

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В.КАРПЕНКА

На правах рукопису

МАТИЧАК
ЯРОСЛАВ СТЕПАНОВИЧ

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ СТАН В'ЯЗКОПРУЖНИХ
ТІЛ В УМОВАХ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ
ДИФУЗІЇ

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 - 1993.

26 26.897

Робота виконана у Фізико-механічному інституті
ім. Г.В.Карпенка АН України.

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ПАВЛИНА ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ

Офіційні опоненти: член-кореспондент АН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор
БУРАК ЯРОСЛАВ ІОСИПОВИЧ

кандидат фізико-математичних наук,
доцент
ІВАЩУК ДМИТРО ВАСИЛЬОВИЧ

Провідна установа - Інститут проблем міцності
АН України (м.Київ)

Захист відбудеться " 7 " КВІТНЯ 1993 р. в 14 год.
на засіданні спеціалізованої ради Д 016.42.01 при Фізико-
механічному інституті ім. Г.В.Карпенка АН України за адресою:
290601, м.Львів, МСП, вул.Наукова,5.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту.
Автореферат розісланий " 2 " БЕРЕЗНЯ 1993 р.

УЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
спеціалізованої ради,
доктор технічних наук

НИКИФОРЧИН
Григорій Миколайович

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00825846 (X)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРЕКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Проблема підвищення експлуатаційних характеристик металів і сплавів, одержання на їх основі нових конструкційних матеріалів із заданим комплексом механічних, фізико-хімічних властивостей вирішується завдяки використанню ефективних методів хіміко-термічної обробки (ХТО), зокрема, нанесенню на поверхні виробів багатокомпонентних покриттів. Дослідженням процесів деформування і руйнування конструкційних матеріалів в результаті високотемпературної їх взаємодії з навколишнім середовищем приділяється велика увага, однак багато питань залишаються відкритими. Одна з причин - розмаїтість процесів і явищ, які проявляються не в чистому виді, а в різних комбінаціях (багатокомпонентна дифузія і хімічні перетворення, процеси деформування і релаксація). Вивчалися ці явища, на жаль, без належного їх взаємозв'язку, хоча окремо такі теоретичні дослідження й проводились. Тільки на базі повних і всебічних знань про закономірності впливу навколишнього середовища можна пояснити зміни властивостей виробів в цілому, вибрати ефективні режими ХТО, дати науково обгрунтовану оцінку міцнісним характеристикам, а відтак, працездатності елементів конструкцій. При високотемпературній взаємодії матеріалів з навколишнім середовищем виникають внутрішні залишкові напруження. Самі по собі чи в поєднанні з механічними напруженнями від зовнішніх сил вони у багатьох випадках можуть привести до локального або повного руйнування виробів. Тому важливе наукове і практичне значення має розвиток модельних уявлень про деформування металевих виробів з урахуванням комплексного впливу різних фізико-хімічних факторів і створення на цій основі методики аналітичного дослідження і розрахунку діючих залишкових напружень.

Мета і задачі роботи - моделювання фізико-механічної поведінки конструкційних матеріалів, зумовленої високотемпературною їх взаємодією з зовнішнім середовищем, з урахуванням взаємозв'язку багатокомпонентної дифузії і хімічних перетворень, процесів деформування і релаксації; математична постановка і розв'язування нових крайових задач дифузії і механіки стосовно тіл обмеженої конфігурації (пластина, циліндр); виявлення закономірностей і особливостей розподілу елементів у багатокомпонентних системах при дифузії з урахуванням хімічних перетво-

реннь; вивчення особливостей в'язкопружного деформування твердих тіл в процесі дифузійного насичення; розробка методики аналітичного дослідження кінетики формування і розрахунку залишкових напружень в тілах з дифузійними покриттями.

Загальна методика досліджень. Об'єкт досліджень - багатокомпонентні континууми, які моделюють металеві тверді розчини з включеннями інших фаз, приповерхневі шари матеріалу в умовах фізико-хімічного контакту з середовищем.

Дослідження проведені в рамках механіки суцільного середовища на основі підходів термодинаміки необоротних процесів, фізичної хімії з використанням інтегральних перетворень. Числові розрахунки виконані на ЕОМ типу "ATARI".

Наукова новизна. Розроблено математичну модель деформування конструкційних матеріалів при високотемпературній взаємодії з оточуючим середовищем з урахуванням взаємовпливу різних фізико-хімічних факторів (багатокомпонентної дифузії і хімічних перетворень, процесів деформування і релаксації).

