

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ
ім. Я. С. ПІДСТРИГАЧА**

На правах рукопису
УДК 539.3:620.198

**ГАВРИСЬ
Олександр Петрович**

**Визначення термонапруженого стану покриттів
при високотемпературному напиленні**

**Спеціальність 01.02.04. – механіка деформівного
твердого тіла**

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук

ЛЬВІВ–1998

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача Національної академії наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
ШЕВЧУК Павло Романович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор, зав. відділом ІППММ
ім. Я.С.Підстригача НАН України
ГАЧКЕВИЧ Олександр Романович

доктор фізико-математичних наук,
професор, головний науковий
співробітник Інституту механіки
ім. С.П.Тимошенка НАН України
ВАСИЛЕНКО Анатолій Тихонович

Провідна установа: Державний університет "Львівська
політехніка", кафедра теоретичної механіки,
м.Львів

Захист відбудеться "28" грудня 1998 р. о 15 год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.195.01 в Інституті прикладних
проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України (м.Львів, вул.Наукова,
3"б").

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту прикладних
проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України.

Відзиви на автореферат просимо надсилати за адресою: 290601, МСП,
м.Львів, вул.Наукова, 3"б", ІППММ, вченому секретарю спеціалізованої вченої
ради Д 35.195.01.

Автореферат розіслано " 25 " листопада 1998 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,
кандидат фізико-математичних наук

ШЕВЧУК
Павло Романович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з важливих проблем механіки, техніки, інших суміжних наук є забезпечення необхідної довговічності і робочої здатності елементів конструкцій і машин, які працюють в реальних умовах експлуатації (агресивні середовища, підвищені рівні температур і механічних навантажень). Актуальним також є питання надання таких функціональних властивостей як корозійна стійкість, зносостійкість, жаростійкість, міцність та інші широко доступним конструкційним матеріалам.

Ефективним способом покращення експлуатаційних властивостей елементів конструкцій, збільшення їх робочого ресурсу є застосування багатофункціональних покриттів. Одним із поширених методів нанесення таких покриттів є високотемпературне (зокрема плазмове) напилення покриттів з інших матеріалів, що в більшості випадків є найбільш доцільним, а інколи - єдиною можливим способом нанесення покриттів.

Теоретичному та експериментальному дослідженні процесів, які мають місце при високотемпературному напиленні, присвячені роботи В.В.Кудінова, В.М.Іванова, Ю.С.Борисова, А.Хасуї, О.Морігакі, В.А.Барвінка, Є.М.Іванова, І.Л.Геллера, М.А.Купріянова, А.В.Плохова, Б.А.Ляшенка, В.І.Похмурського, Л.І.Тушинського, В.І.Копилова, В.Ф.Шатинського, Я.С.Підстригача, П.Р.Шевчука, Д.В.Іващука та інших вітчизняних і закордонних авторів.

Серед багатьох причин, які можуть суттєво впливати на зниження міцності покриттів, є формування в напилювальному шарі значних залишкових напружень. Експериментальне визначення залишкових напружень в системі тіло-покриття пов'язане із суттєвими труднощами через малу товщину покриття, складність вимірювань. Тому важливе місце в розв'язанні цієї проблеми, крім експериментальних, відводиться методам теоретичного дослідження, розрахунку і прогнозування рівня залишкових напружень в системах тіло-покриття та керування цим рівнем.

Однак, робіт з теоретичного дослідження напружень і деформацій, що формуються в системі тіло-покриття в залежності від режимів нанесення, опубліковано мало. Формування покриття високотемпературним напиленням відбувається при складних, різноманітних, взаємозв'язаних і недостатньо вивчених явищах, які зрозуміло, не можна врахувати в рамках будь-якої математичної моделі. Тому актуальною є необхідність подальшого узагальнення на основі вивчення експериментальних досліджень існуючих математичних моделей шляхом поглиблення досліджень термомеханічних режимів технологічного ланцюга виготовлення виробів з покриттями: підготовка основи (нагрівання, охолодження тощо) - безпосередньо нанесення покриття - наступна термообробка; детальний аналіз напружено-деформованого стану основи та покриття на кожному етапі напилення з врахуванням радіаційно-конвективного теплообміну з метою вибору раціонального співвідношення параметрів системи та температурних режимів напилення, забезпечення необхідного рівня залишкових напружень у системі та якості покриттів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України в рамках науково-дослідних тем: "Розробка аналітичних методів розрахунку та прогнозування довговічності покриттів в хімічно активних середовищах залежно від режимів їх нанесення та експлуатації" (№ державної реєстрації 01.88.0022727); "Побудова математичних моделей та дослідження нелінійних ефектів механодифузії і термомеханіки тіл з покриттями, процесів корозійного руйнування катодних і анодних покриттів" (№ державної реєстрації 0193U009585); теми ДКНТП України 04.05.00/002-95 "Розробити методики прискореного випробування та прогнозування довговічності лакофарбових та металічних покриттів в морській воді, в атмосферних агресивних середовищах".

Метою роботи є побудова узагальненої моделі процесів при високотемпературному нанесенні захисних покриттів (з врахуванням енергії випромінювання, теплових ефектів потоку плазмотвірного газу, радіаційно-конвективного теплообміну системи тіло - покриття з навколишнім середовищем, різних типів механічних умов закріплення основи) для вибору раціональних режимів нанесення, теоретичного прогнозування залишкового напруженого стану, для побудови критеріїв міцності та довговічності виробів з покриттями.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- побудовано узагальнену математичну модель опису термомеханічних процесів при високотемпературному напilenні захисних покриттів;
- отримано узагальнені нелінійні граничні умови теплообміну тіл з середовищем через покриття з врахуванням випромінювання;
- розроблено чисельно-аналітичну методику дослідження і розрахунку температурних полів та залишкового напруженого стану плоских і циліндричних тіл при напilenні одно- та двостороннього покриття;
- вироблено рекомендації з вибору термічних умов напilenня, співвідношень геометричних, теплофізичних та фізико-механічних параметрів системи тіло-покриття з метою керування залишковими напруженнями та іншими експлуатаційними властивостями покриттів, які суттєво залежать від рівня залишкових напружень.

Вірогідність основних положень і отриманих результатів забезпечується фізичною обґрунтованістю постановок нелінійних задач теплопровідності та термопружності з урахуванням теплообміну випромінюванням, строгістю математичних методів їх розв'язання, узгодженістю окремих часткових випадків з відомими в літературі теоретичними результатами, перевіркою побудованого комплексу прикладних програм на тестових задачах, отриманням фізично несутеречливих результатів.

