

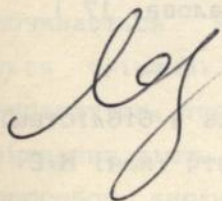
На правах рукопису

Левченко Ігор Геннадійович

РОЗРОБКА НАУКОВО-ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ПРОГНОЗУВАННЯ  
ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОВО - ІОННИХ ПОКРИТЬ  
І СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ НАНЕСЕННЯ НА ДЕТАЛІ  
АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

05.07.04

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



629.4

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00743847 (X)

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі фізико-технічних основ обробки конструкційних матеріалів Харківського авіаційного інституту імені М.Є. Жуковського.

Науковий керівник - академік АІНУ та АНТКУ

Костюк Геннадій Ігорович

Офіційні опоненти - д-р. техн. наук, проф. Мовшовіч А.Я.

( ХДНДІПМ )

канд. техн. наук Аксьонов І.І. ( ХФТІ )

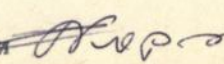
Провідна організація - Харківське Державне авіаційне виробниче підприємство.

Захист відбудеться 20.12 1996 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.27.06. у Харківському авіаційному інституті імені М.Є. Жуковського за адресою: ( 310070, м. Харків, вул. Чкалова, 17 )

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського авіаційного інституту імені М.Є. Жуковського.

Автореферат розіслано " 18 " листопада 1996 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради  Т.А. Корнілов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найхарактернішою рисою розвитку сучасної авіаційної техніки є інтенсифікація режимів роботи, в основному за рахунок збільшення робочих температур, тисків, швидкостей, навантажень, швидкостей газових потоків і т.д.

Необхідно зауважити, що традиційні технології не завжди забезпечують зростаючий рівень вимог до деталей авіаційної техніки. Можливим рішенням проблеми є застосування зміцнюючих покриттів. Зміцнюючі покриття широко використовуються при виробництві деталей, які входять до складу паливної апаратури авіаційних двигунів, редукторів, виконавчих механізмів. Особливо слід відмітити перспективність застосування зміцнюючих покриттів на поверхні лопаток газотурбінних двигунів, а також у високонавантажених парах тертя. Ефективним є використання зміцнюючих покриттів для збільшення працездатності ріжучого інструменту на основі карбіду титану, нітриду бору, а також інструменту з економно легованих і безвольфрамових сталей, який широко застосовується в авіаційній промисловості. Особливу актуальність проблема зміцнення ріжучого інструменту набуває в зв'язку з гострою недостаткою легіруючих елементів, в першу чергу вольфраму та кобальту.

Разом з тим необхідно зауважити, що навіть у випадку використання надміцних матеріалів процес руйнування деталі часто починається на її поверхні. Там найчастіше зароджуються тріщини, відбувається абразивний знос употоці; високі температури, тиск, потоки високоенергетичних частиць і випромінювання діють на поверхні. В таких умовах часто єдиним способом вирішення практичних задач являється використання покриттів. Нанесення зміцнюючих покриттів на деталі, що знаходяться під впливом

ЛНБ ім. В. С. Сурядовища

АН УРСР

значно поліпшити характеристики розроблюваної авіаційної техніки і збільшити її ресурс. Крім того, покриття дають змогу вирішити спеціальні задачі, які часто виникають в авіаційній технології, наприклад, забезпечити потрібний коефіцієнт тертя, організувати необхідний режим охолодження за рахунок пористості покриття і т.д. Але, оскільки руйнування, як і раніше, відбуваються в основному на поверхні, існуючі методи зміцнення не спроможні вирішити проблему. Використовувані технології характеризуються тим, що спрямовані, як правило, на покращання лише одної-двох властивостей поверхні. Інші властивості, часто не менш важливі, підлягають не контрольованому впливу. Таким чином, класичні технології нанесення зміцнюючих покриттів вимагають значного покращання. Крім того, необхідно зауважити, що авіаційне машинобудування не єдина галузь, зацікавлена в розробці технологій нанесення тонких плівок із заданими характеристиками і структурою. Тонкоплівкові технології є базовими для виробництва мікроелектронних пристроїв; у цій галузі техніки задачі прогнозування структурних характеристик плівок є не менш важливими, ніж у машинобудуванні.

У зв'язку з цим є актуальним дослідження та запровадження таких методів одержання покриттів на деталях машин і ріжучому інструменті, котрі забезпечили би весь діапазон потрібних характеристик поверхні. Необхідне комплексне дослідження процесів, що відбуваються на поверхні при конденсації покриття з іонно-плазмового потоку в присутності електромагнітних полів з метою вивчення основних закономірностей зросту покриття та формування його структури, що дозволить створювати плівки із спеціальними властивостями, такими як задана пористість, склад, шорсткість поверхні, адгезія, електропровідність і т.д., які б забезпечили значне покращання експлуатаційних характеристик

сучасної техніки, а також збільшення продуктивності праці і мінімальні витрати коштовних матеріалів.