Одержано узагальнені рівняння масообміну багатокомпонентних реагуючих тіл, які враховують фізико-хімічні процеси на границі їх контакту і дозволяють розв'язувати широке коло дифузійних задач. Сформульовано і розв'язано крайові задачі дифузії в багатокомпонентних системах з урахуванням внутрішніх хімічних перетворень та кінетики масообміну на поверхнях. Для трьох- і чотирьохкомпонентних систем (плоскі та циліндричні тіла) встановлено особливості розподілу елементів. Аналітично досліджено вплив хімічних перетворень (утворення або розпад комплексів строго стехіометричного складу) на перерозподіл дифундуючих елементів. Теоретично описано і експериментально підтверджено збіднення компонентами приповерхневих шарів алюмінієвого сплаву В95 при вакуумному відпалі внаслідок сублімації легуючого елемента з врахуванням одночасного розпаду і розчинення вторинної фази. Виявлено ефекти водневого насичення і дифузійного перерозподілу вуглецю в сталях в умовах утворення метану по границях зерен.

Розроблено методику аналітичного дослідження напружено-деформівного стану конструкційних матеріалів після ХТО, яка ґрунтується на першочерговому розгляді деформаційного процесу при комплексній дії різних фізико-хімічних факторів з наступним

розрахунком залишкових напружень. Досліджено кінетику формування необоротних в'язких деформацій, спричинених дифузійними і релаксаційними явищами в плоских і циліндричних тілах. При обчисленні залишкових напружень враховано, що останні викликані як цими деформаціями, так і нерівномірним концентраційним розширенням та неоднорідними тепловими деформаціями внаслідок охолодження. Показано, що нерівномірно розподілені в'язкі і теплові деформації стимулюють появу небажаних розтягуючих залишкових напружень, що було підтверджено експериментально на сталі 45 після титанування.

Практична цінність. Результати досліджень кінетики дифузійних процесів дозволяють рекомендувати більш ефективні режими обробки, давати науково обґрунтовану оцінку властивостей і працездатності виробів та розширити область їх застосування. Відповідність даних теоретичного і експериментального досліджень підтверджують коректність запропонованого аналітичного підходу до розрахунку залишкових напружень.

Результати теоретичних досліджень були використані при розробці режимів термообробки виробів з алюмінієвих сплавів і впроваджені з економічним ефектом 203 тис.крб.

На захист виносяться:

1. Математична модель деформування металевих виробів в процесі ХТО, яка враховує взаємовплив багатоконпонентної дифузії і хімічних перетворень, процесів деформації і релаксації.
2. Узагальнені рівняння масообміну багатоконпонентних реакуючих тіл, що враховують фізико-хімічні процеси на межі тверде тіло-нарколишне середовище.
3. Постановка задач і одержані розв'язки, які описують розподіл елементів і внутрішніх напружень в плоских і циліндричних тілах.
4. Закономірності розподілу елементів і залишкових напружень, зумовлені взаємовпливом дифузійних потоків, кінетиком поверхневих процесів, внутрішніми хімічними перетвореннями, релаксаційними явищами.
5. Аналітичний підхід для дослідження кінетики утворення необоротних в'язких деформацій, спричинених дифузійними і релаксаційними явищами.
6. Методика теоретичного розрахунку залишкових напружень в

тілах з дифузійними покриттями.

7. Критеріальні залежності для визначення оптимальних товщин покриттів.

Апробація роботи. Основні результати досліджень по темі дисертації доповідались і обговорювались на IX-XII наукових конференціях молодих вчених ФМІ АН УРСР (1979, 1982, 1983, 1985 рр., Львів), IV Всесоюзній науковій конференції по хіміко-термічній обробці металів і сплавів (1981 р., Мінськ), нарадах "Високотемпературна взаємодія з газовими середовищами і її вплив на структуру та фізико-механічні властивості титану та його сплавів" (1983, 1985 рр., Львів), VIII Всесоюзній конференції по колоїдній хімії та фізико-хімічній механіці (1983 р., Ташкент), XIX-XXI семінарах по дифузійному насиченню і захисним покриттям (1982 р., Дрогобич; 1984 р., Львів; 1986 р., Дніпропетровськ), конференції "Сучасні методи боротьби з корозією в машинобудуванні" (1987 р., Брєван), науковому семінарі "Нелінійні проблеми механіки суцільного середовища і фізичного матеріалознавства" (1989 р., Київ), III Всесоюзній конференції по механіці неоднорідних структур (1991 р., Львів).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 17 наукових праць.

Об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, заключення, списку літератури (157 найменувань) і додатку; містить 142 сторінок машинописного тексту, 40 рисунків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і важливість питань, що складають предмет дисертаційної роботи, проаналізований сучасний стан проблеми, поставлена мета роботи, стисло викладені важливіші результати досліджень і сформульовані основні положення, які виносяться автором на захист.

Перший розділ присвячений подальшій розробці математичної моделі фізико-механічної поведінки конструкційних матеріалів, які піддаються при підвищених температурах дії навколишнього середовища, з врахуванням взаємовпливу процесів деформування і релаксації, багатокомпонентної дифузії і хімічних перетворень.

