

УДК 621.357.7:621.785:669.1.620.22-419.8

М.В. Лучка¹, М.В. Кіндрачук²

Захисні покриття з градієнтною текстурою на металах і сплавах

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України
вул. Кржижанівського, 3, 03142, Київ, Тел. (044) 444-20-55, E-mail uvarova@materials.kiev.ua
²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
просп. Перемоги, 37, 02056, Київ, Тел. (044) 441 19 64

На моделі композиційного покриття, в якому між наповнювачем (волоконном) і матрицею є перехідна зона, досліджено характер напруженого стану. Розраховано на механічні властивості, вигляд і структуру перехідної зони.

Ключові слова: дифузія композиція, покриття, волокно, матриця, перехідна зона, діаграма стану, структура, деформація, напруження.

Стаття поступила до редакції 17.10.2000; прийнята до друку 3.11.2000

Коректність вибору гетерогенної матричної чи скелетної структури не викликає сумнівів при створенні матеріалів тертя, які здатні задовольнити самі жорсткі вимоги до їх працездатності в екстремальних умовах. Найбільш вагому роль при цьому відіграє характер напружено-деформованого стану, який виникає в процесі контактування із спареною поверхнею композиційного матеріалу, що навантажений силами тертя ковзанням [1].

Є достатня кількість теоретичних і експериментальних робіт, які дають змогу судити про характер напружено-деформованого стану матричнонаповнених композиційних матеріалів для різних умов навантаження. Так, в [2], виходячи з ідеалізованих умов моделювання безперервно-армованим середовищем, утвореним випрямленими орієнтованими нормальними поверхні тертя циліндричними утвореннями, методом послідовної регуляції розраховані залежності концентрації напружень в композиції від співвідношення

в ній об'ємної долі компонентів і механічних властивостей матеріалів матриці і наповнювача. З аналізу цих властивостей [3,4] витікає те, що в умовах тертя потрібно переважно використовувати ті композиції, що містять як наповнювач високомодульні волокно подібні утворення.

Однією із найменш вивчених областей механіки руйнування композитів [5] є дослідження ролі поверхневої обробки волокно подібного наповнювача, яка може проводитися як до, так і в процесі чи після отримання композиційного матеріалу. Окрім цього, відомо, що при термомеханічній обробці чи в процесі високотемпературної експлуатації гетерогенних матеріалів протікають процеси, які мають тенденцію до встановлення рівноважного розподілу складових і схильні до таких структурних і фазових перетворень, які призводять до мінімізації енергетичних чи традиційно названих силових характеристик, таких як градієнти інтенсивних параметрів або

зв'язаних з ними величин. Тобто в композиційному матеріалі, який утворений поєднанням навіть всього двох однорідних і ізотропних компонентів, в результаті виникнення таких фізичних явищ, як рух (потік) енергії, маси, тепла, імпульсу, ентропії, електричного заряду, теж можуть мати місце суттєві зміни напружено-деформованого стану і властивостей композиції в цілому, за рахунок утворення перехідного стану (зони), але передбачити кількісно і якісно характер цих змін в загальному випадку не представляється можливим. Враховуючи, що будь-яке руйнування найбільш імовірно в самому слабкому місці, трудно надіятися на успішне вивчення його виникнення і розвитку, поки, у всякому разі, не будуть отримані відомості про природу і вплив самої перехідної зони.

Використовуючи методи, які розроблені в [5], розглянемо необмежене безперервно армоване середовище, яке утворене випростаними і однаково направленими циліндричними включеннями волокнами з рівними круговими і поперечними січеннями, решта простору між якими заповнена зв'язуючим середовищем-матрицею, яка має пружні характеристики, відмінні від волокон. Волокно, в свою чергу, складається з ізотропної і однорідної серцевини і одно- чи багат шарової перехідної зони.

На границях виділеного таким чином елементу композиційного простору "волокно - перехідна зона - матриця" задані осереднені компоненти тензора напружень загального виду. В пружній області постановки задачі загальний випадок теж можна розділити на окремі складові: поздовжнє зсування, поздовжній розтяг, плоску деформацію.

Задаючи число шарів, їх товщину і характеристики кожного із шарів, можна змоделювати практично будь-який закон зміни властивостей в перехідній зоні.