Представлені в дисертаційній роботі дослідження виконувались за планом найважливіших НДР. В СРСР-це програми комітету по освіті за СРСР N 625" Плазмово-іонні технології " та N 4.6 " Нові прогресивні технології та робототехнічні комплекси в машинобудуванні ", в Україні - Національна програма " Інструмент" Мінмашпрома України і програма підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин агропромислового комплексу.

Мета роботи. Метою даної є розробка науково-фізичних основ створення технологічних процесів нанесення плазмово-іонних покриттів на деталі авіаційної техніки на основі вирішення таких задач:

1. Розробка математичної моделі конденсації покриття з іонно-плазмового потоку на поверхні авіаційних конструкційних матеріалів за наявності інтенсивних електромагнітних полів, потоків частиць і високих температур.

2. Вивчення закономірності конденсації речовини плівки на поверхні з урахуванням залежності фізичних характеристик від температури підкладки під час конденсації, концентрації адсорбованих частинок, наявності електромагнітних полів і т.д.

3. Розробка математичної моделі зростання і формування структури покриття, яка б дозволяла надійно прогнозувати якісні характеристики утвореного покриття, такі як шорсткість поверхні, сила адгезійного зчеплення покриття з поверхнею підкладки, пористість, мікротвердість та ін.

4. Дослідження із застосуванням обчисливого експерименту залежності якісних характеристик покриття від різних параметрів технологічного процесу і властивостей речовин підкладки і покриття, що наноситься.

5. Розробки пакета прикладних програм розрахунку умов нанесення покриття із заданими властивостями на авіаційні конструкційні матеріали.

6. Розробка і впровадження на виробництві нового висококоefficientного технологічного процесу нанесення зміцнюючих покриттів на деталі авіаційної техніки.

Наукова новизна. 1. На базі проведених досліджень теоретично вивчена залежність основних якісних характеристик іонно-плазмових покриттів від параметрів технологічного процесу і властивостей підкладки і речовини, що наноситься. 2. Розроблено комплексну модель прогнозування якісних характеристик покриття, яка відрізняється тим, що дозволяє описати всі основні властивості іонно-плазмових покриттів без залучення експериментального матеріалу шляхом розгляду елементарних фізичних процесів на поверхні конденсації. 3) Встановлено, що для одержання заданої структури з необхідними властивостями слід враховувати всі явища, які відбуваються при нанесенні плівки; керування одним параметром технологічного процесу не дозволяє досягнути поставленої мети. 4. Показано, що найважливі характеристики покриття, такі, як сила адгезійного зчеплення покриття з підкладкою, мікротвердість, пористість і т.д., як правило, екстремально залежать від параметрів техпроцесу. 5. Виявлено, що наявність та інтенсивність електромагнітних полів сильно впливає на структуру і властивості покриття, що формується, і може бути досить зручним засобом керування структурою плівки. 6. Встановлено, що докладний аналіз впливу елементарних фізичних процесів на поверхні на формування структури покриття дає можливість керування структурою плівки за рахунок безпосереднього впливу на дифузійні процеси з допомогою електромагнітних полів, електричного заряду, програмованої зміни

інтенсивності і ступеня іонізації потоку частинок та деяких інших факторів. 7. Запропоновано, замість тих що використовуються сьогодні багаточарових покриттів, створювати на поверхні високонавантажених деталей, а також таких, що підлягають особливим видам впливу, спеціальні поверхневі структури ( СПС ), які відрізняються від багаточарових покриттів більш складною просторовою структурою, більшою кількістю компонентів і забезпечують більш високу працездатність деталей.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач в роботі використовується комплексний метод дослідження. Теоретичні дослідження теплових процесів на поверхні при конденсації плівки виконувались на базі основних положень теорії теплопередачі. Задача зростання острівкової плівки і формування структури вирішувалась з допомогою нелінійних рівнянь дифузії на поверхні. При побудові моделі початкового етапу конденсації використовувались основні положення теорії вірогідності. При дослідженні розробленої математичної моделі широко застосовувались методи обчислювального експерименту

Експериментальні дослідження виконано з використанням оригінальних пристроїв і стандартної контрольно-вимірвальної апаратури. Характеристики одержаних зразків вивчались методами мікро-і макроструктурного аналізу, вимірванням товщини, мікротвердості, шорсткості поверхні, сили адгезійного зчеплення плівки з поверхнею підкладки.

Практична значимість роботи. Реалізація в промисловості.