Оскільки основу високотемпературної обробки металів і сплавів у більшості випадків складають дифузійні процеси, спочатку сформульовані крайові задачі дифузійного масопереносу в

Багатокомпонентних системах з урахуванням внутрішніх хімічних перетворень. Аналітичний опис таких явищ пов'язаний з ускладненням відомих рівнянь дифузії Фіка шляхом введення додаткових членів, які характеризують наявність стоків або джерел дифундуючих елементів:

$$\sum_{j=1}^N D_{1j} \Delta C_j = \frac{\partial C_1}{\partial \tau} + \nu_1 \sum_{j=1}^N K_j (C_j - C_{0j}), \quad i=1, \dots, N. \quad (1)$$

Тут C_j - концентрації розчинених компонентів, C_{0j} - відповідно їх початкові рівноважні концентрації; D_{1j} - коефіцієнти дифузії, що характеризують потік 1-го елемента під дією градієнта концентрації j -го елемента. Коефіцієнти ν_1 визначаються через молекулярні маси M_1 реагуючих елементів і відповідних стехіометричних коефіцієнтів ν_1^0 реакції;

$K_j = \rho^{-1} L \sum_{i=1}^M \nu_i d_{1j}$, L - швидкість реакції, ρ - густина, коефіцієнти d_{1j} характеризують зміну хімічного потенціалу 1-го компонента в залежності від концентрації j -го компонента.

При побудові математичної моделі дифузійних процесів вирішальним є правильний вибір граничних умов. В роботі на підставі уявлень про проміжковий шар нульової товщини узагальнено умови масообміну багатокомпонентних реагуючих середовищ, які враховують взаємодію фізико-хімічних процесів на границі їх розділу. Зокрема, на поверхні тіла граничні умови

$$\sum_{j=1}^N D_{1j} \nabla C_j = \sum_{j=1}^N H_{1j} (C_j - C_j^{гр}) \quad (2a)$$

враховують за допомогою коефіцієнтів масообміну H_{1j} фазово-граничні реакції. Тут $C_j^{гр}$ - гранична поверхнева концентрація j -го елемента.

Для опису газонасичення тіла з покриттям маємо:

$$D^{(1)} \nabla C^{(1)} + D^{(2)} \nabla C^{(2)} = \omega \frac{\partial C}{\partial \tau} + H C^{(1)}, \quad C^{(2)} = K C^{(1)}, \quad (2b)$$

де $C^{(1)}, C^{(2)}$ - концентрації дифундуючого елемента в покритті та матриці; $D^{(1)}, D^{(2)}$ - відповідні коефіцієнти його дифузії; ω - приведена фізична ємність; $K = d_{11}/d_{22}$. Характерна особливість цих умов - існування між покриттям і основою резервуара, в якому елемент вилучається з процесу дифузії.

Запропонована математична модель (1), (2) (з урахуванням початкових умов стану рівноваги) дає можливість аналітично описувати широке коло явищ, що спостерігаються при ХТО конструкційних матеріалів та їх експлуатації.

В рамках механіки суцільного середовища відпрацьовано підхід для дослідження напружено-деформівного стану матеріалів, зумовленого дією навколишнього середовища, підвищених температур (T_B), фазових перетворень і розроблено методику його аналітичного опису. Підхід ґрунтується на першочерговому розгляді комплексного впливу різних фізико-хімічних факторів на деформівний стан матеріалів з наступним визначенням рівня і характеру розподілу діючих залишкових напружень.

Розроблено оригінальний спосіб оцінки кінетики формування необоротних в'язких деформацій в тілах, спричинених дифузійними і релаксаційними явищами. При цьому вважалося, що повні компоненти тензора деформації являють собою суму пружних і в'язких складових.

Дані про в'язкі деформації використовуються при розрахунку залишкових напружень у виробих після завершення дифузійного насичення і переходу до кімнатної температури T_K . Сформульовано відповідну крайову задачу механіки, в якій залишкові напруження визначаються деформаціями (додатковими)

$$e_{j,j}^{(0)} = e_{j,j}^B + \left[\sum_{i=1}^n \beta_i^K C_i + \alpha_0 (T_K - T_B) \right] / 3, \quad (3)$$

Розраховані таким чином залишкові напруження будуть максимально відповідати реальним (експериментально виміряним). Вони зумовлені концентраційним полем, нагромадженими в процесі обробки необоротними деформаціями ($e_{j,j}^B$) і нерівномірними тепловими деформаціями внаслідок охолодження. Останній фактор враховано через представлення коефіцієнта термічного розширення матеріалу лінійною функцією від розподілу елементів і введення у розгляд узагальненого коефіцієнта концентраційного розширення β_1^K .

Постановка задач узагальнена на випадок формування в приповерхневих шарах нових фаз. Враховано стрибкоподібну зміну внаслідок фазових або структурних перетворень фізико-механічних характеристик зовнішніх шарів - питомого об'єму вихідної речовини (d), термічного коефіцієнта об'ємного розширення (α), модуля Юнга (E), коефіцієнта Пуассона (μ).

