

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

На правах рукопису

ІЩЕНКО Євгенія Семенівна

МОДИФІКАЦІЯ І ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ІМПУЛЬСНИМИ
ПОТОКАМИ ПЛАЗМИ

Спеціальність 05.02.01 - "Матеріалознавство в машино-
будуванні (промисловість)"

Автореферат дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних
наук

Київ-1993



Роботу виконано в Інституті
ім.В.М.Бакуля АН України

Наукові керівники - доктор технічних наук, професор
Урюков Б.О.
кандидат технічних наук Гасін Д.А.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Андрєєв В.Д.
кандидат технічних наук Коржик В.М.

Провідна установа - Авіаційний науково-технічний комплекс
"Антонов"

Захист відбудеться "24" червня 1993 р. о 13-30 годинах
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016.10.01 в Інституті
надтвердих матеріалів ім.В.М.Бакуля АН України за адресою:
254153, м.Київ-153, вул.Автозаводська, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній
бібліотеці Інституту. Відгуки, засвідчені печатком, просимо
направляти на адресу спеціалізованої вченої ради.

Автореферат розіслано "18" травня 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук

А.Л.Майотренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРАЦІ

Актуальність. Важливим завданням, що стоїть сьогодні перед усіма галузями промисловості як у нашій країні, так і за рубежом, є розробка нових ресурсозберігаючих, екологічно чистих і високопродуктивних технологій, що забезпечують створення нових матеріалів з заданими властивостями.

Одним із шляхів вирішення цього завдання є модифікація поверхневого шару матеріалу деталей машин і надання цьому шару властивостей, які відрізняються від властивостей основного матеріалу деталі. Ефективним методом такої обробки у наш час є обробка поверхні висококонцентрованими потоками енергії.

Найбільш перспективний спосіб обробки – використання плазмових потоків, що генеруються імпульсними плазмовими прискорювачами при розрядженні смісних нагромаджувачів енергії. Досягнуті при цьому енергетичні параметри потоку відповідають параметрам, які одержують за допомогою лазерного, іонного та електронно-променевого методів при ККД, що перевищує ККД традиційних технологій зміцнення і обробки. Процеси, які відбуваються в матеріалі під дією на нього електронних і іонних пучків, докладно описано в літературі, тоді як процеси взаємодії імпульсних плазмових потоків з перешкодою вивчено недостатньо.

Актуальність проблеми обробки поверхні плазмовими потоками визначається необхідністю створення нових високоєфективних технологій, використання яких дасть можливість підвищити ресурс праці деталей машин при експлуатації в екстремальних умовах.

Мета праці – розробка технологічного процесу поверхневої обробки деталей авіаційної техніки за допомогою імпульсних потоків плазми шляхом модифікації структури поверхневого шару для поліпшення його експлуатаційних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз процесу взаємодії імпульсного потоку плазми з оброблюваною поверхнею.
2. Розробити модель теплового стану матеріалу перешкоди під дією на неї імпульсного потоку плазми.

3. Вивчити вплив енергетичних параметрів імпульсного потоку плазми на процес обробки поверхні.

4. Дослідити структуру, фізико-механічні і фізико-хімічні властивості поверхневого шару матеріалу, який було піддано дії імпульсного потоку плазми.

5. Провести дослідно-промислову перевірку результатів досліджень. Розробити технологічні рекомендації для реалізації процесу обробки і зміцнення деталей авіаційної техніки імпульсними потоками плазми.

Наукова новизна. На основі теоретичного і експериментального дослідження процесу взаємодії імпульсного плазмового потоку з поверхнею перешкоди і впливу параметрів процесу обробки на структуру, фізико-механічні і фізико-хімічні властивості оброблюваних матеріалів встановлено такі нові положення:

- визначено залежність зміни температури поверхні і товщини проплавленого шару матеріалу перешкоди від параметрів імпульсного потоку плазми;

- встановлено залежності мікротвердості і шорсткості обробленої поверхні від енергетичних параметрів процесу обробки;

- визначено залежність розмірів фрагментів покриття $ZrO_2 + Y_2O_3$ і площі поверхні утворених тріщин від енергетичних параметрів імпульсного потоку плазми;

- встановлено залежність впливу імпульсно-плазмової обробки багатшарових теплозахисних покриттів з $Ni-Cr-Al-Y/ZrO_2 - Y_2O_3$ на динаміку формування шару Al_2O_3 в зоні контакту металу з керамікою;

- визначено вплив енергетичних параметрів процесу імпульсно-плазмової обробки на зміну корозійної стійкості титанового сплаву ВТЗ-І.

