температура початкова і температура аргонної плазми, відповідно.

Обчислимо зміну обсягу ΔV по формулі $\Delta V = (m/P \cdot M) \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$ (4.10)

Одержуємо значення $\Delta V = 101,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$.

З огляду на початковий обсяг $3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$, кінцевий обсяг складе

$$V_{\Sigma} = 3 \cdot 10^{-7} + 101,2 \cdot 10^{-7} = 1,04 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

При витраті $P_{нач} = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ при температурі $T = 293 \text{ К}$, камера плазмотрона

заповнюється за час τ_3 :

$$\tau_3 = V_{пл} / P_{нач}; \quad \tau_3 = 3 \cdot 10^{-7} / 6,1 \cdot 10^{-6} = 0,05 \text{ с.}$$

Після нагрівання газ займає обсяг $V_{\Sigma} = 1,04 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. Витрата нагрітого газу в плазмотроні дорівнює

$$P_k = V_{\Sigma} / \tau_3; \quad P_k = 1,04 \cdot 10^{-5} / 0,05 = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Далі, знаючи кінцеву витрату газу і переріз каналу плазмотрона S , можна обчислити швидкість газу $v_{ог}$:

$$v_{ог} = P_k / S; \quad v_{ог} = 2,0 \cdot 10^{-4} / \pi \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 7,07 \text{ м/с}$$

Коефіцієнт аеродинамічного опору C_a обчислюємо по формулі:

$$C_a = a_i \cdot Re^{-Bi}, \quad (4.11)$$

де: Re – число Рейнольдса; a_i , b_i – коефіцієнти, що залежать від числа Рейнольдса.

Приймаємо значення числа Рейнольдса для розрахунків $Re = 4100$, для нього коефіцієнти $a_i = 24$; $b_i = 0,6$. Тоді

$$C_a = 24 \cdot 4100^{-0,6} = 0,16.$$

Підставивши відомі й обчислені значення у формулу (4.7), одержуємо:

$$v_r = 7,07 \cdot \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}} \cdot e^{((-6,9 \cdot 10^{-7} / 6,1 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}})} = 1,07 \text{ м/с.}$$

Обчислимо, який час частка діаметром $d = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ знаходиться в плазмотроні:

$$\tau = X / v_r; \quad \tau = (20 \cdot 10^{-3}) / 1,07 = 0,0187 \text{ с}$$

Тому що вище обчислений час, необхідний для переходу частки діаметром $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (80 мкм) у розплавлений стан,

склало 0,014 с, те така частка буде переведена в розплавлений стан.

Розрахуємо швидкість частки діаметром 50 мкм за інших рівних умов по формулі (4.7)

$$v_r = 7,07 \cdot \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}} \cdot e^{((-6,9 \cdot 10^{-7} / 6,1 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}})} = 0,2645 \text{ м/с.}$$

Час перебування в камері плазмотрона:

$$\tau = X / v_r$$

$$\tau = (20 \cdot 10^{-3}) / 0,2645 = 0,0053 \text{ с.}$$

Для переходу частки діаметром 50 мкм у розплавлений стан потрібен час 0,009 с. Таким чином, частка порошку тільки сильно нагріється, але не розплавиться.

Збільшимо значення витрат транспортуючого і плазмоутворюючого газу, за інших рівних умов. Прийемо сумарну витрату $P_n = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{год}$ чи $P_k = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. При цьому витраті камера

плазмотрона буде заповнюватися за час τ_3 :

$$\tau_3 = V_{пл} / P_{нач}$$

$$\tau_3 = 3 \cdot 10^{-7} / 8,3 \cdot 10^{-6} = 0,036 \text{ с.}$$

Обсяг нагрітого газу $V_{\Sigma} = 1,04 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ при цій швидкості заповнення здобуває швидкість

$$v_{ог} = P_k / S; \quad (4.12)$$

де: P_k – кінцева витрата нагрітого газу; S – переріз камери плазмотрона.