У другому розділі досліджено ефекти взаємовпливу дифузійних потоків в багатоконпонентній системі. Подані точні розв'язки відповідних крайових задач в припущенні постійних коефіцієнтів дифузії для плоских і циліндричних тіл, а також наведено зручні для практичних розрахунків асимптотичні співвідношення для граничних випадків (малих і великих значень витримки). Встановлено закономірності розподілу елементів в результаті дифузійного насичення двокомпонентного твердого розчину третім елементом з постійного джерела. Показано, що взаємодія дифузійних потоків елементів зумовлює ряд особливостей в їх розподілі (рис.1): в залежності від величини недиагонального коефіцієнта дифузії D_{12} приповерхнева зона збагачується ($D_{12} < 0$, крива 1') або збіднюється ($D_{12} > 0$, крива 1'') легуємим елементом (крива 2 - розподіл насичуючого елемента). Виявлено, що неомогенність розподілу елементів в трьохкомпонентних системах в результаті одночасного насичення або сублимації елементів обумовлена як дифузійним взаємовпливом, так і кінетикою явищ на границі метал-зовнішнє середовище.

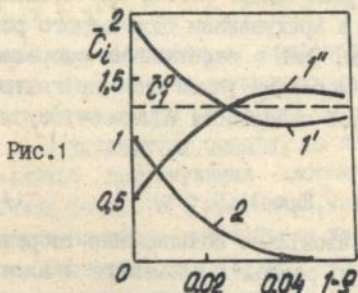


Рис.1

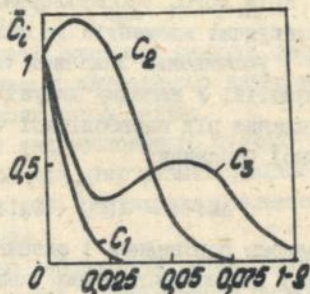


Рис.2

Значно ускладнюється розподіл елементів в чотирикомпонентній системі (рис.2), де на концентраційних профілях можливі два екстремуми. Концентрація елемента 2, на дифузійну здатність якого впливає перший елемент (дифундує незалежно), може досягати максимуму не на поверхні, як при однокомпонентному насиченні, а на деякій глибині. Ще більш складний характер розподілу елемента 3, дифузія якого зазнає впливу градієнтів концентрації перших двох. В міру віддалення від поверхні в глибину вміст його зменшується до деякого значення, а потім знову зростає з наступним спаданням.

Третій розділ містить результати аналітичних досліджень взаємозв'язаних дифузійних процесів і внутрішніх хімічних перетворень. Сформульована і розв'язана задача про дифузійне насичення елементом А із постійного джерела пластини товщиною $2l$, початково рівномірно легованої рухомою домішкою В, в умовах хімічної їх взаємодії з утворенням комплексів строго стехіометричного складу $A_{\nu_1}C_{\nu_2}$. Задача розв'язувалась методом послідовних наближень із застосуванням інтегрального перетворення Лапласа по часі. Одержано формули для розрахунку концентрацій елементів в твердому розчині, у зв'язаному стані (комплексах) і їх сумарних концентрацій. Показано, що комплексоутворення порушує монотонність зміни сумарної концентрації легуючого елемента: при перерозподілі приповерхнева зона збагачується ним за рахунок більш віддалених шарів. Наявність "пасток" для атомів насичуючого елемента інтенсифікує процес насичення пластини і порушує параболічну залежність від часу кількості речовини, що дифундувала.

Крім того, сформульована і розв'язана задача про сублимацію легуючих елементів із сплаву з врахуванням одночасного розпаду і розчинення хімічних сполук, які є додатковими джерелами дифузантив. У випадку дифузії з джерелами також спостерігається відхилення від параболічної часової залежності кількості сублимованої речовини:

$$\Delta M(\tau) = 2(C_1^{\text{гр}} - C_{01})(1 + \nu_1 K_1 \tau / 3)(D_1 \tau / \pi)^{1/2} \quad (4)$$

Проведено порівняння і одержано задовільне співпадіння теоретичних і експериментальних даних про розподіл елементів в алюмінієвому сплаві В95 після вакуумного відпалу, що супроводжувався сублимацією атомів магнію з одночасним розпадом і розчиненням фази $MgZn_2$.

Досліджено кінетику насичення воднем з врахуванням його схильності сегрегувати в різноманітних мікрodefектах, утворюючи молекули метану. Приймалось, що дифузія водню здійснюється в тілі з точковими неоднорідностями структури, рівномірно розподіленими по об'єму матеріалу.

Вивчено особливості дифузійного перерозподілу вуглецю в сталях при водневому насиченні по границях зерен. Моделюється, що водень дифундує вздовж осі X із постійного джерела на повер-

нях плоского зразка товщиною $2l$ по розрізах (граничах зерен). Тут атомарний водень вступає в хімічний зв'язок з вуглецем, дифузійний підвід якого відбувається вздовж осі Y із об'єму зерна товщиною $2h$ ($h \ll l$), утворюючи при цьому метан. Для опису даного процесу запропоновано таку систему диференціальних рівнянь:

$$D_1 \frac{\partial^2 C_1(x, h, \tau)}{\partial x^2} = \frac{\partial C_1(x, h, \tau)}{\partial \tau} + a[C_1(x, h, \tau) - C_{01}] + b[C_1^*(x, h, \tau) - C_{01}^*]$$

$$\frac{\partial C_1^*(x, h, \tau)}{\partial \tau} = a[C_1(x, h, \tau) - C_{01}] + b[C_1^*(x, h, \tau) - C_{01}^*], \quad (5)$$

$$D_2 \frac{\partial^2 C_2(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{\partial C_2(x, y, \tau)}{\partial \tau}; \quad a = \nu_1 K_1, \quad b = \nu_2 K_2 + \nu_3 K_3.$$