Практична цінність праці. Внаслідок проведених досліджень розроблено технологічний процес і рекомендації щодо імпульсно-плазмової обробки лопаток газотурбінних двигунів з багатшаровими теплозахисними покриттями з $Ni-Cr-Al-Y/ZrO_2 - Y_2O_3$. Дослідно-промислова перевірка результатів досліджень виконана в умовах НВО "Сатурн". Розрахункова економічна ефективність від впровадження процесу обробки становить ~ 26 млн.крб. (на 01.09.92) за рахунок зниження вартісної оцінки продукції внаслідок збільшення ресурсу праці виробів і умовного зменшення обсягу їх випуску.

Автор захищає:

- теоретичну модель для інженерних розрахунків теплового стану матеріалу перешкоди під дією на нього імпульсного потоку плазми;

- результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу обробки металічних і неметалічних матеріалів, їх структурних особливостей, фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей;

- результати експериментальних досліджень впливу енергетичних і технологічних параметрів взаємодії імпульсного потоку плазми з перешкодою на технологічних процес обробки багатомарових теплозахисних покриттів.

Анотація праці. Основні положення дисертаційної праці доповідалися і обговорювались на наукових семінарах відділу фізико-хімії порошків і плазових технологій ІНМ АН України (Київ, 1991-1992); на XVI і XVII Міжнародних конференціях молодих учених ІНМ АН України "Одержання, властивості і застосування надтвердих матеріалів" (Київ, 1991-1992); на науковому семінарі кафедри фізичної електроніки Киргизького державного університету (Бишкек, 1991); на науково-технічній раді АНТК "Антонов" (Київ, 1992); на секції Вченої ради ІНМ АН України "Надтверді синтетичні і композиційні матеріали і їх властивості" (Київ, 1992).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 6 друкованих праць.

Структура і обсяг праці. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, загальних висновків, списку використаної літератури і додатків. Основний зміст праці викладено на 125 сторінках машинописного тексту, який містить 73 рисунки і 12 таблиць. У бібліографії наведено 96 назв праць вітчизняних і зарубіжних авторів.

ЗМІСТ ПРАЦІ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджень в області створення технологій поверхневої обробки матеріалів імпульсними потоками плазми з метою збільшення ресурсу праці деталей машин і механізмів при експлуатації в умовах дії високих температур, навантажень і корозійних середовищ. Сформульовано мету праці і основні напрямки досліджень.

У першій главі здійснено аналіз основних сучасних методів поверхневої обробки матеріалів висококонцентрованими потоками енергії, зокрема іонного, електронно-променевого, лазерного і плазмового.

Однією з основних переваг використання концентрованих потоків енергії є можливість досягти порівняно простими технічними засобами високих густин потоку енергії на поверхні оброблюваного виробу, що обумовлює широкий діапазон реалізації технологічних процесів. При цьому результат поверхневої обробки (привка виробів, зварювання, гартування, очистка і т.ін.) залежить насамперед від таких енергетичних параметрів процесу, як густина потужності і густина енергії. Зіставлення основних характеристик розглянутих методів показало, що вони мають сумірні за порядком величини енергетичні параметри і можуть бути використані для реалізації одних і тих самих технологічних процесів з урахуванням економічної доцільності.

В останній час досить широке застосування знаходять зміцнюючі технології, які ґрунтуються на використанні імпульсних плазмових потоків. Така обробка не тільки значно змінює механічні електрофізичні та інші характеристики конструкційних матеріалів, але й підвищує їх корозійну стійкість. Поряд з цим, сьогодні відсутні промислове устаткування і технологічні рекомендації, за допомогою яких можна здійснити процес обробки імпульсним плазмовим потоком з заданими параметрами.

Теоретичні і експериментальні дослідження електроімпульсних плазмових інжекторів і процесів, що відбуваються під час обробки, не дають повного уявлення про реакції, які протікають в інжекторі, та процеси взаємодії імпульсного потоку плазми з оброблюваною поверхнею.

Недостатньо вивчено вплив енергетичних параметрів імпульсного плазмового потоку на структуру і фізико-механічні властивості оброблюваних матеріалів.

Однак, як свідчить аналіз даних літератури, імпульсно-плазмова обробка є перспективним методом, а його дослідження і розвиток допоможуть у створенні нових високоєфективних ресурсозберігаючих технологій.

На основі вивчення питання досліджень була поставлена мета даної праці і визначені шляхи її дослідження.

У другій главі зроблено огляд експериментального устаткування і методів дослідження процесу взаємодії імпульсного потоку плазми з оброблюваною поверхнею. Експериментальна установка складається з джерела живлення, нагромаджувача енергії, пристрою для комутації розряду, електродної системи напрямленої дії і вакуумної системи. При цьому весь процес обробки поверхні, тобто її нагрівання, можна розглядати як такий, що складається з кількох етапів:

1. Перетворення електроенергії, накопиченої в конденсаторах, у теплову і кінетичну енергію плазмового потоку.

2. Взаємодія плазмового потоку з оброблюваною поверхнею.