Практична значимість. Результати досліджень мають як теоретичне, так і практичне значення. Вони можуть бути використані в машинобудуванні, приладобудуванні, хімічній промисловості та ін., де застосовуються високотемпературні покриття для підвищення експлуатаційних характеристик деталей, розробляють і вдосконалюють технології їх нанесення. Розроблена узагальнена математична модель містить низку параметрів системи і побудована на її базі чисельно-аналітична методика дозволяє в комплексі враховувати вплив визначальних теплових та механічних факторів на характерних технологічних етапах виготовлення виробу з покриття і на підставі результатів розрахунків оптимізувати температурні режими і залишковий напружений стан системи тіло-покриття, використовувати такі результати при теоретичному прогнозуванні їх робочого ресурсу.

Особистий внесок здобувача. Результати досліджень, наведені в дисертації, отримані автором самостійно. Науковий керівник брав участь у побудові узагальненої моделі, формулюванні задач та обговоренні одержаних результатів. В спільних публікаціях співавторам належить: роботи [1, 2] - вихідні модельні співвідношення; [3, 4] - ідея узагальнення вихідної математичної моделі на весь технологічний ланцюг виготовлення виробу з покриттям; роботи [5, 11] - спільні публікації, в яких кожен із співавторів представляв свій напрямок досліджень; в решті спільних публікацій співавтори брали участь в обговоренні отриманих результатів та можливостей їх практичного застосування.

Апробація роботи. Основні результати доповідались на нараді "Досвід застосування композитних матеріалів в сільськогосподарському машинобудуванні" (Чернігів, 1985 р.), третій міжгалузевій науково-практичній конференції "Захист суден від корозії та обростання" (Калінінград, 1986 р.), VII-й Краснодарській крайовій конференції "Сучасні проблеми природознавства. Прикладні питання тепломасообміну" (Краснодар, 1986 р.), III-й Всесоюзній конференції "Механіка неоднорідних структур" (Львів, 1991 р.), міжнародній конференції "Теорія наближень та задачі обчислювальної математики" (Дніпропетровськ, 1993 р.), міжнародній конференції-виставці "Корозія-94" (Львів, 1994 р.), другому міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків (Львів, 1995 р.), міжнародному технологічному форумі ESSENTIA-96 (Прага, 1996 р.), XXXI-й польській конференції з механіки деформівного твердого тіла Sol.Mec. (Меркі, Ольштин, 1996 р.), 5-й європейській конференції з нових процесів, матеріалів та їх застосування EUROMAT 97 (Маастріхт, Нідерланди, 1997 р.).

Повністю дисертаційна робота доповідалась і обговорювалась на семінарі відділу механіки деформівного твердого тіла цього ж Інституту (Львів, 1998 р.) та спеціалізованому кваліфікаційному семінарі "Механіка деформівного твердого тіла" Інституту прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України (Львів, 1998 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, трьох розділів основного матеріалу, висновків та списку використаних джерел із 80 найменувань. Загальний обсяг роботи 165 сторінок, в тому числі 49 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність даної проблеми, сформульована мета роботи, наведено основні результати, отримані в роботі, та основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі на основі опублікованих з досліджуваної проблеми робіт проаналізовано особливості та закономірності формування покриттів високотемпературним напиленням, сучасний стан проблеми. З врахуванням цього, в запропонованій узагальненій моделі весь технологічний процес нанесення покриття розділено за часом на три інтервали: попереднє нагрівання поверхні основи, нанесення покриття, наступна термообробка. За визначальні вибрано такі фактори: теплове випромінювання зрізу сопла плазмотрону з урахуванням часткового поглинання енергії робочим середовищем і поверхнею виробу; випромінювання (поглинання) об'ємом плазмотвірного газу; власне випромінювання поверхні виробу; випромінювання (поглинання) оточуючим середовищем; конвективне нагрівання поверхні системи підкладка-покриття потоком плазмотвірного газу; наступне радіаційно-конвективне охолодження основи з покриттям (після виключення плазмотрону).

У відомих з літератури^{*)} математичних моделях, присвячених теоретичному дослідженню фізико-механічної взаємодії між тілом, покриттям та середовищем, границя розділу чи поверхневі шари розглядаються як деякі фізичні поверхні, наділені властивостями покриття. Отримані граничні умови на температуру та механічні параметри дали змогу на базі такого модельного підходу формулювати (в лінійній постановці) та розв'язувати відповідні задачі математичної фізики.

Запропонована в першому розділі дисертації нелінійна математична модель дозволяє більш повно описати процеси при високотемпературному нанесенні покриттів, розширити дослідження термомеханічних режимів технологічного ланцюга виготовлення виробу з покриттям, розраховувати та аналізувати залишковий напружено-деформований стан основи та покриття на кожному з виділених етапів напилення з врахуванням радіаційно-конвективного теплообміну. Це дозволило вибирати раціональні співвідношення параметрів системи та температурних режимів напилення для забезпечення необхідного рівня залишкових напружень та якості покриттів.

При розбитті процесу напилення покриття в часі на три інтервали, початок відліку $\tau = 0$ починається від моменту дотикання незавантаженого частинками напилювального матеріалу потоком плазмотвірного газу до поверхні основи. Момент часу $\tau = \tau_1$ відповідає утворенню тонкого суцільного шару покриття на поверхні основи.

*) Подстригач Я.С., Шевчук П.Р. Температурные поля и напряжения в телах с тонкими покрытиями // Тепловые напряжения в элементах конструкций. - Киев. - 1967. - Вып.7. - С.227-233.

- 5 -

Завершенню процесу напилення відповідає момент часу $\tau = \tau_2$, після якого, за потребою, виріб піддається подальшій технологічній обробці.

При побудові математичної моделі теплового режиму напилення вважаємо, що матеріал покриття - ортотропний, теплофізичні та фізико-механічні властивості його відмінні від таких властивостей матеріалу основи. При цьому напилюване суцільне покриття товщиною $2\delta_1$ розглядається як тонка оболонка з наданими їй властивостями покриття, віднесена до змішаної системи координат α, β, γ . Координати α і β співпадають з лініями головних кривин серединної поверхні покриття-оболонки S , а координата γ - спрямована вздовж зовнішньої нормалі до неї.