Тут $C_1(x, h, \tau)$ - концентрація дифундуючого по границях зерна водню; D_1 - його коефіцієнт дифузії; $C_1^*(x, h, \tau)$ - концентрація водню, витраченого на утворення метану; $C_2(x, y, \tau)$ і D_2 - концентрація і коефіцієнт дифузії вуглецю. Умова масообміну на границях зерна дається у вигляді

$$C_2(x, y, \tau) = C_{02} - \nu_2 [C_1^*(x, y, \tau) - C_{01}^*] / \nu_1, \quad \text{при } y = \pm h. \quad (6)$$

Розв'язок відповідної крайової задачі дозволив виявити характерні особливості водневого насичення і дифузійного перерозподілу вуглецю при утворенні на границях зерен метану.

В четвертому розділі на основі запропонованого підходу досліджено деформування плоских тіл під дією різних фізико-хімічних факторів і проведено відповідні розрахунки залишкових напружень після дифузійного насичення.

Спочатку досліджено напружено-деформівний стан пружної пластини при двосторонньому її насиченні з врахуванням стрибкоподібною зміни фізико-механічних характеристик приповерхневих шарів, викликаною фазовим перетворенням. Вивчено вплив цих процесів на перерозподіл концентраційних напружень; показано, що вибором одночасно дифундуючих елементів можна регулювати рівень напружень в більш широкому діапазоні, ніж при однокомпонентному насиченні.

Виявлено особливості напружено-деформівного стану в'язкопружної пластини порівняно з пружною при двосторонньому насиченні. Здійснено розрахунок кінетики формування необоротних в'язких деформацій внаслідок релаксації. На рис.3 і 4 криві 1 -

компоненти тензора сумарної деформації, 2 - пружні, 3 - в'язкі складові деформації, пунктир - деформації в припущенні ідеальної пружності (дані на поверхні пластини).

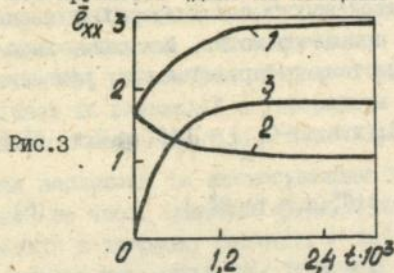


Рис.3

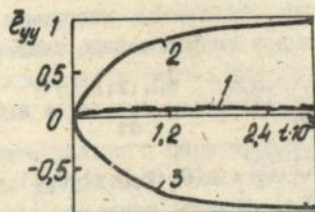


Рис.4

Нагромаджені матеріалом при підвищених температурах в'язкі деформації після охолодження виробу до кімнатної температури є залишковими. Вони суттєво впливають на рівень і характер розподілу діючих напружень. Як свідчать результати досліджень, в плоских тілах після дифузійного насичення залишкові напруження також залежать від нерівномірного розподілу елементів і, тим самим, неоднорідних теплових деформацій при охолодженні. В результаті розв'язку відповідної крайової задачі механіки одержано вирази залишкових напружень. Зокрема, у випадку однокомпонентного дифузійного насичення протягом часу τ^* для відмінних від нуля компонент тензора напружень маємо:

$$\sigma_{yy}^k(\rho, t^*) = \frac{1}{3} \beta^k \frac{G \rho}{G} \frac{E_k}{1-\nu_k} \sum_{j=1}^{\infty} A_j [(v - \beta' v + \beta' \lambda_j^2) \exp(-\lambda_j^2 t^*) - v \exp(-v t^*)] (v - \lambda_j^2)^{-1}; \quad \rho = x/l, \quad t^* = D\tau^*/l^2, \quad \beta' = \beta/\beta_k,$$

$$A_j = 2[\lambda_j^{-2} - \cos(\lambda_j \rho) \lambda_j^{-1} / \sin \lambda_j], \quad \lambda_j = (2j - 1)\pi/2, \quad (7)$$

$$v = \delta l^2/D, \quad \delta = (3Km + 4Gn)[(3K + 4G)mn]^{-1}.$$

Тут K і G - миттєві пружні модулі об'ємного стиску і зсуву; m і n - коефіцієнти, які характеризують релаксацію об'ємних і зсувних напружень відповідно. Величини з індексом "к" вказують на їх значення при кімнатній температурі. Встановлено, що коли під час дифузійного насичення в приповерхневих шарах ще існують напруження стиску ($\beta' = 1$; рис.5, крива 1; характер кривої в силу релаксації суттєво відрізняється від пружної моделі (пунктир)), то вже після охолодження до кімнатної температури внаслідок

нерівномірно нагромаджених необоротних деформацій утворюються доволі значні напруження розтягу (крива 2 при $\beta' = 0$; крива 3 при $\beta' = 0.5$). Більш тривале насичення сприяє росту розтягуючих напружень. Не виключено, що з перевищенням допустимого рівня вони викликають появу тріщин.