3. Перетворення кінетичної і теплової енергії плазмового потоку в теплову енергію, яка діє на матеріал оброблюваної деталі, і здійснення структурних і фазових перетворень в оброблюваному матеріалі.

Реалізація всіх етапів процесу і зумовлює комплекс фізико-механічних і фізико-хімічних явищ, необхідних для обробки поверхневого шару. Величина запасеної енергії була вибрана на основі розрахунку, виходячи з умови, що її значення повинне бути достатнім для нагрівання ряду матеріалів різних класів (метали, оксиди, карбідні) до температури плавлення. Максимальна величина запасеної енергії в нагромаджувачі порівнювала $25 \cdot 10^3$ Дж при робочій напрузі $5 \cdot 10^3$ В. Кристалічний плазмовий інжектор – це електродна система напрямленої дії, в якій розряд проходить між центральним і зовнішнім електродами. Розряд носить періодичний характер. Період розрядного струму змінювався від $6 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ с.

Зміна структури, фазового складу та інших фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу відбувається при взаємодії імпульсного плазмового потоку з матеріалом перешкоди.

Вивчення процесу витікання плазмового потоку з інжектора і взаємодії його з перешкодою здійснювалося шляхом візуалізації зазначених процесів за допомогою високошвидкісної установки ВВУ-І, яка працює в режимі фотозвертки і покадрової зйомки.

Для дослідження теплових характеристик плазмового потоку було використано калориметр. Поверхня калориметра, що піддавалася дії плазмового потоку, має вигляд пористої (стілнькової)

структури для зменшення випромінювання з калориметра назовні і водночас для збільшення точності вимірів.

Третя глава присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням процесу взаємодії імпульсного потоку плазми з поверхнею. Вивчення структури плазмового потоку показало, що вона має дискретний характер, обумовлений неоднорідністю плазми, яка витікає з інжектора. Швидкість потоку зменшується в часі. При взаємодії потоку плазми з перешкодою на її поверхні формується уларно-отиснутий шар, товщина якого дорівнює $(0,8 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$ м. Радіаційне нагрівання матеріалу здійснюється за рахунок випромінювання з цього шару. При взаємодії з перешкодою відбувається радіальне розтікання потоку по поверхні перешкоди. Проведені експерименти свідчать, що швидкість радіального розтікання залежить від величини запасеної енергії і періоду розрядного струму.

Визначення інтегральних теплових параметрів плазмового потоку здійснювалося шляхом його калориметрування. Встановлено, що кількість теплоти, яка передається на перешкоду, зростає зі збільшенням запасеної енергії до $\sim I \cdot 10^{-4}$ Дж, після чого спостерігається деяке її зниження, викликане втратами енергії за рахунок поглинання випромінювання стінками зовнішнього електрода інжектора. Встановлено також, що зі збільшенням запасеної енергії від $1 \cdot 10^3$ Дж до $16 \cdot 10^3$ Дж тепловий ККД зменшується з 35% до 14%.

При теоретичному аналізі теплової дії потоку плазми на поверхню перешкоди допускалося, що основними джерелами теплової дії на поверхню є випромінювання загальмованої зони і конвективна теплопердача від потоку, який безпосередньо взаємодіє з поверхнею. Зона гальмування обмежувалася циліндром висотою l_c і радіусом R , що дорівнював радіусові отвола. На оброблювану поверхню падає частка загального потоку випромінювання:

$$q_{uw} = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + l_c/R} q_{uo} \quad (1)$$

Для наближених розрахунків конвективного теплового потоку використовувалася формула:

$$Nu_r = \sqrt{\frac{2}{\pi}} Re_r Pr \quad (2)$$

яка перетворювалася у такий вид:

$$f_{kw} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{\rho' \lambda'}{c_p'} \frac{u'}{c}} (h' - h_w), \quad (3)$$

де ρ' - густина, λ' - коефіцієнт теплопровідності, c_p' - теплоємність, h' - ентальпія газу в зоні гальмування, h_w - ентальпія газу при температурі отірки, u' - швидкість у зоні гальмування.

Звідси виходить, що, знаючи динаміку ударної хвилі і стан середовища в загальмованій зоні, можна розрахувати конвективний тепловий потік на оброблюваний виріб.

Для розрахунку процесів в інжекторі було прийнято таку схему нагрівання і витікання плазми: енергія розряду вкладається в газ зі змінними значеннями густини ρ_0 , тиску P_0 , температури T_0 (ентальпії h_0), який міститься в форкамері заданого об'єму V і витікає через ствол з площею перерізу S_k .

Для аналізу умов витікання з форкамери розглядалася схема руху, аналогічна постановці задачі про ударну трубу. Використовуючи розв'язок для одновимірного нестационарного руху, одержуємо, що на початку ствола швидкість дорівнює швидкості звуку, далі в стволі вона зростає, але з часом ($t \rightarrow \infty$) наближається до звукової. Граничне положення ударної хвилі буде відповідати тому, що вона виродиться в звукову, на якій параметри потоку не змінюються. Для спрощення розрахунків допускалося, що протягом $t_{пр}$ на перешкоді існує повністю загальмована зона, після чого відбувається безстрибкове натікання газу на перешкоду.