При якісній попередній обробці поверхні основи можна вважати, що на границі контакту підкладки з покриттям має місце ідеальний тепловий контакт

$$T_1 = T_2, \quad \lambda_1^\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \gamma} = \lambda_2^\gamma \frac{\partial T_2}{\partial \gamma}; \quad (1)$$

де T_1, T_2 - абсолютні температури покриття та підкладки в зоні контакту; $\lambda_1^\gamma, \lambda_2^\gamma$ - коефіцієнти теплопровідності матеріалів покриття та основи в напрямку нормалі γ . На вільній поверхні покриття відбувається радіаційно-конвективний теплообмін з середовищем. Для кожного з трьох виділених інтервалів часу граничні умови матимуть наступний вигляд:

$$\lambda_2^\gamma \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} = \varepsilon_2 \varepsilon_B \sigma_0 T_B^4 P_B - \varepsilon_2 \sigma_0 (T_2^4 - \varepsilon_{ПГ} T_{ПГ}^4) + \chi_2 (T_{ПШ} - T_2) + q_1, \quad (2)$$

при $0 < \tau < \tau_1$;

$$\lambda_1^\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \gamma} = \varepsilon_1 \varepsilon_B \sigma_0 T_B^4 P_B - \varepsilon_1 \sigma_0 (T_1^4 - \varepsilon_{ПМ} T_{ПГ}^4) + \chi_1 (T_{ПШ} - T_1) + q_2; \quad (3)$$

при $\tau_1 < \tau < \tau_2$;

$$\lambda_1^\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \gamma} = -\varepsilon_1 \sigma_0 (T_1^4 - \varepsilon_{PC} T_{PC}^4) + \chi_1' (T_{PC} - T_1) + q_3; \quad (4)$$

при $\tau > \tau_2$.

Тут введено такі позначення:

$\varepsilon_2, \varepsilon_1$ - ступені чорноти поверхні підкладки та покриття;

ε_B, T_B - ступінь чорноти та абсолютна температура зрізу сопла плазмотрона;

σ_0 - постійна Стефана-Больцмана;

χ_2, χ_1, χ'_1 - коефіцієнти тепловіддачі з поверхні основи (в першому інтервалі часу), з поверхні покриття - в другому та третьому інтервалах часу відповідно;

- 6 -

$\varepsilon_{ПГ}, T_{ПГ}$ - ступінь чорноти та абсолютна температура струменя плазмотвірного газу;

$\varepsilon_{ПМ}$ - ступінь чорноти струменя плазмотвірного газу з частинками напилювального матеріалу;

$T_{ПШ}$ - абсолютна температура пограничного шару плазмотвірного газу на поверхні виробу;

q_1, q_2, q_3 - теплові потоки, що враховують теплоту кристалізації (плавлення), теплоту екзотермічних (ендотермічних) реакцій, хімічних перетворень;

$\varepsilon_{РС}, T_{РС}$ - ступінь чорноти і абсолютна температура робочого середовища в третьому інтервалі часу;

P_B - безрозмірний комплекс, який враховує взаємне розміщення плазмотрона і виробу, дистанцію наплення, поглинання середовищем променистої енергії.

Початковий розподіл температури T_2 в основі для моменту часу $\tau = 0$ вважаємо відомим.

При побудові узагальненої граничної умови теплообміну тіл через тонкі покриття для інтервалів часу наплення $\tau_1 - \tau_2$ і $\tau_2 - \infty$ виходимо з того, що розподіл температури в області покриття з рівномірно розподіленими в ньому джерелами тепла потужністю w описується розв'язком рівняння теплопровідності

$$\lambda_1^\gamma \frac{\partial^2 T_1}{\partial \gamma^2} + 2k_1 \lambda_1^\gamma \frac{\partial T_1}{\partial \gamma} + p_1^2 T_1 = -w \quad (5)$$

при задоволенні граничних умов (1) та (3).

Тут $k = (k_1^{(1)} + k_2^{(1)}) / 2$ - середня кривина серединної поверхні покриття S ;

$$p_1^2 = \nabla^2 - \omega \frac{\partial}{\partial \tau}; \quad \nabla^2 = \frac{1}{AB} \left[M \frac{\partial}{\partial \alpha} + N \frac{\partial}{\partial \alpha} + K \lambda_1^\beta \frac{\partial}{\partial \beta} + L \frac{\partial}{\partial \beta} \right];$$

A, B - коефіцієнти першої квадратичної форми поверхні S ;

$\lambda_1^\alpha, \lambda_1^\beta$ - коефіцієнти теплопровідності вздовж α та β ;

ω - теплоємність матеріалу покриття.

Операторним методом розв'язок рівняння теплопровідності отримано в наступному вигляді:

$$T_1 = Ce^{n\gamma} + De^{m\gamma} + \frac{1}{2\lambda_1^\gamma(n-m)} \int_{\gamma}^{\gamma_0} w [e^{n(\gamma-z)} - e^{m(\gamma-z)}] dz -$$

$$-\int_{-\delta_1}^{\gamma} [e^{n(\gamma-z)} - e^{m(\gamma-z)}] dz \Bigg|_{\tau_1}^{\tau_2}; \quad \tau_1 < \tau < \tau_2; \quad (6)$$

- 7 -

де $m = -k_1 - (k_1^2 - p_1^2 / \lambda_1^\gamma)^{0,5}$; $n = -k_1 + (k_1^2 - p_1^2 / \lambda_1^\gamma)^{0,5}$;

C, D - сталі інтегрування, які визначаються із співвідношення (1), мають вигляд:

$$C = \frac{1}{n-m} \left[\frac{\lambda_2^\gamma}{\lambda_1^\gamma} \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} - m T_2 \right] e^{n\delta_1} - I_1 e^{n\delta_1}; \quad (7)$$

$$D = \frac{1}{n-m} \left[\frac{\lambda_2^\gamma}{\lambda_1^\gamma} \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} - m T_2 \right] e^{m\delta_1} - I_2 e^{m\delta_1};$$

$$\text{де } I_1 = \frac{1}{2\lambda_1^\gamma(n-m)} \int_{-\delta_1}^{\delta_1} e^{-n(\gamma-z)} dz; \quad I_2 = \frac{1}{2\lambda_1^\gamma(n-m)} \int_{-\delta_1}^{\delta_1} e^{-m(\gamma-z)} dz.$$

Підставляючи в вираз (3) замість T_1 його значення згідно з (6) і (7), розкладаючи вирази з $e^{m\delta_1}$ та $e^{n\delta_1}$ за степенями малого δ_1 і залишуючи доданки з δ_1 включно, отримаємо узагальнену граничну умову, що описує теплообмін підкладки з середовищем через покриття в другому інтервалі часу. Аналогічним чином отримаємо узагальнену граничну умову і для третього інтервалу часу.