Практична цінність роботи полягає:

- в розробці та впровадженні на виробництві нової прогресивної технології нанесення зносостійких покриттів, яка дозволяє помішпити якість деталей авіаційної техніки, збільшити продуктивність, знизити витрати дефіцитних матеріалів;

- в розробці пакета прикладних програм прогнозування якісних характеристик іонно-плазмових покриттів на авіаційних конструкційних матеріалах, які дозволяють, виходячи із параметрів техпроцесу, визначити основні властивості покриття.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджені:

- на державному підприємстві " Харківський машинобудівний завод ФЕД " - як технологія нанесення зміцнюючих покриттів на деталі авіаційної техніки, що працюють у вузлах тертя при високих питомих навантаженнях;

- у навчальному процесі на кафедрі фізико-технічних основ обробки конструкційних матеріалів Харківського авіаційного інституту ім. М.Є. Жуковського.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 1-й, 2-й, 3-й, 4-й та 5-й Міжнародних конференціях " Нові технології в машинобудуванні " ( Харків - Рибаче, вересень 1992, 1993, 1994, 1995, 1996 рр.), на Міжнародному симпозіумі по розряду і електроізоляції у вакуумі ( США, Каліфорнія, липень 1996р.), на науково-технічних конференціях професорсько - викладацького складу, співробітників та аспірантів ХАІ.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в статтях і тезисах доповідей на міжнародних конференціях.

На захист виносяться: 1. Принципово новий підхід до вирішення проблеми прогнозування якісних характеристик іонно-плазмових покриттів. 2. Теоретична модель процесу конденсації покриття. 3. Розроблені технологічні процеси нанесення покриття які, забезпечують досягнення заданих параметрів. 4. Розроблена на базі комплексної математичної моделі конденсації методика оперативного неруйнівного контролю якості покриттів, вимірвальний комплекс і результати експериментальних досліджень.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, показано новизну, практичну значимість, відображено методи дослідження.

У першому розділі проаналізовано стан проблем нанесення зміцнюючих покриттів і прогнозування якісних характеристик. Подано літературний огляд сучасних методів нанесення зміцнюючих покриттів та прогнозування якості. Показано, що найбільш перспективними методами нанесення покриттів слід вважати метод КІВ (конденсація з іонним бомбардуванням) і метод іонного розпилення, які мають суттєві переваги, серед яких перш за все слід відзначити легкість керування процесами в камері і порівняно високу енергію частинок, що осаджуються.

Аналіз розглянутих методів опису якісних характеристик тонкоплівкових покриттів дозволяє зробити висновок, що на сьогодні відсутні надійні, придатні для використання на практиці методи та моделі прогнозування якісних характеристик зміцнюючих покриттів. Разом з тим, внаслідок широкого поширення методів поверхневого зміцнення деталей, відчувається гостра потреба в наявності такого типу методик. Крім того, оскільки існуючі технологічні процеси не забезпечують належний ступень зміцнення, на основі аналізу закономірностей конденсації покриттів є необхідною розробка нових вискоелективних технологій нанесення зміцнюючих покриттів на високонавантажені деталі. Все вищесказане зумовлює проведення комплексного дослідження процесів, які є складовими частинами розроблюваної технології. У другому розділі запропоновано, з метою задоволення до сить протирічних вимог до покриттів, метод створення спеціальних поверхневих структур (СПС), який полягає в поширенні ідеї багаточарових покриттів на випадок трьох вимірювань. Розроблено математичну

модель прогнозування якісних характеристик іонно-плазмових покриттів, яка дозволяє пов'язати основні макрохарактеристики плівки, (такі, як сила адгезійного зчеплення покриття з поверхнею підкладки, мікротвердість покриття, рівень мікронапружень, стійкість до окислення) зі структурою плівки. В результаті були одержані певні аналітичні закономірності. Сила адгезійного зчеплення знаходиться так:

$$\bar{F}_a = \frac{\epsilon_i}{a^2 \lambda} \cdot \frac{\pi \sin^2 \alpha}{(\alpha - \Delta/r_0)^2}$$

де  $\epsilon_i$  - енергія зв'язку;  $\epsilon_a$  - енергія випаровування;  $\Delta$  - ширина перехідної зони острівків;  $r_0$  - радіус острівків.

Показано, що внаслідок неоптимальності функції розподілу острівків нового середовища за розмірами адгезія може досягати 10 - 20 % від максимально можливої величини. Для поліпшення адгезійних характеристик розмір острівків повинен задовольняти умови:

$$r_0 < \frac{\Delta}{2}$$

Однорідна функція розподілу не оптимальна. Пористість покриття визначається співвідношенням:

$$V_p = \pi \frac{\frac{4}{3} - \frac{3}{2} \Delta'^2 (1 - \frac{\Delta'}{6})}{(\alpha - \Delta')^3}$$

Однорідна функція розподілу також не оптимальна.