Витрата нагрітого газу складе:

$$P_k = V_{\Sigma} / \tau_3$$

$$P_k = 1,04 \cdot 10^{-5} / 0,036 = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$v_{ог} = P_R/S;$$

$$v_{ог} = 2,8 \cdot 10^{-4} / \pi \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 9,9 \text{ м/с.}$$

Швидкість частки діаметром 80 мкм підставимо у формулу (4.7) і одержимо

$$v_r = 9,9 \cdot \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}} \cdot e^{((-6,9 \cdot 10^{-7} / 6,1 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}})} = 0,2345 \text{ м/с.}$$

Час перебування частки в плазмотроні:
 $\tau = X/v_r$
 $\tau = (20 \cdot 10^{-3}) / 0,2345 = 0,0853 \text{ с.}$
 Тому що раніше обчислений час пере-

ходу частки в розплавлений стан $\tau = 0,014 \text{ с}$, то частка розплавляється.
 Швидкість частки з діаметром 50 мкм по рівнянню (4.7) складе

$$v_r = 9,9 \cdot \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}} \cdot e^{((-6,9 \cdot 10^{-7} / 6,1 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{(3,0 \cdot 0,16 \cdot 1,78) / (2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 4500) \cdot 20 \cdot 10^{-3}})} = 0,3747 \text{ м/с.}$$

Час перебування частки в плазмотроні:
 $\tau = X/v_r$
 $\tau = (20 \cdot 10^{-3}) / 0,3747 = 0,0534 \text{ с.}$

Час переходу частки в розплавлений стан $\tau_p = 0,009 \text{ с}$, тому частка цілком розплавляється.

Таким чином, проведені розрахунки показують, що частки, проходячи через плазмотрон, розплавляються цілком чи майже цілком. Це підтверджується візуально при розгляді на компараторі часток вихідних порошків і після оплавлення добре помітна зміна їхньої форми.

Розроблено портативна плазмова установка, що дозволяє створювати на поверхні зубного каркаса ретенційний шар.

Зроблено розрахунок нагрівання порошку титана в плазмовому струмені. Показано, що частки, проходячи через плазмотрон, розплавляються цілком чи майже цілком.

*А.В. Бесов – к.т.н., доцент кафедри високотемпературних матеріалів;
 А.М. Ніколенко – д.ф.-м.н., професор кафедри загальної та експериментальної фізики.*

Висновки

- [1] А.В. Бесов. Исследование прочности сцепления плазмонапыленных композиций с облицовочным покрытием // *Вестник Национального технического университета Украины. Киевский политехнический институт. Машиностроение*, **41**, сс. 246-250 (2002).
- [2] Б.А. Ляшенко, В.В. Ришин, В.Г. Зильберберг, С.Ю. Шаривкер. Прочность сцепления плазменных покрытий с основой // *Порошковая металлургия*, (4) сс. 86-100 (1969).
- [3] Н.П. Андреева, И.Я. Аристова, И.К. Батрак, Г.П. Сорока и др. Научно-технический отчет "Диагностика и моделирование процесса плазменного напыления". ВНИИТ, рег.№ X.01582 от 30.05.75, 116 с.
- [4] *Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник* / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.А. Сидоренко и др. Наукова думка, К., 543 с (1987).
- [5] К.К. Палеха, А.П. Эпик. *Физико-химические основы нанесения покрытий: Учебное пособие*. УМКВО, К., 224 с (1992).

A.V. Besov, A.M. Nikolenko¹

Research of phase structure of powders titan, nixrom, corrosion-proof steel and nikelaluminium after drawing of coverings with the help of plasma

*National Technical University "Kyiv Polytechnical Institute"
39, Peremogy Av., Kyiv, 02056, Ukraine, tel. (044) 441-15-46
1Ukraine ngeneering-Pedagogical Academy,
16, University St., Kharkiv, 61003, Ukraine*

In work the phase structure of powders titan, nixrom, corrosion-proof steel and nikelaluminium put by a plasma method on tooth artificial limbs was investigated. The study of phase structure before and after drawing was carried out(spent) with the help rentgenstructural of the analysis. Is shown, that the powders past through a plasma jet have not changed the phase structure and period of a crystal lattice.