Для розрахунку потоку випромінювання (q_u) використовувалися співвідношення в наближенні об'ємного випромінювання. Шляхом апроксимації розрахункових даних одержано:

$$q_u \approx 4,11 \cdot 10^{11} \rho^2 T^{3,32-3,09 \lg T}, \quad (4)$$

де ρ - густина; T - температура, еВ.
Зв'язок між температурами і іншими параметрами плазми має такий вид:

$$T = \frac{1,48 T_a \bar{h}}{1 + 0,48 \bar{h}^{0,4} \bar{p}^{-0,07}}. \quad (5)$$

де $\bar{h} = h/h_n$, $\bar{p} = P/P_n$, базові значення h_n і P_n від-

повідають нормальним умовам. Протягом часу $\Delta t = \Delta t_{пр}$ на перешкоду діє тепловий потік:

$$q_w = \frac{\ell_c}{2(1+\ell_c/R)} q'_u + \frac{\ell - \ell_c}{2(1+\frac{\ell - \ell_c}{R})} q_u, \quad (6)$$

де q'_u - об'ємне випромінювання в загальмованій зоні;
 q_u - об'ємне випромінювання потоку; ℓ - відстань від початку ствола до перешкоди. Далі залишається друга складова потоку, але до неї додається конвективна складова, тобто при $\Delta t > \Delta t_{пр}$:

$$q_w = \left(\frac{2}{\pi} \frac{\rho_{но} \lambda_{но} a_0}{c_{рно} R} \right)^{0,5} h_a \left(\frac{\rho}{\rho_{но}} M \right)^{0,5} \left(\frac{h}{h_a} \right)^{1,25} + \frac{\ell - R/2}{1 + 2\ell/R} q_u, \quad (7)$$

де індекс "но" відноситься до умов перед початком розряду, а "а" - до умов у навколишньому середовищі.

Для розрахунку дії теплового потоку на перешкоду необхідно розрахувати ряд параметрів. У потоці, що витікає з зовнішнього електрода:

$$M = \frac{U}{a_a} = \frac{2}{\alpha+1} \sqrt{\frac{P}{r}} \frac{1}{1+\tau}; \quad \frac{h}{h_a} = \frac{P}{r} \left(\frac{2}{\alpha+1} \frac{1}{1+\tau} \right)^2; \quad (8)$$

$$\frac{P}{P_a} = P \left(\frac{2}{\alpha+1} \frac{1}{1+\tau} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha-1}}; \quad \frac{\rho}{\rho_a} = r \left(\frac{2}{\alpha+1} \frac{1}{1+\tau} \right)^{\frac{2}{\alpha-1}},$$

де

$$\frac{P}{r} = \frac{\bar{Q} A}{A_n}; \quad P = \bar{Q} \frac{P_{00}}{P_a}; \quad \bar{Q} = \frac{(\alpha-1) Q}{A P_{00}}; \quad r = \frac{P_{00}}{P_a} \frac{A_n}{A};$$

$$\tau = \frac{t}{t_0}; \quad t_0 = \frac{2}{\alpha-1} \left(\frac{\alpha+1}{2} \right)^{\frac{\alpha+1}{\alpha-1}} \frac{A}{a_{00} S_k};$$

A_n - об'єм плазмутворючого газу; a_a - швидкість звуку;

Q - затрачувана енергія; індекс "00" відповідає параметрам загальмованої плазми в форкамері.

У загальмованій області:

$$\frac{\mathcal{D}'_1}{a_a} = M_1 \left[\sqrt{\left(\frac{\alpha+1}{4} \right)^2 + 1} - \frac{3-\alpha}{4} \right] = c M_1; \quad \frac{P'_1}{P_1} = \frac{1+c}{c}; \quad (9)$$

$$\frac{h'_1}{h_1} = \frac{c}{1+c} [1 + \alpha(1+c)]; \quad \frac{P'_1}{P_1} = 1 + \alpha(1+c),$$

де M_1, h_1, ρ_1, P_1 - визначаються за попередніми рівняннями при $\tau_1 \approx 0$.

Для розрахунку температур перешкоди використовувалося одновимірне рівняння теплопровідності, а перешкода вважалася напівпростором:

$$\frac{d}{dt} \int_0^{\delta} H dy = q_w; \quad q_w = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (10)$$

H - теплоємність одиничного об'єму.