Мікронапруження:

$$\sigma = E [(\alpha_n - \alpha_{nn}) (T - T_k) + 2 K_k \frac{\Delta}{r_0} + K_s] + \frac{2 n_0 U}{\pi r_0}$$

Стійкість до окислення:

$$V_o = \pi 4 \beta \frac{K}{r_0 K_p \rho_m} \cdot \frac{(1 - \Delta')}{(\alpha - \Delta')^3}$$

Мікротвердість:

$$H = H_0 \sqrt{\Delta' - \Delta'^2/4} / (1 - \Delta'/2) (1 - \Delta n_c/n_c) \alpha v$$

У третьому розділі представлено комплексну математичну модель формування структури тонкої плівки при конденсації з іонного пучка та зроблено її аналіз.

Комплексна математична модель складається

початкового етапу конденсації, яка дозволяє описати процес зростання покриття, яке складається з острівків надмалих розмірів, базується на дискретному задаванні фізичних характеристик та використовує теоретико-вірогіднісні методи розрахунку і моделі розрахунку структури покриття на наступних етапах зросту. Процес утворення та росту острівків на початковому етапі конденсації описується такою системою рівнянь:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \bar{p} - \eta V_a - \sum_2^{\infty} V_a \beta_i \eta (\alpha \eta_i + \beta_i \eta_{i,0}) + \\ + \sum_3^{\infty} \eta_i (\nu_i \eta_i) + \sum_3^{\infty} \eta_i (\nu_{i,0} \eta_{i,0}) + 4(V_a \eta_2 + V_{a2} \eta_{2g});$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = d_{i-1} \beta_{i-1} \eta \eta_{i-1} V_a - \eta_i \nu_i \eta_i + \eta_{i+1} \nu_{i+1} \eta_{i+1} - d_i \beta_i \nu_i;$$

$$V_a = V_0 \exp\left(-\frac{\epsilon_a}{kT}\right);$$

$$V_d = V_0 \exp\left(-\frac{\epsilon_d}{kT}\right);$$

де:  $V_0$  - частота коливань атомів кристалічної решітки;  
 $\epsilon_d$  - енергія активації поверхневої дифузії;  
 $\epsilon_a$  - енергія випаровування адатома з поверхні;  
 $\epsilon_i$  - енергія активації відокремлення атома від острівка на дефекті.

Модель зросту покриття базується на рівнянні нерозривності для функції розподілу розмірів острівків:

$$\partial f(r, t) / \partial t + \frac{\partial r}{\partial t} \partial f / \partial r = \psi_3(r, t) + \psi_{cm}(r, t);$$

де:  $\psi_3$  - частота утворення острівців;  $\psi_{cm}$  - інтеграл зіткнень; функція розподілу розмірів острівків. Таким чином, модель зросту враховує як зіткнення острівків під час зросту

(величина  $\varphi_c$ ), так і процес зародження острівців надмалих розмірів ( $\varphi_3$ ). Величина визначається системою рівнянь початкового етапу конденсації. Модель зросту враховує всі найважливіші процеси на поверхні підкладки:

1. Залежність інтенсивності дифузійних процесів від температури.
2. Залежність інтенсивності дифузійних процесів від концентрації адсорбованих на підкладці частинок.
3. Залежність інтенсивності дифузійних процесів від наявності та інтенсивності електромагнітних полів і електричних зарядів;
4. Залежність швидкості випаровування адсорбованих на поверхні частинок від температури підкладки і ступеня покриття поверхні.
5. Випаровування частинок з меж острівків в двовимірну пару.
6. Випаровування частинок з поверхні острівків у навколишнє середовище;
7. Осадження частинок на підкладку з навколишнього середовища.
8. Рух острівків по підкладці та їх зіткнення.
9. Зіткнення дифундуючих по поверхні частинок з острівками;
10. Зіткнення частинок із зовнішнього потоку з поверхнею острівків.

Основне рівняння зросту острівців має вигляд:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} \cdot \frac{1}{\gamma_n + \gamma} dr = dt; \quad \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4;$$

де  $\varphi$  - об'єм острівка;  $J$  - сумарний потік частинок до острівка;  $J_1$  - потік частинок із зовнішнього середовища до острівка;  $J_2$  - потік адсорбованих частинок до межі острівка;  $J_3$  - потік випаровування з меж в двовимірну пару;  $J_4$  - потік частинок які випаровуються з поверхні в зовнішнє середовище;  $J_n$  - сумарний потік на поверхні острівка.