П'ятий розділ присвячений розв'язку аналогічних задач стосовно циліндричних тіл. Аналітично досліджено кінетику формування необоротних в'язких деформацій в циліндрі, спричинених дифузєю і релаксацією. Показано, що в результаті утворення в приповерхневих шарах необоротних в'язких деформацій істотно, особливо із збільшенням часу витримки, знижуються по абсолютній величині радіальні і тангенціальні компоненти тензора напруження.

Розрахунок в'язких деформацій використано при постановці і розв'язуванні задачі про залишкові напруження в циліндричних тілах після їх поверхневої обробки шляхом дифузійного насичення. Вважалось, що залишкові напруження також зумовлені нерівномірним концентраційним полем і, як наслідок, неоднорідними тепловими деформаціями при переході до кімнатної температури.

Показано, що релаксаційні явища при підвищених температурах стимулюють появу в приповерхневих шарах розтягуючих напружень, що було підтверджено експериментально на сталі 45 після титанування при температурі 1000°C тривалістю 5 год. (рис.6; крива 1 - теоретичні дані, крива 2 - експериментальні).

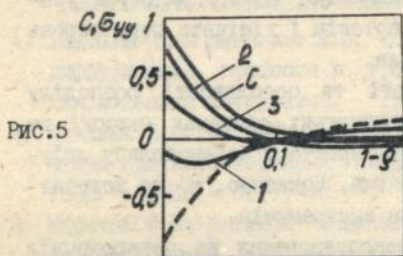


Рис. 5

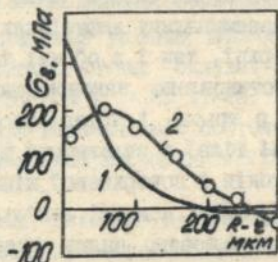


Рис. 6

На основі запропонованого у першому розділі підходу здійснено розрахунок залишкових напружень для двохшарового циліндра (зовнішній шар 2 - покриття з різко відмінними від матриці і фізико - механічними характеристиками) і показано, що при врахуванні в'язких ефектів зростає імовірність утворення в покритті

ті небажаних розтягувачих напружень.

Для оцінки стану матеріалу з покриттям з використанням критеріїв міцності одержано критеріальні залежності

$$\{1 - |\sigma_c| (1 - \nu) (E_2 \Delta d)^{-1}\} (k_1 - 1)^{-1} \leq h(\tau^*) \leq |\sigma_p| (1 - \nu) (E_2 \Delta d)^{-1}. \quad (8)$$

Тут σ_p , σ_c - міцнісні характеристики покриття; τ^* - тривалість нанесення покриття; величина Δd контролюється зміною питомого об'єму і в'язкими деформаціями. Нерівності (8) дають можливість визначати за рівнем залишкових напружень оптимальну товщину покриття $h(\tau^*)$ і, відповідно, рекомендувати більш ефективні режими його нанесення.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. В рамках механіки суцільного середовища з використанням підходів термодинаміки необоротних процесів розроблено математичну модель для опису фізико-механічної поведінки конструкційних матеріалів, яка враховує взаємозв'язок багатоконпонентної дифузії і хімічних перетворень, процесів деформування і релаксації.

2. На підставі уявлень про проміжковий шар узагальнено граничні умови масообміну багатоконпонентних реагуючих середовищ. Характерна особливість цих умов для тіл з покриттями - нерівність дифузійних потоків в зоні неідеального контакту. Сформульовано і розв'язано широке коло крайових задач дифузії для багатоконпонентних систем (тіла обмеженої конфігурації) з урахуванням взаємовпливу дифузійних потоків і хімічних перетворень як на поверхні, так і в об'ємі тіла.

3. Встановлено закономірності та особливості розподілу елементів в трьох- і чотирьохкомпонентних системах (плоскі та циліндричні тіла) в залежності від характеру взаємовпливу дифузійних потоків і поверхневої кінетики. Показано, що на концентраційних профілях можливі декілька екстремумів.

4. Констатовано вплив комплексоутворення на перерозподіл дифузантив: виникають зони збагачені та збіднені легкими елементами, інтенсифікується процес насичення, має місце відхилення від параболічної часової залежності кількості продифундованої речовини. Одержано задовільне співпадіння теоретичних і експериментальних даних про розподіл елементів в алюмінієвому спла-

ві В95 після вакуумного відпалу, що супроводжувався сублімацією атомів магнію з одночасним розпадом фази $MgZn_2$.

5. Досліджено кінетичні закономірності водневого насичення і зневуглекочовання сталей в залежності від їх структури.