Загальна товщина прогрітого шару визначається з виразу:

$$q_w = \lambda \frac{T_0 - T_a}{\delta} \alpha; \quad \alpha = \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right)^{-1}. \quad (11)$$

Товщину проплавленого шару знаходимо з профілю теплоємності:

$$\frac{\delta_n}{\delta} = 1 - \left(\frac{H_n'}{H_0} \right)^{1/4}. \quad (12)$$

Вводячи нову функцію теплового стану матеріалу

$\Psi_0 = H_0 \lambda K \mathcal{L} (T_0 - T_a)$, де $K \mathcal{L} = \pi/4$, одержуємо:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\Psi_0}{q_w} = q_w. \quad (13)$$

Знаючи залежність $q_w(t)$, знаходимо $\Psi_0(t)$. Для моменту $t = t_1 + \Delta t_{np}$, тобто в кінці першого інтервалу:

$$\Psi_{0np} = \frac{1}{4} \left[\frac{R}{3} q_u' + \frac{\ell - R/2}{1 + \frac{\ell - R/2}{R}} q_u \right] \left[R \left(1 - 2 \ln \frac{3}{2} \right) q_u' + \frac{\ell - R/2}{1 + \frac{\ell - R/2}{R}} q_u \right] \Delta t_{np}. \quad (14)$$

На протязі другого інтервалу:

$$\Psi_0 = \left[q_k + \frac{\ell - R/2}{2 \left(1 + \frac{\ell - R/2}{R} \right)} q_u \right] \left\{ \frac{\Psi_{0np}}{q_k + \frac{\ell - R/2}{2 \left(1 + \frac{\ell - R/2}{R} \right)} q_u} + \int_{t_1 + t_{np}}^t \left[q_k + \frac{\ell - R/2}{2 \left(1 + \frac{\ell - R/2}{R} \right)} q_u \right] dt \right\}. \quad (15)$$

На основі проведених розрахунків побудовано залежності температури і глибини проплавленого шару від часу (рис. I і 2).

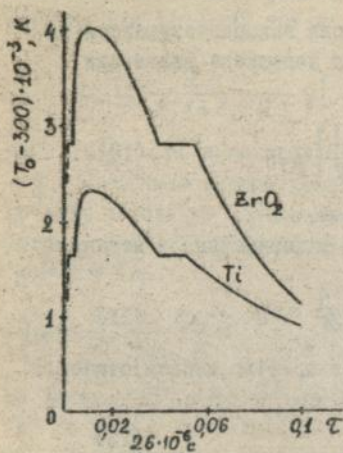


Рис.1. Часова залежність температур поверхні оброблюваних матеріалів

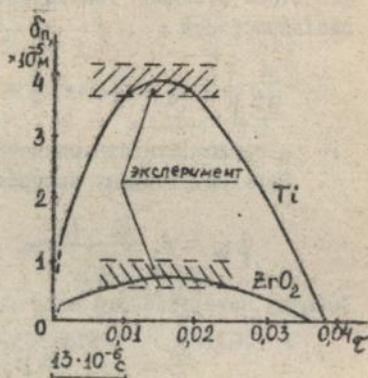


Рис.2. Зміна в часі температури проплавленого шару оброблюваний матеріалів

У четвертій главі представлено результати досліджень процесу модифікації поверхні матеріалу при взаємодії з плазмовим потоком. Для дослідження було взято титановий сплав ВТЗ-І і теплозахисне покриття (ТЗП) з $ZrO_2 + Y_2O_3$, оскільки ці матеріали необхідні сьогодні в авіаційній промисловості і вони знаходять широке застосування в трактах газотурбінних двигунів, а також покриття з Al_2O_3 .

Дослідження поверхні і структури ВТЗ-І показало, що при короткому періоді розряду ($\sim 6 \cdot 10^{-5}$ с) відбувається інтенсивне плавлення і розбризкування розплаву в зоні взаємодії з потоком. При цьому формується модифікований "білий" поверхневий шар з перепадами по товщині від $3 \cdot 10^{-6}$ м до $15 \cdot 10^{-6}$ м. Збільшення періоду розряду спричинює більш рівномірне проплавлення і збільшення товщини модифікованого шару до $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ м.

Незалежно від способу нанесення ТЗП (електронно-променевого чи плазмового) під дією імпульсного потоку плазми відбувається оскління і фрагментація поверхневого шару покриття.

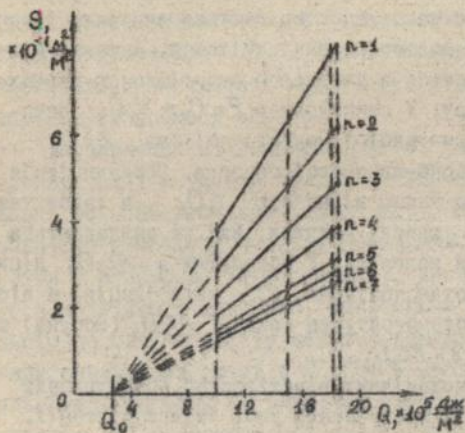


Рис.3. Залежність площі поверхні утворених тріщин від кількості теплової енергії

Внаслідок проведеного аналізу процесу фрагментації встановлено, що зі збільшенням кількості теплової енергії, що діє на матеріал, відбувається збільшення розміру утворених фрагментів і глибини тріщин, а загальний периметр "нової" поверхні зменшується. При значеннях Q_0 , що відповідають запасеної енергії $W \approx 12 \cdot 10^3$ Дж, спостерігається різка зміна перелічених параметрів, пов'язана зі збільшенням кінетичної складової енергії плазмового потоку. Площа поверхні утворених тріщин зростає лінійно (рис.3).