Рівняння концентрації атомів на поверхні за наявності електричного заряду на поверхні острівка таке

$$\partial z / \partial t = A_1(r) \frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + A_2(r) \frac{\partial z}{\partial r} + A_3(r) z + \bar{P};$$

Електричне поле розраховувалося виходячи з конкретної форми зросту острівка. Граничні умови:

$$\bar{h}(r, t) \Big|_{r=\infty} = \int_0^t P(t) dt;$$

де  $A_i$ -складні функції  $f$ . Проведений теоретичний аналіз комплексної системи рівнянь показав, що загальну систему можна розв'язати аналітично лише при можливості не враховувати швидкість руху межі острівка при його зрості, вплив електричних зарядів на кінетику конденсації та вплив початкового розподілу на кінцевий вигляд функції розподілу і т.д. Довільне звведення такого роду спрощень неможливе.

У зв'язку з цим знайдено області, де можливе застосування таких спрощених припущень. Як критерій незначності впливу швидкості руху межі острівка на кінетику дифузійних процесів прийнято критерій  $\theta = r/v_c$ , де  $v_c$  - швидкість віддалення області з концентрацією  $c$  від межі острівця. Показано, що

для острівка у формі диска  $\theta = \frac{ra}{D\pi}$ , де  $\theta = \frac{ra}{D\pi}$  - корінь рівняння

$$C_0 - C_1 / C - C_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\theta} e^{-d^2} dd;$$

Ширина зони впливу електричного заряду має вигляд;  $\Delta = r_2^{2/3} r_0^{1/3} - r_0$ ;

- у випадку іонного потоку,  $\Delta = r_2^{1/3} r_0^{2/3} - r_0$  - у випадку, коли заряд наноситься потоком електронів. Проведено дослідження системи рівнянь функції розподілу в області сильного впливу електричного заряду. Показано, що тут:

$$\bar{h}(\bar{r}, \bar{t}) = \frac{e^{\bar{r}}}{\bar{r}} \left[ \frac{\ln(t - e^{\bar{r}})}{t + e^{\bar{r}}} + \frac{P}{2Dca} \ln^2(\bar{t} - \bar{r}) \right];$$

де  $\bar{h}$  - безрозмірне поле концентрації адатомів в околиці острівка. Рівняння дозволяє пояснити знайдений експериментально факт утворення зон захоплення, які бідні на адатоми. Утворення зон захоплення чинить великий вплив на формування функції розподілу острівців і може служити засобом керування структурою покриття. Проведено аналіз системи в областях, які припускають спрощення.

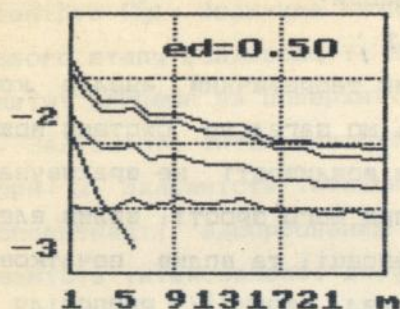


Рис. 1.

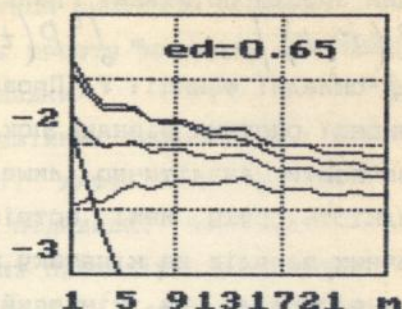


Рис. 2.

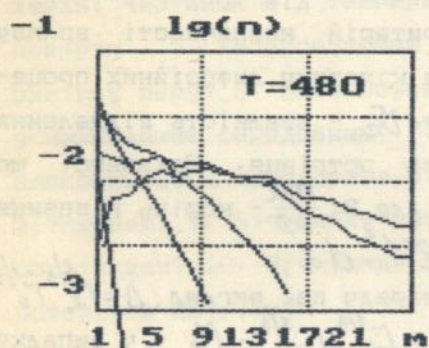


Рис. 3.

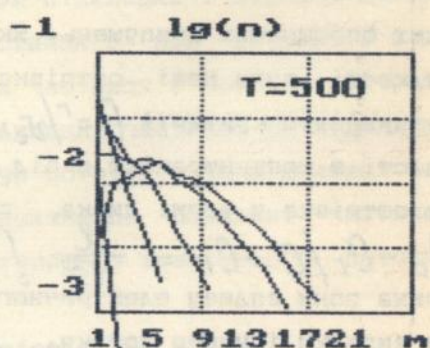


Рис. 4.

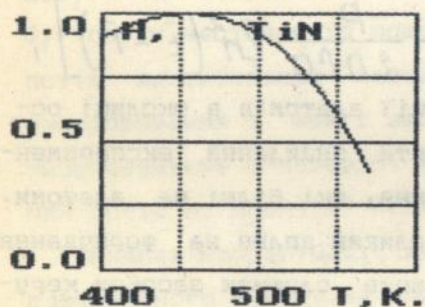


Рис. 5.