За допомогою одиничних функцій Хевісайда систему узагальнених нелінійних граничних умов для трьох виділених інтервалів часу представимо одним співвідношенням наступним чином:

$$G_1[\theta(\tau) - \theta(\tau - \tau_1)] + G_2[\theta(\tau - \tau_1) - \theta(\tau - \tau_2)] + G_3\theta(\tau - \tau_2) = 0, \quad (8)$$

$$\text{де } G_1 = \lambda_2^\gamma \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} - \varepsilon_2 \varepsilon_B \sigma_0 T_B^4 P_B + \varepsilon_2 \sigma_0 (T_2^4 - \varepsilon_{ПГ} T_{ПГ}^4) - \chi_2 (T_{ПШ} - T_2) + q_1;$$

$$G_2 = \tilde{p}_1^2 T_2 - \lambda_2^\gamma \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} + 2k + \frac{\chi_1}{h_1} T_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_B \sigma_0 T_B^4 P_B - \varepsilon_1 \sigma_0 (T_2^4 - \varepsilon_{ПМ} T_{ПГ}^4) + q_2 +$$

$$+ \chi_1 (T_{ПШ} - T_2) - 4\varepsilon_1 \sigma_0 \frac{\lambda_2^\gamma}{h_1} T_2^3 \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} + \frac{\chi_1}{2h_1} T_2^2 + \frac{1}{3} \frac{\chi_1}{h_1} T_2 - k \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} -$$

$$\begin{aligned}
& -2\varepsilon_1\sigma_0 \frac{T_2^3}{h_1} \frac{\Phi}{H} - \tilde{W} \Big|; \\
G_3 = & p_1^2 T_2 - \lambda_2^\gamma \frac{\Phi}{H} 2k + \frac{\chi_1'}{h_1} \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} - \varepsilon_1\sigma_0(T_2^4 - \varepsilon_{PC}T_{PC}^4) + q_3 + \chi_1'(T_{PC} - T_2) - \\
& -4\varepsilon_1\sigma_0 \frac{\lambda_2^\gamma}{h_1} T_2^3 \frac{\partial T_2}{\partial \gamma} + \frac{\Phi}{H} k + \frac{\chi_1'}{2h_1} \tilde{W} - \frac{1}{3} \frac{\Phi'}{2h_1} - k \tilde{W}^* - 2\varepsilon_1\sigma_0 \frac{T_2^3}{h_1} \frac{\Phi}{H} - \tilde{W} \Big|.
\end{aligned}$$

- 8 -

У виразі (7) введено наступні позначення:

$$\theta(\tau - \tau_i) = \begin{cases} 1, & \tau < \tau_i; \\ 0, & \tau > \tau_i; \end{cases} \quad i = 1, 2 \text{ - одинична функція Хевісайда;}$$

$$W = \int_{-\delta_1}^{\delta_1} w d\gamma; \quad W^* = \frac{3}{\delta_1} \int_{-\delta_1}^{\delta_1} w \gamma d\gamma \text{ - усереднені характеристики джерел тепла, що діють}$$

в покритті в інтервалі часу $\tau - \tau_2$;

$$\tilde{W} = \int_{-\delta_1}^{\delta_1} \tilde{w} d\gamma; \quad \tilde{W}^* = \frac{3}{\delta_1} \int_{-\delta_1}^{\delta_1} \tilde{w} \gamma d\gamma \text{ - усереднені характеристики джерел (стоків)}$$

потужності тепла $\tilde{W}$, що діють в покритті в інтервалі часу $\tau - \infty$;

$\tilde{p}_1^2 = 2\delta_1 p_1^2$; $k = 2\delta_1 k_1$ - приведений диференціальний оператор та приведена середня кривина серединної поверхні покриття S відповідно;

$h_1 = \frac{\lambda_1^\gamma}{2\delta_1}$ - теплопроникливість покриття. Отже, отримані в першому розділі узагальнені нелінійні

граничні умови (8) радіаційно-конвективного теплообміну дозволяють з достатньою точністю враховувати вплив покриттів та інших важливих факторів на термопружні процеси при формуванні високотемпературних покриттів.

В цьому ж розділі наведено систему узагальнених граничних умов механічної взаємодії основи через тонке покриття та отримано співвідношення для розрахунку усереднених характеристик температури в покритті.

У другому розділі досліджено термопружний стан системи тіло - покриття з плоскими поверхнями при високотемпературному напиленні. Розглядається процес високотемпературного двостороннього напилення покриттів різної товщини ($2\delta_1$ і $2\delta_3$) на поверхні теплопровідного шару постійної товщини $2\delta_2$. В загальному випадку теплофізичні та фізико-механічні характеристики покриттів є різними і відмінними від таких характеристик матеріалу основи. В

межах виділених часових та температурних інтервалів вважаємо ці характеристики незалежними від температури. Припускаємо, що на вільній поверхні основи в першому інтервалі часу $0 - \tau_1$ та зовнішніх поверхнях покриттів в інтервалах часу $\tau_1 - \tau_2$ і $\tau_2 - \infty$ має місце конвективний та променистий теплообмін з оточуючим середовищем, а в області контакту основи і покриттів - ідеальний тепловий контакт.

Розподіл температури по товщині основи описується розв'язком рівняння теплопровідності

$$a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = \frac{\partial T_2}{\partial \tau}, \quad (9)$$

- 9 -

який задовільняє початковій умові

$$T_2(z, \tau) = T_{01} = \text{const}; \quad \text{при } \tau = 0 \quad (10)$$

та узагальненій граничній умові (8).

Тут $a_2 = \frac{\lambda_2^\gamma}{\omega_2}$ - температуропровідність матеріалу підкладки;

$\lambda_2^\gamma, \omega_2$ - теплопровідність та теплоємність матеріалу основи відповідно.

В розглядуваному випадку граничні умови (7) матимуть наступний вигляд:

$$G_1^{(1)}[\theta(\tau) - \theta(\tau - \tau_1)] + G_2^{(1)}[\theta(\tau - \tau_1) - \theta(\tau - \tau_2)] + G_3^{(1)}\theta(\tau - \tau_2) = 0; \quad (11)$$

$$G_1^{(3)}[\theta(\tau) - \theta(\tau - \tau'_1)] + G_2^{(3)}[\theta(\tau - \tau'_1) - \theta(\tau - \tau_2)] + G_3^{(3)}\theta(\tau - \tau'_2) = 0.$$

Оскільки ми розглядаємо нанесення покриттів з різних матеріалів і різних товщин по обидві поверхні шару, то, взагалі кажучи, моменти часу τ_1 і τ'_1 (початок напilenня) і моменти часу τ_2 і τ'_2 (завершення напilenня) можуть бути неоднаковими (не співпадати).