6. Запропоновано аналітичний підхід для оцінки напружено-деформівного стану матеріалів після ХТО і методу розрахунку залишкових напружень, що ґрунтується на першочерговому детальному розгляді комплексної дії різних фізико-хімічних факторів на кінетику деформаційного процесу в умовах підвищених температур і переходу до нижчих.

7. Б'явлено особливості в'язкопружної поведінки твердих тіл в процесі дифузійного насичення і розроблено оригінальний спосіб розрахунку кінетики нагромадження необоротних деформацій. Показано, що релаксаційні явища при підвищених температурах стимулюють структурні зміни, а неоднорідні в'язка і теплові деформації - появу розтягуючих напружень в приповерхневих шарах, що було зафіксовано експериментально на сталі 45 після її титанування.

8. На основі розрахунку залишкових напружень в тілах з покриттями з істотно відмінними від матриці фізико-механічними характеристиками одержано критеріальні залежності, що дають можливість оцінювати оптимальну товщину останніх і, відповідно, рекомендувати більш ефективні режими хіміко-термічної обробки.

Основні публікації за матеріалами дисертаційної роботи.

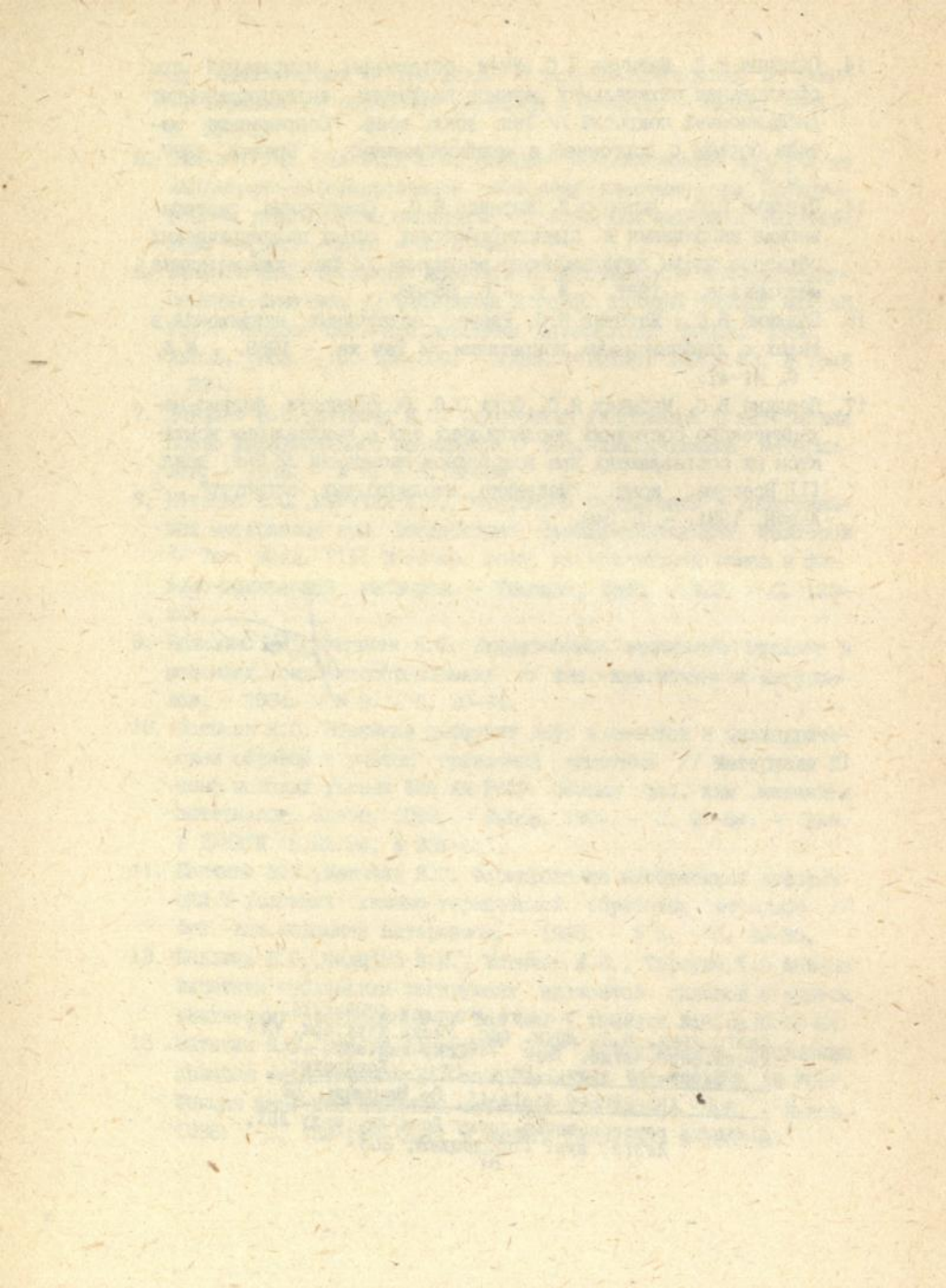
1. Павлина В.С., Матячак Я.С. Обобщенные условия массообмена и диффузионные процессы в трехкомпонентных сплавах // Физ.-хим. механика материалов. - 1979. - № 1. - С. 41-48.
2. Павлина В.С., Матячак Я.С. Физико-механическое состояние пластины при двухстороннем диффузионном насыщении // Там же. - 1980. - № 5. - С. 71-78.
3. Матячак Я.С. Влияние химической реакции на распределение диффундирующих элементов в цилиндрическом образце // Материалы IX конф. молодых ученых ФМИ АН УССР. Секция физ.-хим. механики материалов, Львов, 1979. - Львов, 1980. - С. 112-114. - (Деп. в ВИНТИ 27.10.80, № 4423-80).
4. Павлина В.С., Матячак Я.С. Диффузионное насыщение цилиндрического образца с учетом внутренней химической реакции меж-