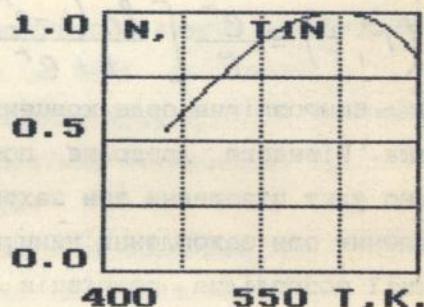


Рис. 6.

У четвертому розділі дано алгоритми реалізації обчислювальних експериментів і наведені результати машинних розрахунків по комплексної математичної моделі. Досліджено залежності вигляду функції розподілення від різних параметрів. На рис. 1 - 4 подано залежності функції розподілення і концентрації від різних параметрів, на рис. 5 - залежність мікротвердості від температури, на рис. 6 - залежність стійкості до окислення від температури, на рис. 7 - залежність адгезії від температури, на рис. 8 - залежність пористості від температури.

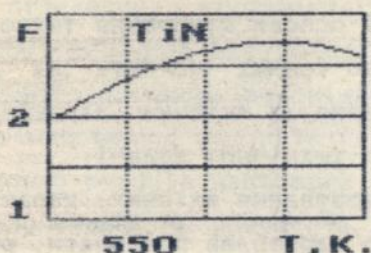


Рис. 7.

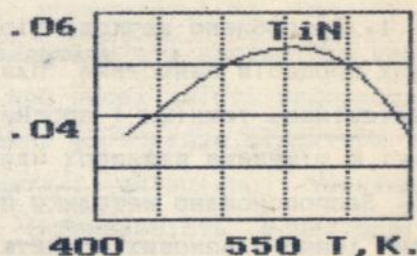


Рис. 8.

Обчислювальні експерименти дозволяють зробити певні висновки. Вигляд функції розподілу сильно залежить від енергії активації поверхневої дифузії, енергії випаровування, енергії зв'язку між атомами, температури підкладки, інтенсивності зовнішнього потоку, залежності інтенсивності зовнішнього потоку від часу та низки інших факторів. Відповідно від цих факторів залежать і якісні характеристики покриття, що впливає, з показаної в другому розділі моделі прогнозування якісних характеристик. На базі моделі росту було розроблено пакет прикладних програм, який дозволяє вивчати вплив різних факторів на структуру покриття і підбирати відповідні режими нанесення виходячи із заданих характеристик покриття.

У п'ятому розділі опрацьовану розроблену методику неруйнів-ного контролю якості покриття, що базується на комплексній моделі формування структури, а також розроблену оригінальну вимірвальну апаратуру. Наведено результати експеримен-тальних досліджень, які показують, що модель прогнозування якісних характеристик досить точно описує закономірності формування покриття. Розроблено технологічний процес нане-сення зміцнюючих багаточарових покриттів на деталі авіаційної техніки. Показано принципові електричні схеми та результати вимірювань.

### ВИСНОВКИ

1. Розроблено науково-фізичні основи створення технологіч-них процесів нанесення плазмово-іонних покриттів на деталі авіаційної техніки і прогнозування їх якісних характеристик, які є рішенням важливої науково-технічної задачі.

2. Запропоновано методику прогнозування якісних характе-ристик іонно-плазмових покриттів, що дозволяє пов'язати основні макрохарактеристики плівки (такі, як сила адгезійного зчеп-лення покриття з поверхнею підкладки, мікротвердість покрит-тя, пористість, шорсткість поверхні покриття, рівень мікро-напружень, стійкість до окислення зі структурою плівки) і базується на комплексній математичній моделі формування пок-риття.

3. Розроблено фізичну модель формування структури іонно-плазмового покриття, яка дає змогу вивчити зако-номірності протікання процесу конденсації покриття із іон-но-плазмового потоку в присутності електромагнітних полів, поверхневих зарядів, нестационарних полів температур та інших чинників, враховуючи дискретну залежність фізичних ха-рактеристик острівків малих розмірів на початковому етапі конденсації від числа атомів, з яких вони складаються, а та-кож зіткнення острівків при зростанні плівки.