Отже, маючи сформульовану нелінійну крайову задачу теплопровідності (9)-(11) можна провести розрахунок розподілу температури по товщині основи (включаючи температуру в зоні контакту шару з покриттям) для довільного моменту часу: від початку нагрівання поверхні основи потоком плазмотвірного газу до моменту завершення нанесення покриття і повного остигання готового виробу. Така постановка задачі дає змогу в залежності від конкретних вимог, що ставляться до формування механічної системи шар - двостороннє покриття, шляхом підбору відповідних геометричних, теплофізичних та низки інших визначальних факторів ще до практичної реалізації отриманих результатів оптимізувати температурні режими нанесення.

Розподіл температури по товщині шару обумовлює в ньому теплові напруження, які визначаються за відомими співвідношеннями

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\beta_t^{(2)} E_2}{1 - \nu_2} T_{21}(z, t) + \alpha_{11} + \alpha_{21}z; \quad (12)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xy} = 0; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1; \quad -\delta_2 \leq z \leq \delta_2,$$

де T_{21} - розподіл температури по товщині шару в першому інтервалі часу.

Невідомі константи α визначаються з умов самозрівноваженості поперечного перерізу шару з покриттям: рівності нулю головного вектора і головного момента зусиль, які діють на поперечний переріз. В першому інтервалі часу $(0 - \tau_1)$, ще до формування покриття, ці умови мають такий вигляд:

$$\int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} dz = 0, \quad \int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} z dz = 0. \quad (13)$$

- 10 -

Згідно з вибраною моделлю опису теплових процесів при високотемпературному напilenні напруження в покритті виникають після моменту кристалізації покриття в час $\tau = \tau_{кр}$. До моменту часу $\tau_{кр}$ покриття на поверхні основи перебуває в нетвердому стані, тому в нововиділеному інтервалі часу $\tau_1 - \tau_{кр}$ поверхні основи $z = \pm \delta_2$ можна вважати вільними від зовнішніх навантажень, а розподіл напружень по товщині шару визначатиметься аналогічними до (12) співвідношеннями.

В інтервалі часу $\tau_{кр} - \infty$ компоненти тензора напружень σ_{xx}, σ_{yy} визначаються із співвідношення (12). Після $\tau_{кр}$, коли покриття починають діяти механічно, постійні α знаходимо з умов рівноваги нормального перерізу системи шар - двостороннє покриття

$$N_1 + N_3 + \int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} dz = 0; \quad (14)$$

$$N_1 \delta_2 - N_3 \delta_2 + \int_{-\delta_2}^{\delta_2} \sigma_{xx} z dz = 0.$$

Зусилля N_1 та N_3 , що виникають в покритті після його кристалізації, визначаються співвідношеннями

$$N_1 = \frac{2E_1 \delta_1}{1 - \nu_1} [e_{xx}^{(1)} - \beta_t^{(1)} \tilde{T}_1]; \quad (15)$$

$$N_3 = \frac{2E_3 \delta_3}{1 - \nu_3} [e_{xx}^{(3)} - \beta_t^{(3)} \tilde{T}_3],$$

де $E_1, \nu_1, \beta_t^{(1)}, E_3, \nu_3, \beta_t^{(3)}$ - модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та коефіцієнти лінійного температурного розширення матеріалів покриття;

$\tilde{T}_1, \tilde{T}_3$ - усереднені характеристики температури в покриттях;

$e_{xx}^{(1)}, e_{xx}^{(3)}$ - компоненти тензора деформації покриттів.

Значення $e_{xx}^{(1)}, e_{xx}^{(3)}$ визначаються з умов жорсткого зчеплення покриття з основою в припущенні, що тонке покриття контактує з підкладкою по серединній лінії.

$$\begin{aligned} e_{xx}^{(1)} &= e_{xx}^{(2)}, \quad z = \delta_2, \quad \tau > \tau_{кр}; \\ e_{xx}^{(3)} &= e_{xx}^{(2)}, \quad z = -\delta_2, \quad \tau > \tau'_{кр}. \end{aligned} \quad (16)$$

При цьому $e_{xx}^{(1)} = 0, e_{xx}^{(3)} = 0$ при $\tau = \tau_{кр}$. Визначаючи величини деформацій приконттактних областей покриття, слід враховувати наявність певних деформацій в основі. Остаточно для визначення залишкових зусиль N_1 і N_3 , які виникають в покритті отримано наступні вирази

- 11 -

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{2E_1\delta_1}{1-\nu_1} \frac{\nu_2}{E_2} (\alpha_{13} + \alpha_{23}\delta_2) - H_s - \beta_t^{(1)}\tilde{T}_1 \Big\}; \\ N_3 &= \frac{2E_3\delta_3}{1-\nu_3} \frac{\nu_2}{E_2} (\alpha_{13} - \alpha_{23}\delta_2) - H_r - \beta_t^{(3)}\tilde{T}_3 \Big\}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{де } H_s &= \frac{\beta_t^{(2)}}{2\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau_{кр}) dz + \frac{3}{\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau_{кр}) z dz \Big\}; \\ H_r &= \frac{\beta_t^{(2)}}{2\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau'_{кр}) dz - \frac{3}{\delta_2} \int_{-\delta_2}^{\delta_2} T_{23}(z, \tau'_{кр}) z dz \Big\}. \end{aligned}$$

Отримані в цьому розділі співвідношення подано в найбільш загальному вигляді. Покладаючи в них певним чином значення геометричних, теплофізичних та фізико-механічних характеристик системи, можна отримати співвідношення для дослідження і розрахунку залишкового термонапруженого стану практично важливих часткових випадків.

В роботі для розв'язання нестационарної одновимірної задачі термопружності з нелінійними граничними умовами (11) розроблена чисельно-аналітична методика розрахунку термопружного стану системи шар - двостороннє покриття, що базується на основі розробленої математичної моделі та з використанням неявної схеми кінцево-різницевого методу.

В дисертації за даними з літератури проаналізовано способи вибору параметрів подібних задач.

З метою дослідження впливу зміни режимів нанесення покриттів на залишковий термонапружений стан системи основа-покриття розглянуто процес напилення на плоску основу із сталі 20 двостороннього захисного ніхромового покриття однакової товщини ($\delta_1 = \delta_2$).

Аналіз отриманих числових результатів, зокрема, показав, що при певних співвідношеннях товщин основи та покриттів в останніх можуть виникати як стискаючі, так і розтягуючі залишкові зусилля. При нанесенні покриття на основу 0,01м зусилля в покритті є

стискаючими, що є бажаним фактом при виготовленні виробів з плазмонапишеними покриттями, а при нанесенні покриття тієї ж товщини на основу 0,05м - небезпечними (в залежності від конкретних умов експлуатації) розтягуючими. Причому ці розтягуючі залишкові зусилля досягають свого максимуму ще на етапі неповного остигання підкладки з покриттям, що може призвести до його розтріскування.