Для оцінки енергії, яка йде на утворення S , використано \int - інтеграл. У результаті розрахунків одержано його значення $\int = 20,27$ Дж/м². Зіставлення цього значення з величинами утворених площ свідчить, що в діапазоні $1 \cdot 10^3$ Дж $< W \leq 9 \cdot 10^3$ Дж практично вся енергія потоку, що діє на поверхню, витрачається на її нагрівання, а фрагментація викликається релаксацією залишкових напружень у покритті. Перевищення указаних значень при обробці небезпечне, оскільки оброблювана поверхня піддається ударній дії, що може призвести до руйнування кераміки.

Аналогічний характер зміни поверхні одержано і при обробці покриттів з Al_2O_3 .

Дослідження структури покриттів показало, що при обробці електронно-променевих конденсатів на поверхні утворюється шар застиглої розплаву товщиною $(8 \pm 10) \cdot 10^{-6}$ м. У плазмових газотермічних покриттях формується трансформований шар товщиною $(10 \pm 12) \cdot 10^{-6}$ м, який має стовпчасту структуру, що викликається кристалізацією розплаву в напрямку відведення тепла за рахунок низької теплопровідності матеріалу і відносно повільного остигання.

Рентгенофазовий аналіз досліджуваних матеріалів показав, що титановий сплав ВТЗ-І містить у вихідному стані $(\alpha + \beta)$ -фазу. Після обробки на дифрактограмах спостерігається зникнення інтенсивності ліній, деяке їх розширення і зміщення, а також підвищення фону, що пов'язується з частковою аморфізацією поверхневого модифікованого шару. У покриттях з $ZrO_2 + Y_2O_3$ встановлено наявність тетрагональної і моноклінної фаз ZrO_2 , що зберігаються після імпульсно-плазмової обробки. Сполуки ітрію не виявлено, що викликано малою кількістю Y_2O_3 , а також тим, що він утворює з ZrO_2 тверді розчини, які не розпадаються при тривалій ізотермічній видержці. У покриттях з Al_2O_3 після наплення присутня низькотемпературна γ -модифікація, а після обробки фіксується високотемпературна фаза α - Al_2O_3 (корунд) з невеликими вкрапленнями γ - Al_2O_3 .

Дослідження фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів здійснювалося з урахуванням умов їх експлуатації.

Встановлено, що внаслідок обробки мікротвердість ВТЗ-І зростає залежно від параметрів процесу в 1,2-1,7 рази. Визначено залежності $H_m(W)$ і $H_m(T)$. Зі збільшенням запасеної енергії до $W \approx 9 \cdot 10^3$ Дж мікротвердість зростає, після чого її величина стабілізується, що пов'язується зі зникненням теплового ККД процесу при збільшенні W . Збільшення періоду розрядного струму T веде до зникнення мікротвердості, оскільки при цьому зникається швидкість підроду енергії по оброблюваній поверхні, а, відповідно, і швидкість охолодження.

При дослідженні корозійної стійкості ВТЗ-І встановлено, що після обробки стаціонарний потенціал зміщується в область більш позитивних значень, до того ж, чим вище енергетика процесу, тим сильніше це зміщення. Для зразків оброблених при зарядній напрузі $U_z = 3,5 \cdot 10^3$ В ($W = 12,25 \cdot 10^3$ Дж), на кривій поляризації область активного розчинення відсутня, що свідчить про пасивацію, викликану частковою аморфізацією титанового сплаву. Досягнутий при цьому ступінь захисту поверхні становить 97%.

Вивчення характеру зміни рельєфу поверхні при імпульсно-плазмовій обробці показало, що у ВТЗ-І параметр R_a вищий за вихідне значення і залежить від періоду розрядного струму і запасеної енергії. Параметри R_p і R_{max} після обробки в діапазоні $1 \cdot 10^3$ Дж $\leq W \leq 9 \cdot 10^3$ Дж зменшуються, що свідчить про

вирівнювання "піків" і "заліковування" раковин. Вихідна шорсткість плазмових покриттів з $ZrO_2 + Y_2O_3$ дещо вища, ніж в електронно-променевих. Внаслідок обробки всі параметри шорсткості зменшуються більш ніж у 2 рази. Аналогічні результати одержано і для покриттів з Al_2O_3 . На основі проведених досліджень встановлено залежність шорсткості поверхні від енергетичних параметрів процесу обробки.