4. Теоретично досліджено процес конденсації покриття із іонно-плазмового потоку. Вивчено вплив параметрів технологічного процесу на структуру покриття, що формується. 5. Виявлено, що для формування заданої структури необхідно враховувати всю сукупність явищ, що відбуваються при нанесенні, бо керування одним параметром технологічного процесу не дозволяє досягти поставленої мети. 6. Теоретично досліджено залежність якісних характеристик покриття від умов конденсації. Показано, що найважливіші характеристики покриття, такі, як сила адгезійного зчеплення плівки з поверхнею підкладки, мікротвердість, пористість та ін. у більшості випадків екстремально залежать від параметрів технологічного процесу, що свідчить про необхідність використувати комплексну математичну модель формування структури та розрахунку режимів нанесення на деталі авіаційної техніки. 7. Встановлено, що наявність та інтенсивність електромагнітних полів сильно впливає на структуру і властивості покриття, головним чином за рахунок впливу полів на інтенсивність дифузійних процесів на поверхні конденсації та на характер взаємодії острівків на початковому етапі формування покриття. 8. Виявлено, що аналіз процесу формування структури покриття показує можливість керування структурою за рахунок безпосереднього впливу на дифузійні процеси з допомогою температури, електромагнітних полів, поверхневого електричного заряду підкладки, програмованої зміни інтенсивності та ступеня іонізації потоку. 9. Показано, що наявність комплексної математичної моделі формування структури покриття дає змогу докладно проаналізувати вплив будь-якого фізичного явища на структуру, а також дозволяє в принципі створювати покриття з унікальними структурами за рахунок вузькоспрямованих дифузійних процесів на поверхні при конденсації.

10. Розроблено пакет програм числового розрахунку системи рівнянь, які входять у комплексну модель і дають можливість вивчити основні закономірності формування структури покриття в найбільш загальному випадку. 11. Опрацьовано методику вибору оптимальних умов нанесення покриттів із заданими властивостями, яка спирається на комплексну модель формування структури. Критерієм оптимальності є найважливіші якісні характеристики покриття. 12. Розроблено пакет прикладних програм, які дають можливість розрахувати якісні характеристики покриття виходячи із заданих параметрів техпроцесу, а також підібрати потрібні параметри для забезпечення необхідних якісних характеристик покриття. 13. Запропоновано створювати на поверхні високонавантажених деталей, а також таких, що підлягають особливим видам впливу, спеціальні поверхневі структури, які відрізняються від багаточасових покриттів більш складною просторовою структурою, більшою кількістю компонентів та забезпечують більш високу працездатність деталей. Наведено приклад розрахунку режимів формування покриття з високою зносостійкістю для роботи у високонавантаженої парі тертя. 14. На основі комплексної математичної моделі прогнозування якісних характеристик опрацьовано методику оперативного неруйнівного контролю якості покриття. Для експериментальної перевірки методики розроблено спеціальний вимірвальний комплекс і проведено відповідні вимірювання. 15. Розроблено і впроваджено типовий технологічний процес нанесення зміцнюючого покриття на деталі авіаційної техніки, який дозволяє покращити якість деталей, збільшити продуктивність, зменшити витрати дефіцитних матеріалів. 16. Висока ефективність розробленої технології, впровадженої на державному підприємстві

"Харківський машинобудівний завод ФЕД" забезпечила поширення застосування деталей зі зміцнюючими покриттями, що підтвержує доцільність запровадження результатів роботи на інших заводах галузі, а також в інших галузях промисловості, де існує потреба в застосуванні деталей з поверхневим зміцненням.

Основний зміст дисертації опубліковано в таких працях:

1. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Определение профилей концентрации примесей при ионном легировании. //Материалы 1-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 18-20 сент. 1992 г. с. 37-39.

2. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Методика определения технологических режимов комбинированной технологии, включающей нанесение покрытия, лазерный отжиг и ионное легирование. //Материалы 1-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 18-20 сент. 1992 г. с. 45-47.

3. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Технологические процессы нанесения плазменно - ионных покрытий с минимальными затратами энергии. //Материалы 1-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 18-20 сент. 1992 г. с. 53-55.

4. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Образование и рост зоны захвата вокруг островка при конденсации пленки из ионного пучка. //Материалы 2-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении". Харьков - Рыбачье, 18-22 сент. 1993 г. с.331-334.

5. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Математическая модель начального этапа конденсации пленки при ионно - плазменной обработке. //Материалы 3-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 20 - 23 сент. 1994 г. с.99-100.

6. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Эволюция зоны влияния элек-

трического заряда при осаждении пленки из ионного пучка.  
//Материалы 3-й междунар. конф." Новые технологии в машино-  
строении ", Харьков - Рыбачье, 20-23 сент. 1994 г. с. 116-117.

7. Костяк Г.И., Левченко И.Г. Численное моделирование функ-  
ции распределения островков новой фазы при конденсации плен-  
ки. //Материалы 4-й междунар. конф." Новые технологии в маши-  
ностроении ", Харьков - Рыбачье, 18-21 сент. 1995 г. с. 174-177.