Вплив наявності і величини перехідної зони, закону зміни її механічних властивостей вивчали на прикладі композиційного середовища, яке має вказану структуру, перехідна зона якого утворена з довільної кількості елементарних

концентрично розташованих прошарків з фізико-хімічними і механічними властивостями, відмінними від таких у матриці і включення тільки в напрямку радіус - вектора R_f (рис.1). При цьому допускається двоякоперіодичне розміщення включень, що дає можливість спростити задачу і розглянути поведінку елементарного об'єму, який вміщує одне включення, в виду того, що суміжні з ним об'єми при цьому знаходяться в еквівалентному напруженому стані. Кожний i -й шар перехідної зони має свої механічні характеристики (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона) і свої розміри ($R_i - R_{i-1}$). В першому наближенні припускаємо, що елементарний об'єм має круговий поперечний переріз, радіус якого R_m .

Міняючи число елементарних шарів, їх товщину і механічні властивості, можна змоделювати практично будь-який закон зміни властивостей в перехідній зоні між включенням і матрицею. При довільній орієнтації включень відносно поверхні тертя трибоконтакту в елементарному об'ємі реалізується загальний випадок просторового напруженого стану, який при допущенні про пружний характер деформування можливо розділити на складові: зсування в площині, паралельній осі включення, - поздовжнє зсування; розтягнення вздовж осі включення - поздовжній розтяг (стик); розтяг - стискання в площині, перпендикулярній осі включення, - поперечне стиснення - розтяг з поперечним зсувом [6].

Така постановка задачі і методи її вирішення дозволяють визначити як поля локальних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}, \sigma_{12}, \sigma_{13}$) в кожному з компонентів елементарного об'єму (у включенні, матриці і перехідній зоні) при заданих середніх напруженнях ($\langle \sigma_1 \rangle, \langle \sigma_2 \rangle, \langle \sigma_3 \rangle, \langle \sigma_{23} \rangle, \langle \sigma_{12} \rangle, \langle \sigma_{13} \rangle$), так і всі незалежні сталі ($E_1, E_2=E_3, G_{12}=G_{13}, \nu_{23}, \nu_{21}=\nu_{31}$) такого трансверсально - ізотропного середовища в залежності від механічних характеристик і законів зміни властивостей в перехідній зоні.

В зв'язку з великим обсягом обчислень тут приводяться лише кінцеві вирази для полів локальних напруг при дії середніх

напружень, коли ефектами, які пов'язані із взаємодією останніх, можливо знехтувати [7]:

а) для включення:

$$\sigma_{12}^f = \frac{G_f / G_m}{q - \xi p} < \sigma_{12} >; \quad 0 \leq \rho \leq R_f; \quad (1)$$

$$\sigma_{13}^f = \frac{G_f - G_m}{q - \xi p} < \sigma_{13} >$$

б) для і-го шару перехідної зони:

$$\sigma_{12}^i = \frac{G_i / G_m}{q - \xi p} \left\{ \left[b^i - a^i \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \cos 2\vartheta \right] < \sigma_{122} > - a^i \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \sin 2\vartheta < \sigma_{13} > \right\}; \quad (2)$$

$$\sigma_{13}^i = \frac{G_i / G_m}{q - \xi p} \left\{ - a^i \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \sin 2\vartheta < \sigma_{13} > + \left[b^i + a^i \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \sin 2\vartheta \right] < \sigma_{13} > \right\};$$

$$R_{i-1} \leq \rho \leq R_i$$

в) для матриці:

$$\sigma_{12}^m = \frac{1}{q - \xi p} \left\{ \left[q - p \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \cos 2\vartheta \right] < \sigma_{12} > - p \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \sin 2\vartheta < \sigma_{13} > \right\}; \quad (3)$$

$$\sigma_{13}^m = \frac{1}{q - \xi p} \left\{ - p \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \sin 2\vartheta < \sigma_{12} > + \left[q + p \left(\frac{R_f}{\rho} \right)^2 \cos 2\vartheta \right] < \sigma_{13} > \right\};$$

$$R_n \leq \rho \leq R_m$$

Тут ρ і ν - полярні координати точки, а решта коефіцієнтів визначається із співвідношень:

$$a^{i+1} = \frac{1}{2} \left[\alpha_1^i a^i + \alpha_2^i b^i \left(\frac{R_i}{R_f} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$b^{i+1} = \frac{1}{2} \left[\alpha_1^i b^i + \alpha_2^i a^i \left(\frac{R_f}{R_i} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$p = \frac{1}{2} \left[\alpha_1^n a^n + \alpha_2^n b^n \left(\frac{R_n}{R_f} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$q = \frac{1}{2} \left[\alpha_1^n b^n + \alpha_2^n a^n \left(\frac{R_f}{R_n} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$a^f = \frac{1}{2} \alpha_2^f; \quad b^f = \frac{1}{2} \alpha_1^f; \quad (8)$$

$$\alpha_1^f = 1 + G_f / G_1; \quad \alpha_1^i = 1 + G_i / G_{i+1};$$

$$\alpha_1^n = 1 + G_n / G_m; \quad (9)$$

$$\alpha_2^f = 1 - G_f / G_1; \quad \alpha_2^i = 1 - G_i / G_{i+1};$$

$$\alpha_2^n = 1 - G_n / G_m; \quad (10)$$

Вираз для модуля поздовжнього зсуву трансверсально - ізотропного середовища отримано в вигляді:

$$G_{12} = G_{13} = G_m \frac{q - \xi p}{q + \xi p}. \quad (11)$$

враховують як товщину перехідної зони, так і як закон зміни в ній механічних властивостей.

Рішення задачі з поздовжнім розтягом - стисненням дає можливість отримати вирази для E_1 , ν_{12} полів локальних напружень:

$$\sigma_1^f = E_f < \sigma_1 > / E_1; \quad \sigma_1^i = E_i < \sigma_1 > / E_1$$

$$\sigma_1^m = E_m < \sigma_1 > / E_1$$

при дії середніх напружень $\langle \sigma_1 \rangle$, а також для полів напружень $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}$, які виникають внаслідок відмінностей коефіцієнтів Пуассона включення і матриці.

Вирішення задачі про поперечний розтяг-стиск дозволяє визначити решту незалежних сталей E_2, E_3, ν_{12} і відповідні поля локальних напружень при дії середніх напружень $\langle \sigma_2 \rangle, \langle \sigma_3 \rangle, \langle \sigma_{23} \rangle$.

Слід зауважити, що при відсутності перехідної зони дані рішення співпадають з одержаними раніше [8].

Існує стійка думка про те, що результат

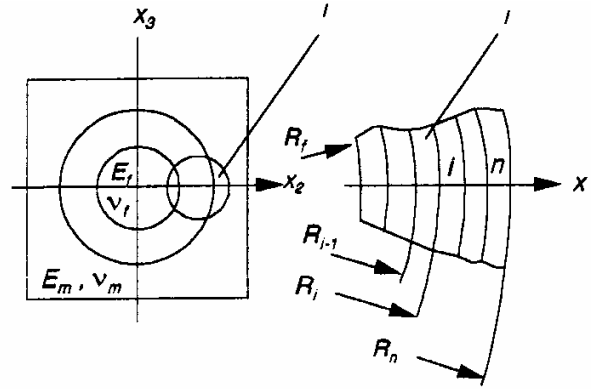


Рис. 1. Схема поперечного сечення елементарного об'єму композиційного середовища.