Для визначення впливу зміни товщини самого покриття на залишкові зусилля було проведено експеримент, в якому товщина покриття збільшувалась в 10 та 20 раз порівняно з початковою. У випадку збільшення товщини покриття на основі товщиною 0,01м спостерігалось значне зростання стискаючих зусиль в покритті. При збільшенні товщини покриття, що наносилось на основу товщиною 0,05м - зростання розтягуючих зусиль, причому зростання і досягнення екстремального значення такими зусиллями відбувались досить швидко (10-15с), що може спричинити руйнування покриття на ранній стадії охолодження. Слід уникати також і значного зростання стискаючих залишкових зусиль, оскільки це може призвести до відшарування покриття.

- 12 -

Отже, підбираючи певним чином співвідношення характерних розмірів покриття, основи та час її попереднього підігріву, можна досягти відповідного рівня (за знаком та абсолютною величиною) залишкових зусиль в покритті. Температурні режими нанесення покриття у всіх випадках підбирались таким чином, щоб в зоні контакту досягалась температура, не нижча за температуру плавлення (кристалізації) матеріалу покриття, що забезпечує надійне зчеплення покриття з основою.

У третьому розділі досліджено залишковий темонапружений стан циліндричних тіл при високотемпературному нанесенні на їх зовнішню поверхню захисних покриттів. У першому параграфі сформульовано нелінійну крайову задачу теплопровідності для довгого порожнистого кругового циліндра з одностороннім зовнішнім покриттям, Теплофізичні, фізико-механічні та радіаційні характеристики матеріалів основи і покриття відмінні між собою. Як і в попередньому розділі, припускається, що між основою і покриттям тепловий і механічний контакт є ідеальним. В першому інтервалі часу $0 - \tau_1$ (попередній підігрів) між зовнішньою поверхнею циліндра $r = R_2$ та робочим середовищем відбувається радіаційно-конвективний теплообмін. Аналогічний процес теплообміну має місце і на вільній поверхні покриття (після моменту його сформування) $r = R_2 + 2\delta_1$ в інтервалах часу $\tau_1 - \tau_2$ і $\tau_2 - \infty$. У всіх виділених характерних часових інтервалах на внутрішній поверхні порожнистого циліндра має місце радіаційно-конвективна тепловіддача.

Розподіл температури вздовж радіуса циліндра $R_1 \leq r \leq R_2$ описується розв'язком диференціального рівняння теплопровідності, записаного в циліндричних координатах r, θ, z

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} = a_2 \frac{\partial T_2(r, \tau)}{\partial \tau}, \quad (18)$$

який задовільняє початкову умову

$$T_2(r, \tau) = f(r) \quad \text{при} \quad \tau = 0, \quad (19)$$

та узагальнені граничні умови типу (8) при $r = R_2$ та $r = R_2 + 2\delta_1$. У всіх часових інтервалах на внутрішній поверхні $r = R_1$ гранична умова має наступний вигляд:

$$\lambda_2' \frac{\partial T_2}{\partial r} = \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4 - \chi_{PC2} (T_{PC2} - T_2), \quad r = R_1. \quad (20)$$

- 13 -

Тут введено такі позначення:

$$a_2 = \frac{\lambda_2'}{\omega_2} \text{ - температуропровідність матеріалу основи;}$$

$$\chi_{PC2}, T_{PC2} \text{ - коефіцієнт тепловіддачі та абсолютна температура середовища } 0 \leq r \leq R_1.$$

Для першого інтервалу часу в довгому круговому порожнистому циліндрі при плоскому осесиметричному температурному полі $T_2(r, \tau)$, яке є відомим з розв'язку задачі теплопровідності (18), (19), (8) та (20), виникає осесиметрична деформація. Оскільки поверхні циліндра є вільними від зовнішніх навантажень, для визначення компонент тензора напружень $\sigma_{rr}^{(1)}$ і $\sigma_{\theta\theta}^{(1)}$ маємо наступні співвідношення:

$$\sigma_{rr}^{(1)} = C_1 + \frac{C_2}{\rho_2} - \frac{\beta_t' E'}{\rho^2} \int_{\rho_1}^{\rho} T_{21}(\rho, \tau) \rho d\rho, \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(1)} = C_1 - \frac{C_2}{\rho_2} - \beta_t' E' T_{21}(\rho, \tau) + \frac{\beta_t' E'}{\rho^2} \int_{\rho_1}^{\rho} T_{21}(\rho, \tau) \rho d\rho.$$

Тут $\rho = r / R_2$ - відносний радіус; $\rho_1 \leq \rho \leq 1$, $\rho_1 = \frac{R_1}{R_2}$;

$$E' = \frac{E_2}{1 - \nu_2^2} ; \quad \nu' = \frac{\nu_2}{1 - \nu_2} ; \beta_t' = (1 - \nu_2) \beta_t^{(2)} ;$$

$E_2, \nu_2, \beta_t^{(2)}$ - модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу основи;

$T_{21}(\rho, \tau)$ - розподіл температури за радіусом порожнистого циліндра в першому інтервалі часу.

Значення констант C_1, C_2 визначаються з граничних умов на поверхні циліндра:

$$\sigma_{rr}^{(1)} = 0 \quad \text{при } \rho = \rho_1 \quad \text{та } \rho = 1. \quad (22)$$

Якщо торцеві поверхні циліндра є вільними від зовнішніх навантажень, компонента вектора переміщень u_z лінійно залежить від z

$$u_z = C_3 z \quad (23)$$

і не залежить від радіуса r , оскільки поперечні перерізи, перпендикулярні до осі OZ , залишаються плоскими.

Тоді із закону Гука для компоненти тензора напружень $\sigma_{zz}^{(1)}$ матимемо таке співвідношення:

- 14 -

$$\sigma_{zz}^{(1)} = C_3 + \frac{\nu_2}{E_2} (\sigma_{rr}^{(1)} + \sigma_{\theta\theta}^{(1)}) - \beta_t^{(2)} T_{21}(\rho, \tau), \quad (24)$$

а значення константи C_3 визначимо з умов рівноваги плоского поперечного перерізу циліндра

$$\oint_{\rho_1}^1 \sigma_{rr}^{(1)} \rho d\rho d\theta = 0. \quad (25)$$

Отже, маючи значення всіх констант, отримаємо вирази для визначення відмінних від нуля компонент тензора напружень $\sigma_{rr}^{(1)}, \sigma_{\theta\theta}^{(1)}, \sigma_{zz}^{(1)}$, компонент тензора деформацій $e_{rr}^{(1)}, e_{\theta\theta}^{(1)}, e_{zz}^{(1)}$ та компонент вектора переміщень $u_r^{(1)}$ та $u_z^{(1)}$. Якщо торцеві поверхні циліндра є закріпленими від осевого переміщення ($u_z^{(1)} = 0$), співвідношення для визначення напружень, деформацій та переміщень отримаємо з (21)-(24), покладаючи в них $C_3 = 0$.