8. Костяк Г.И., Левченко И.Г. Расчет функции распределе-  
ния островков новой фазы при нанесении пленки в ионно -  
плазменной установке. //Материалы 4-й междунар. конф." Новые  
технологии в машиностроении ", Харьков - Рыбачье, 18-21 сент.  
1995 г. с. 179.

9. Костяк Г.И., Левченко И.Г. Математическая модель кон-  
денсации пленки в ионно - плазменных установках. //Материалы  
4-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении ",  
Харьков - Рыбачье, 18-21 сент. 1995 г. с. 186 - 189.

10. Костяк Г.И., Левченко И. Г. Выбор упрощенной модели  
роста островка новой фазы при конденсации пленки. //Материалы  
4-й междунар. конф." Новые технологии в машиностроении ",  
Харьков - Рыбачье, 18-21 сент. 1995 г. с. 200 - 201.

11. Костяк Г.И., Левченко И.Г. Прогнозирование качествен-  
ных характеристик плазменно - ионных покрытий на базе микро-  
параметров формирования покрытий и функций распределения.  
//Труды Харьк. авиац. ин-та. Харьков, 1995. с. 47 - 53.

12. Kostiouk G.I., Levchenko I.G. A Model of Thin Film  
condensation. //Междунар. симпозиум по разряду и электро-  
изоляции в вакууме. США, Калифорния, июль 1996г.

13. Kostiouk G.I., Levchenko I.G. Calculation of The Thin  
Film Characteristics. //Материалы 5-й междунар. конф." Новые  
технологии в машиностроении ", Харьков - Рыбачье, 18-21 сент.  
1996 г. с. 228 - 231.

14. Kostiouk G.I., Levchenko I.G. Model of The Initial Stage of The Condensation And Non-Continious Film Growth. //Материалы 5 междунар.конф." Новые Технологии в Машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 18-21 сент. 1996 г. С. 261-261.

15. Костюк Г.И., Левченко И.Г. Методика и оборудование оперативного неразрушающего контроля качества покрытий. //Материалы 5 междунар.конф." Новые Технологии в Машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 18-21 сент. 1996 г. С. 38-39.

16. Костюк Г.И., Мялица А.К., Левченко И.Г., Некрасов А.А. Горлов А.К. Новые пути создания поверхностных слоев деталей с заданными свойствами. //Материалы 5 междунар.конф." Новые Технологии в Машиностроении ". Харьков - Рыбачье, 18-21 сент 1996 г. С. 236-242.

Levchenko I.G. Development of the physical basis of the plasma - ion coating characteristics prediction and technology of the protective coating application on the aircraft components.

The thesis for the Candidate degree of 05.07.04 speciality - the technology of the aircraft production. Kharkov Aviation Institute. Kharkov, 1996.

15 research works wich contain theoretical and experimental researches of the plasma-ion coating application are defended. The conformity of the regularity of film strycture forming depending on application conditions have been established theoretically. Mathematical model of the coating characteristics prediction allowing to connect the coating properties with structure and application conditions has been worked up. The science basis of the selection of the condensation conditions providing coatings with prescribed properties have been foundeed. Method and equipment for the

film quality checking have been created. The industrial introduction of the new techniques has been realized. The outlook for thin coating application has been defined.

Левченко И.Г. Разработка научно-физических основ прогнозирования качественных характеристик плазменно-ионных покрытий и создание технологии их нанесения на детали авиационной техники.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05. 07. 04. - технология производства летательных аппаратов, Харьковский авиационный институт, Харьков, 1996. Защищаются 15 научных работ, содержащих теоретические и экспериментальные исследования процесса нанесения упрочняющих плазменно-ионных покрытий. Теоретически установлены закономерности формирования структуры пленки в зависимости от условий нанесения. Разработана математическая модель прогнозирования качественных характеристик, позволяющая связать важнейшие свойства покрытия с его структурой и условиями нанесения. Разработаны научные основы выбора режимов конденсации, обеспечивающих получение покрытий с заданными прочностными характеристиками. Разработаны методика и оборудование для неразрушающего контроля качества покрытий. Внедрена в промышленность новая технология нанесения упрочняющих покрытий. Определены перспективы развития технологии нанесения износостойких покрытий.

#### Ключові слова

Зміцнюючі покриття, структура, адгезія, мікротвердість, температурне поле, функція розподілу, дифузія.

003.88.24

Підписано до друку 1.11.1996.

Формат 60x84 1/16. Папір офс. N2. Офс. друк.  
Умовн.-друк. арк. 1. Облік.-вчед. арк.1,32.  
Т. 100 прим. Замовлення 324. Безкоштовно.

---

Ротапрінт друкарні ХАІ  
310070, Харків - 70, вул. Чкалова, 17.

312626

Ав 36.290