- ду компонентами // Тез. докл. IV Всесоюз. науч. конф. по химико-термической обработке металлов и сплавов. - Минск, 1981. - С. 10-13.
5. Павлина В.С., Матычак Я.С. Влияние релаксационных явлений на напряженно-деформированное состояние пластины при двухстороннем диффузионном насыщении // Физ.-хим. механика материалов. - 1981. - № 6. - С. 87-92.
 6. Матычак Я.С. Процессы диффузии и деформации в четырехкомпонентных системах // Материалы X конф. молодых ученых ФМИ АН УССР. Секция физ.-хим. механики материалов, Львов, 1982. - Львов, 1983. - С. 106-109. - (Деп. в ВИНТИ 12.04.83, № 1948 - 83).
 7. Павлина В.С., Матычак Я.С. Остаточные напряжения в материалах после диффузионного насыщения // Физ.-хим. механика материалов. - 1983. - № 5. - С. 80-86.
 8. Павлина В.С., Матычак Я.С. Остаточные напряжения в упруговязких материалах при воздействии физико-химических факторов // Тез. докл. VIII Всесоюз. конф. по коллоидной химии и физико-химической механике. - Ташкент, 1983. - Ч.2. - С. 123-125.
 9. Павлина В.С., Матычак Я.С. Диффузионное насыщение сплавов в условиях комплексообразования // Физ.-хим. механика материалов. - 1984. - № 6. - С. 29-34.
 10. Матычак Я.С. Взаимная диффузия двух элементов в цилиндрическом образце с учетом граничной кинетики // Материалы XI конф. молодых ученых ФМИ АН УССР. Секция физ.-хим. механики материалов, Львов, 1983. - Львов, 1983. - С. 91-94. - (Деп. в ВИНТИ 16.02.84, № 931-84).
 11. Павлина В.С., Матычак Я.С. Формирование необратимых деформаций в условиях химико-термической обработки металлов // Физ.-хим. механика материалов. - 1985. - № 5. - С. 80-85.
 12. Павлина В.С., Федирко В.Н., Матычак Я.С., Тарлупа Т.С. Анализ кинетики сублимации легирующих элементов сплавов с учетом химических превращений // Там же. - 1985. - № 6. - С. 60-64.
 13. Матычак Я.С. Эффект "ловушек" при диффузионном насыщении сплавов // Материалы XII конф. молодых ученых ФМИ АН УССР. Секция физ.-хим. механики материалов, Львов, 1985. - Львов, 1986. - С. 132-136 (Деп. в ВИНТИ 18.04.86, № 2833-В).

14. Павлина В.С., Матычак Я.С. Учет остаточных напряжений при обосновании оптимальных режимов получения антикоррозионных диффузионных покрытий // Тез. докл. конф. "Современные методы борьбы с коррозией в машиностроении". - Ереван, 1987. - С. 39.
15. Павлина В.С., Лизун О.Я., Матычак Я.С. Остаточные растягивающие напряжения в приповерхностных слоях цилиндрических образцов после диффузионного насыщения // Физ.-хим. механика материалов. - 1987. - № 1. - С. 85-89.
16. Павлина В.С., Матычак Я.С. Расчет остаточных напряжений в телах с диффузионными покрытиями // Там же. - 1988. - № 5. - С. 41-47.
17. Павлина В.С., Матычак Я.С., Соха О.С. Особенности физико-механического состояния неоднородных тел с неидеальным контактом их составляющих при водородном насыщении // Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Механика неоднородных структур". - Львов, 1981. - С. 240.

Підп. до друку 9.01.93. Формат 60x84¹/16.
 Папір друк. № 2, Друк. офс. Умовн. друк. арк. 1,25
 Умовн. фарб.-відс. 7,25 Обл.-вид. арк. 1,17
 Тираж 100 прим. Вам. 21. Безплатно

ЛПІ 290646 Львів-13, Ст. Бандери, 12
 Дільниця ротарійного друку Дослідн. з-ду ЛПІ,
 Львів, вул. Городоцька, 286.



044177

AB 26.891

AB 26.891