Аналогічна ситуація має місце і в інтервалі часу $\tau_1 - \tau_{кр}$.

В третьому інтервалі часу внаслідок кристалізації на поверхні основи покриття і в силу осевої симетрії в ньому виникають лише початкові зусилля N_1 і N_2 , які визначаються співвідношеннями:

$$N_1 = \frac{2E_1\delta_1}{1-\nu_1^2} \left\{ \xi_2 - \frac{1-\nu_1}{R_2} \tilde{T}_1^{(3)} \right\}; \quad (26)$$

$$N_2 = \frac{2E_1\delta_1}{1-\nu_1^2} \left\{ \xi_1 - \frac{1-\nu_1}{R_2} \tilde{T}_1^{(3)} \right\};$$

де ξ_1, ξ_2 - компоненти деформації серединної поверхні покриття;

$E_1, \nu_1, \beta_t^{(1)}$ - модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу покриття;

$\tilde{T}_1^{(3)}$ - усереднена характеристика температури в покритті.

Невідомі константи, що містяться в (26), у виразах для визначення компонент тензора напружень (21) і (24) знайдено з наступних граничних умов:

$$\sigma_{r|\rho=1}^{(3)} = -\frac{N_2}{R_2} ; \quad \sigma_{r|\rho=\rho_1}^{(3)} = 0 ; \quad \int_{\rho_1}^1 \sigma_{\tau}^{(3)} \rho d\rho = \frac{N_2}{R_2} . \quad (27)$$

Таким чином, отримано формули для визначення залишкового термонапруженого стану високотемпературного покриття у випадку вільних та защемлених торцевих поверхонь циліндра.

- 15 -

Для теоретичної оцінки співвідношення параметрів системи та режиму напilenня на залишкові зусилля в покритті було здійснено низку числових експериментів для набору співвідношень геометричних розмірів основи та покриття, тривалостей попереднього нагрівання поверхні основи потоком плазмотвірного газу, початкових температур основи, співвідношень модулів пружності та коефіцієнтів лінійного температурного розширення матеріалів основи та покриття при вільних та защемлених від осьового переміщення торцевих поверхнях.

Як показали дослідження, в залежності від конкретних термічних умов напilenня і певних співвідношень визначальних параметрів в покритті виникають розтягуючі і стискаючі залишкові зусилля, а їх критичні значення досягаються на початковій або кінцевій стадії охолодження готового виробу з покриттям, що може бути причиною руйнування покриття (як розтріскування, так і відшарування).

Аналіз отриманих результатів дозволяє ще на стадії проектування режимів напilenня покриття підібрати раціональні режими нанесення, теоретично прогнозувати їх міцність та довговічність.

У висновках коротко сформульовано основні результати роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА КОРОТКІ ВИСНОВКИ

1. В роботі побудовано узагальнену математичну модель термомеханічних процесів при високотемпературному напilenні покриття з урахуванням енергії випромінювання, теплового впливу потоку плазмотвірного газу, радіаційно-конвективного теплообміну системи основа - покриття з навколишнім середовищем, способів закріплення зразка для вибору раціональних режимів нанесення покриття.

2. Операторним методом отримано узагальнені нелінійні граничні умови радіаційно-конвективного теплообміну тіл з покриттями та наведено систему узагальнених граничних умов термомеханічної взаємодії підкладки через тонкі покриття на характерних виділених інтервалах за часом.

3. На основі побудованих вихідних співвідношень сформульовано відповідні нелінійні крайові задачі термопружності, розроблено чисельно-аналітичну методику розрахунку температурних режимів і залишкового термонапруженого стану системи підкладка-покриття для плоских та циліндричних зразків при одно- та двосторонньому напыленні на їх поверхні захисних покриттів.

4. Проаналізовано вплив кожного з виділених визначальних факторів (попереднього підігріву основи, нагрівання основи потоком плазмотвірного газу, зміни товщини покриття та основи, співвідношення коефіцієнтів температурного розширення, механічних характеристик матеріалів підкладки і покриття, впливу радіаційної складової теплового потоку) на залишковий термонапружений стан механічної системи тіло-покриття.

- 16 -

Аналіз отриманих результатів розрахунків показав, що в залежності від співвідношення геометричних розмірів основи та покриття в останньому на певних етапах охолодження системи можуть виникати як стискаючі, так і розтягуючі залишкові зусилля, досягати максимуму ще на початковій стадії охолодження і спричиняти руйнування покриття.

На підставі аналізу залишкового температурного стану порожнистого циліндра з одностороннім зовнішнім покриттям виявлено, що заземлення від осевого переміщення циліндра призводить до виникнення в покритті (після охолодження) деяких критичних розтягуючих залишкових зусиль, які можуть обумовити розтріскування покриття. Небезпечним може виявитись зростання до певних екстремальних (максимальних) розтягуючих значень залишкових зусиль на початковому етапі охолодження покриття. Модель дозволяє з метою керування величиною залишкових зусиль вибирати раціональні режими нанесення покриттів.

РОБОТИ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНО ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гаврись А.П., Иващук Д.В., Шевчук П.Р. Температурные режимы в системе подложка-покрытие при высокотемпературном напылении // Инженерно-физический журнал. - 1988. - №6. - С.1033. Рук. деп. в ВИНТИ 25.01.1988, рег. №664-B88.

2. Гаврись А.П., Иващук Д.В., Шевчук П.Р. Определение остаточных напряжений в системе слой-покрытие при двустороннем высокотемпературном напылении // Мат. методы и физ.-мех. поля. - 1989. - Вып. 29. - С.8-12.

3. Шевчук П.Р., Гаврись А.П. Влияние лучистого нагрева на температурные режимы и остаточные напряжения при высокотемпературном напылении // Мат. методы и физ.-мех. поля. - Вып. 30. - С.69-73.

4. Гаврись А.П., Шевчук П.Р. Математическое моделирование процессов при высокотемпературном напылении покрытий // Мат. методы и физ.-мех. поля. - 1991. - Вып. 33. - С. 13-18.