Конденсаційні покриття $Me-Cr-Al-Y/ZrO_2-Y_2O_3$ при експлуатації в умовах частих тепломінів руйнуються шляхом сиювання зовнішнього керамічного шару. Це відбувається через те, що зовнішня атмосфера, завдяки стовпчастій структурі керамічного покриття і міжзернистій пористості, проникає на поверхню металічного жаростійкого покриття, викликаючи його окислення. Внаслідок цього на межі контакту метал-кераміка формується шар Al_2O_3 , який сколюється разом з ZrO_2 . Дослідження впливу імпульсно-плазмової обробки на термічну стабільність і довговічність багатшарових ТЗП здійснювалось шляхом тривалої ізотермічної вилержки.

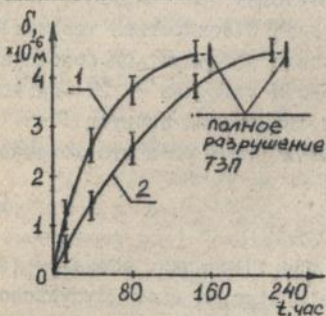


Рис.4. Динаміка формування шару Al_2O_3 в зоні контакту металу з керамікою

Швидкість росту шару окалини у вихідних і оброблених зразків неоднакова (рис.4). Повне руйнування необроблених зразків наступало після 160 годин вилержки, а оброблених — після 240 год. Це викликане тим, що після імпульсно-плазмової обробки зменшується доступ високотемпературного газового потоку до поверхні металічного покриття за рахунок зниження відкритої пористості кераміки внаслідок оплавлення її поверхневого шару. Ідентифікація шару окалини здійснювалась шляхом знімання кривої розподілу елементів.

Випробування лопаток ІТД, які пройшли імпульсно-плазмову обробку, на термоциклування в режимі — нагрівання до 1423 К — охолодження у воді показали підвищення термостійкості покриттів $ZrO_2 + Y_2O_3$ в 1,5+ 1,7 рази.

У цій главі представлено технологічні рекомендації щодо імпульсно-плазмової поверхневої обробки лопаток турбіни

авіаційного газотурбінного двигуна з поперельно нанесеним теплозахисним покриттям, яке знижує тепловий потік у масив матеріалу лопатки і дає можливість збільшити робочу температуру газів. Процес обробки ТЗП лопатки включає в себе підготовку оброблюваної поверхні, власне обробку і контроль за якістю обробленої поверхні. Етап підготовки складається з візуального огляду і очистки поверхні від різних забруднень. Процес обробки здійснюється за заданою схемою, яка враховує складку геометрію поверхні лопатки, при зарядній напрузі $\sim 3 \cdot 10^3$ В і величині запасеної енергії $9 \cdot 10^3$ Дж. На поверхні лопатки не допускається поява сколів покриття, які можуть виникати в місцях прихованих дефектів в попередньо напиленому покритті.

З метою реалізації процесу імпульсно-плазмової обробки деталей машин, а саме, лопаток турбіни в ДІМ АН України розроблено дослідно-промислову установку.

Дослідно-промисловою перевірка лопаток, що пройшли процес імпульсно-плазмової обробки, здійснена в умовах НВО "Сатурн", показала, що внаслідок обробки в 1,5+1,7 раза підвищується термостійкість покриттів. При цьому в 1,4+1,7 раза збільшується розрахункове значення ресурсу праці виробів. Крім того, на ~ 26 млн. крб. (у цінах на 01.09.92) знижується вартісна оцінка продукції за рахунок збільшення ресурсу праці лопаток ПТД і умовного зменшення обсягу їх випуску.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено теоретичну модель для інженерних розрахунків теплового стану матеріалу перешкоди під дією на нього імпульсного потоку плазми. На основі вказанного розрахунку визначено тепловий стан і товщину проплавленого шару перешкоди з Ti і ZrO_2 .

2. Металографічні і рентгеноструктурні дослідження обробленого поверхневого шару показали, що при обробці титанового сплаву ВТЗ-І утворюється "білий" шар, який має дрібнокристалічну і аморфізовану структуру з мікротвердістю, що перевищує вихідну в 1,5+1,7 раза. Визначено залежності мікротвердості молифікованого шару від величини запасеної енергії і періоду розрядного струму. Встановлено, що з ростом запасеної енергії від $1 \cdot 10^3$ Дж до $9 \cdot 10^3$ Дж мікротвердість збільшується, після чого її значення стабілізується. Збільшення періоду розрядного струму приводить

до зниження мікротвердості.