5. Шевчук П.Р., Сенчина Б.И., Гаврись А.П. Методы расчета рациональных режимов нанесения плазменных и диффузионных покрытий // Опыт применения композитных материалов в сельскохозяйственном машиностроении: Тезисы докладов совещания / г. Чернигов, июнь 1985 г./ - Чернигов, Госкомсельхозтехника УССР, 1985. - С.136.

6. Гаврись А.П. Тепловые режимы и остаточные напряжения при двустороннем плазменном напылении покрытий с учетом влияния температуры плазменной струи // Защита судов от коррозии и обрастания: Тезисы докладов 3-й межотраслевой научно-технической конференции / г.Калининград, сентябрь 1985/ - Калининград, ЦНИИ ТС НПО "Ритм", 1985, - С. 115-116.

- 17 -

7. Гаврись А.П. Теплообмен при высокотемпературном напылении покрытий. // Современные вопросы естествознания. Прикладные вопросы тепломассообмена: Тезисы докладов 7-й Краснодарской краевой конференции / г. Краснодар, сентябрь 1986г./ - Краснодар, Краснодарский политехнический институт, 1986. - С.40-43.

8. Гаврись А.П., Иващук Д.В. Термонапряженное состояние слоя с двусторонним плазменным покрытием // Механика неоднородных структур: Тезисы докладов 3-й всесоюзной конференции. / г. Львов, июнь 1991 г./ - Львов, Ин-т прикл. проблем механики и математики АН УССР, 1991. - С.63.

9. Шевчук П.Р., Гаврись О.П. Чисельно-аналітичне дослідження термопружного стану тіл при високотемпературному напыленні з врахуванням теплообміну випроміненням // Теорія наближення і задачі обчислювальної математики: Тези доповідей міжнародної конференції / м.Дніпропетровськ, травень, 1993 р./ - Дніпропетровськ, Дніпропетровський державний університет, 1993. - С. 213.

10. Шевчук П.Р., Гаврись О.П. Математичне моделювання та чисельно-аналітичне дослідження термонапруженого стану циліндричних тіл з покриттями при високотемпературному напыленні з врахуванням теплообміну випроміненням // Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів. Корозія-94:

Матеріали міжнародної конференції-виставки / м.Львів, жовтень 1994 р./ - Львів, Фізико-мехнічний інститут НАН України, 1994. - С. 240.

11. Шевчук П.Р., Гаврись О.П., Шевчук В.А. Математичне моделювання та розрахунок раціональних режимів нанесення, прогнозування міцності та довговічності покриттів в агресивних середовищах // 2-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків МСІМЛІ-2: Тези доповідей / м.Львів, квітень 1995/ - Львів, Державний університет "Львівська політехніка", 1995. - С. 123.

12. Gavrys' Olexander, Shevchuk Pavlo. Calculation and Study of the Residual Stress State of Bodies with High Temperature Sprayed Coatings // XXXI Polish Solid Mechanics Conference Sol'Mec: Book of Abstracts - Mierki n. Olsztynek, 1996. - P.103-104.

13. Shevchuk P., Gavrys' O. Mathematical Modelling and Methods of Calculation Elements Surface Strengthening by Plasma Sprayings // 5th European Conference on Advanced Materials, Processes and Applications EUROMAT-97: Proceedings of the Conference. - Maastricht, 1997. - Vol. 3. - P.253-256.

- 18 -

АНОТАЦІЯ. Гаврись О.П. Визначення термонапруженого стану покриттів при високотемпературному напиленні. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла.- Інститут прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України, Львів, 1998.

В роботі побудовано математичну модель термомеханічних процесів при високотемпературному нанесенні покриттів з урахуванням енергії випромінювання, теплового потоку плазмотвірного газу, радіаційно-конвективного теплообміну системи основа - покриття з робочим середовищем, різноманітних способів закріплення зразка. Отримано узагальнені нелінійні граничні умови радіаційно-конвективного теплообміну тіл з покриттям та систему узагальнених граничних умов термомеханічної взаємодії основи через тонкі покриття. Розроблено чисельно-аналітичну методику розв'язування відповідних нелінійних крайових задач термoprужності. Виявлено ряд характерних особливостей формування та поведінки залишкових напружень у покриттях. Сформульовано відповідні рекомендації для керування такими залишковими напруженнями з метою раціоналізації температурних режимів нанесення покриттів.

Ключові слова: математична модель, високотемпературне напылення, радіаційно-конвективний теплообмін, захисні покриття, температурне поле, залишкові напруження.

АННОТАЦИЯ. Гаврись А.П. Определение термонапряженного состояния покрытий при высокотемпературном напылении.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела.- Институт прикладных проблем механики и математики им.Я.С.Подстригача НАН Украины, Львов, 1998.

В работе построено математическую модель термомеханических процессов при высокотемпературном нанесении покрытий с учетом энергии излучения, теплового потока плазмообразующего газа, радиационно-конвективного теплообмена системы основа - покрытие с рабочей средой, различных способов закрепления образца. Получены обобщенные нелинейные граничные условия радиационно-конвективного теплообмена тел с покрытиями и систему обобщенных граничных условий термомеханического взаимодействия основы через тонкие покрытия. Разработано численно-аналитическую методику решения соответствующих нелинейных краевых задач термоупругости. Выявлено ряд характерных особенностей формирования и поведения остаточных напряжений в покрытиях. Сформулированы соответствующие рекомендации для управления такими остаточными напряжениями с целью рационализации температурных режимов нанесения покрытий.

Ключевые слова: математическая модель, высокотемпературное напыление, радиационно-конвективный теплообмен, защитные покрытия, температурное поле, остаточные напряжения.

- 19 -

ABSTRACT. Gavrys' O.P. The Determination of Thermal-Stress State of Coatings During High-Temperature Spraying.- Manuscript.

Thesis presented for a candidate's degree in physics and mathematics by speciality 01.02.04 - Mechanics of Deformable Bodies.-Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 1998.

The mathematical model of thermomechanical processes during high-temperature spraying of coatings, while taking into account: radiation energy; heat flow plasma forming gas; radiative-convective heat exchange of the system: base - coating with working media; different methods of sample fixing, is constructed. The generalized nonlinear boundary conditions of radiative-convective heat exchange of bodies with coatings and system of generalized boundary conditions of thermomechanical interaction of base through thin coatings are obtained. Numeric-analytical method of solving of corresponding nonlinear boundary problems of thermoelasticity is developed. The number of characteristic peculiarities of forming and behaviour of residual stresses in coatings has been discovered. Corresponding recommendations for control of such residual stresses for rationalization of temperature regimes of coating spraying have been formulated.

Key words: mathematical model, high-temperature spraying, radiative-convective heat exchange, protective coatings, temperature field, residual stresses.

Здобувач

О.П.Гаврись