3. Виявлено вплив параметрів імпульсно-плазмової обробки на зміну шорсткості поверхні титанового сплаву ВТЗ-І і покриттів з $ZrO_2 + Y_2O_3$ і Al_2O_3 . Установлено, що при обробці ВТЗ-І R_a збільшується в 1,8 раза, а R_p і R_{max} зменшуються, відповідно, в 1,3 і 1,8 раза. Обробка керамічних покриттів приводить до зменшення всіх параметрів шорсткості більш, ніж у 2 рази.

4. Визначено залежність корозійної стійкості сплаву ВТЗ-І від енергетичних параметрів імпульсно-плазмової обробки. Встановлено, що обробка збільшує ступінь захисту матеріалу до 97%.

5. Установлено, що при обробці імпульсним потоком плазми електронно-променевих і газотермічних плазмових покриттів з $ZrO_2 + Y_2O_3$ і Al_2O_3 при збереженні базового складу матеріалу ТЗП відбувається фрагментація поверхневого шару покриттів.

6. Здійснено аналіз процесу фрагментації покриття з $ZrO_2 + Y_2O_3$ при імпульсно-плазмовій обробці. Визначено залежності величини утворених фрагментів і глибини тріщин, периметра і площі "нової" поверхні від енергетичних і технологічних параметрів процесу. Встановлено, що в діапазоні величин запасеної енергії $1 \cdot 10^3 \text{ Дж} < W < 9 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ спостерігається найбільш ефективний результат обробки ТЗП з $ZrO_2 + Y_2O_3$, що приводить до збільшення експлуатаційних характеристик покриття.

7. Встановлено, що імпульсно-плазмова обробка газотермічних покриттів з $ZrO_2 + Y_2O_3$ і Al_2O_3 приводить до формування в обробленому шарі "стовпчастої" структури з переважним вмістом у покритті з Al_2O_3 високотемпературної α -фази (корунд).

8. Експериментально вивчено динаміку окислення покриття $Ni-Cr-Al-Y$ на межі контакту з покриттям з $ZrO_2 + Y_2O_3$, що призводить до руйнування ТЗП. Встановлено, що процес окислення в оброблених виробках уповільнюється в 1,5-1,7 раза за рахунок зменшення відкритої пористості керамічного покриття.

9. Виявлено, що використання процесу імпульсно-плазмової обробки поверхні теплозахисних покриттів ГТД збільшує їх термостійкість у 1,5-1,7 раза.

10. Розроблено технологічні основи процесу зміцнення, обробки і модифікації поверхні деталей авіаційної техніки за допомогою імпульсних потоків плазми. Розрахунок техніко-економічних показників процесу обробки лопаток авіаційних ГТД показав, що розрахункова економічна ефективність використання процесу становить 26760 тис.крб. у цінах на I вересня 1992 р.

Основні результати праці висвітлені в таких публікаціях:

1. Ищенко Е.С., Куров М.В., Масловский Н.М. Прочностные испытания газотермических покрытий. // Сверхтвердые и композиционные материалы и покрытия, их применение: Сб. науч.тр. /АН УССР. Ин-т сверхтвердых материалов. - Киев, 1991. - С.54-57.
2. Ищенко Е.С., Гасин Д.А. Поверхностная обработка титанового сплава ВТЗ-1 импульсным потоком плазмы // Новые разработки в области сверхтвердых материалов и покрытий: Сб. науч.тр. /АН Украины, НТК "ИСМ им.В.Н.Бакуля". - Киев, 1992. - С.18-20.
3. Ищенко Е.С. Обработка термобарьерных покрытий импульсными плазменными потоками //Тезисы докладов ХУП Международной конференции молодых ученых "Получение, свойства и применение сверхтвердых материалов". Киев, 23-24 апреля 1992 г.
4. Изменение структуры армко-железа при импульсной азотно-плазменной обработке /М.Н.Волошин, Д.А.Гасин,Кораблева И.Р. и др. // Физика и химия обработки материалов. - 1993. - № 1. - С.67-70.
5. Gasin D.A., Korableva I.R., Ishchenko E.S. Impuls Plasma Flow Deposition of Protective Coatings // Proceedings of the International Conference "Surface Engineering", March 9-11, 1993, Bremen, Germany.
6. Surface Heat Treatment with Impuls Plasma Flows/D.A.Gasin, M.N.Voloshin, E.S.Ishchenko, I.R.Korableva // Proceedings of the International Conference "Surface Engineering", March 9-11, 1993, Bremen, Germany.

E. Ishchenko

Підп. у друк 05.05.93 Формат 60x90/16. Пап. друк. М і
Чм. др. л. 1,0. Чм. кр.-відт. 1,0. Чм.-вид. л. 0,9 Тираж 100
Замовл. ~~181~~ 181

Інститут надтвердих матеріалів АН України
252153 Київ-153, вул. Автозаводська, 2
Ротапринт ІНМ АН України,

БЕСПЛАТНО

АВ 27.449