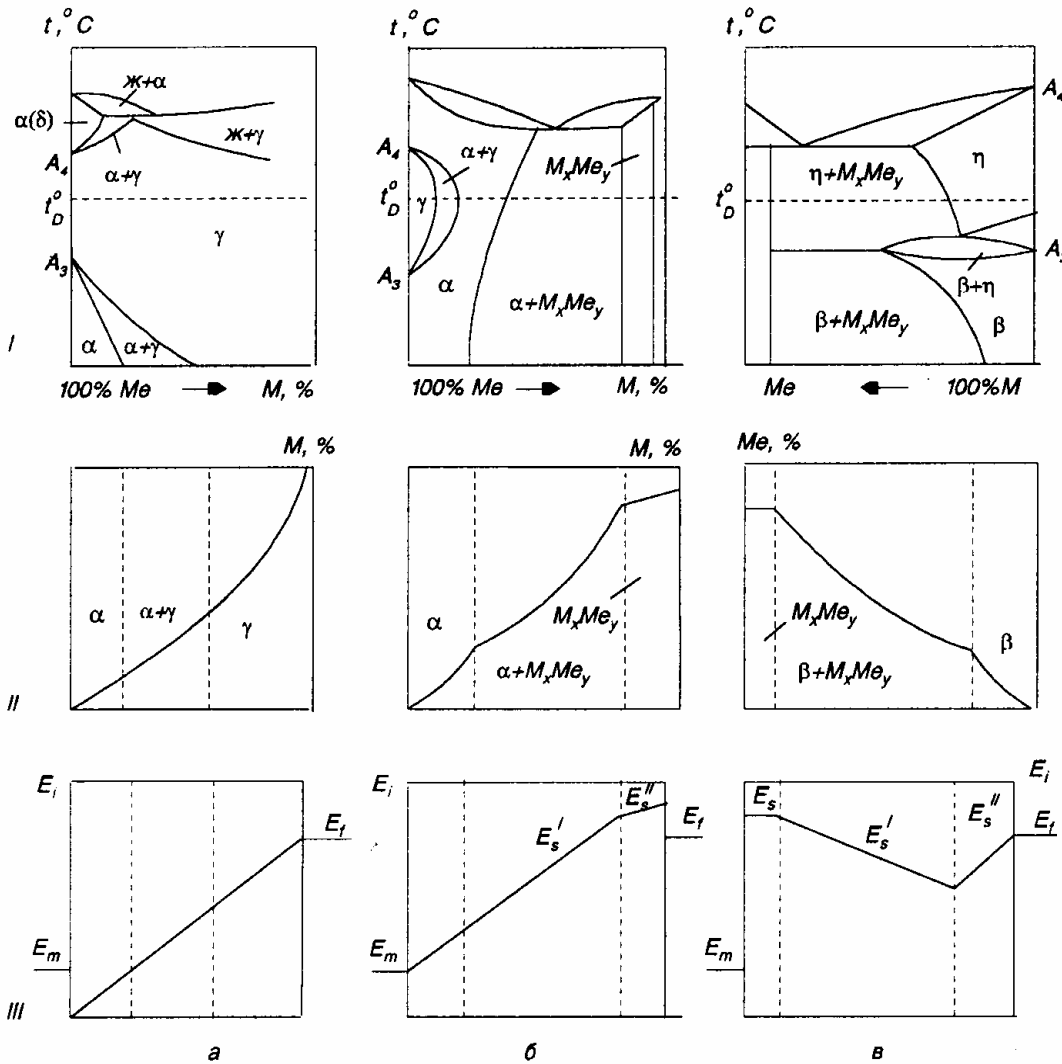


Рис. 2. Фрагменти діаграми стану "метал - дифундуючий елемент" (I), що має область поліморфного перетворення на ізотермі дифузії, яка із збільшенням концентрації дифузанта розширюється (а), замикається (б) чи неявно виражена (в) і схематичне зображення: будови (II), глибини (III) і рівня механічних характеристик (IV) дифузійної зони.

Умовні позначення: t°, t°_x - температура процесу і ізотерма дифузії; A_1, A_4 - критичні точки початку і завершення фазових перетворень; Me, M - дифундуючий елемент і метал основи; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, (M, Me)$ - фаза, що утворилась; E_m, E_f, E_s - модулі пружності окремих фаз в матриці (m), включенні (f) і дифузійній зоні (s), відповідно.

утворення перехідного шару при дифузійній взаємодії можна прогнозувати, використовуючи рівноважні діаграми стану металів і сплавів [9]. При цьому виходять із положення, яке стало правилом, що формування дифузійного шару на ізотермі слідує за підвищенням концентрації дифундуючого елемента в системі сплавів і що сам процес росту перехідної зони при цьому підпорядковується законам фазових перетворень. В цьому випадку в дифузійному шарі повинні виникати

спочатку фази нижчого складу, потім - середнього і, нарешті вищого (згідно теорії атомної дифузії). Відповідно до іншої точки зору (теорії реакційної дифузії), формування дифузійного шару може починатися з утворення фаз вищого складу або середнього, минаючи стадію утворення фази нижчого складу, якщо термодинамічні умови для цього більш сприятливі. Проте знання фазових перетворень в металах і сплавах та відповідних діаграмах стану досліджуваних систем в будь-якому

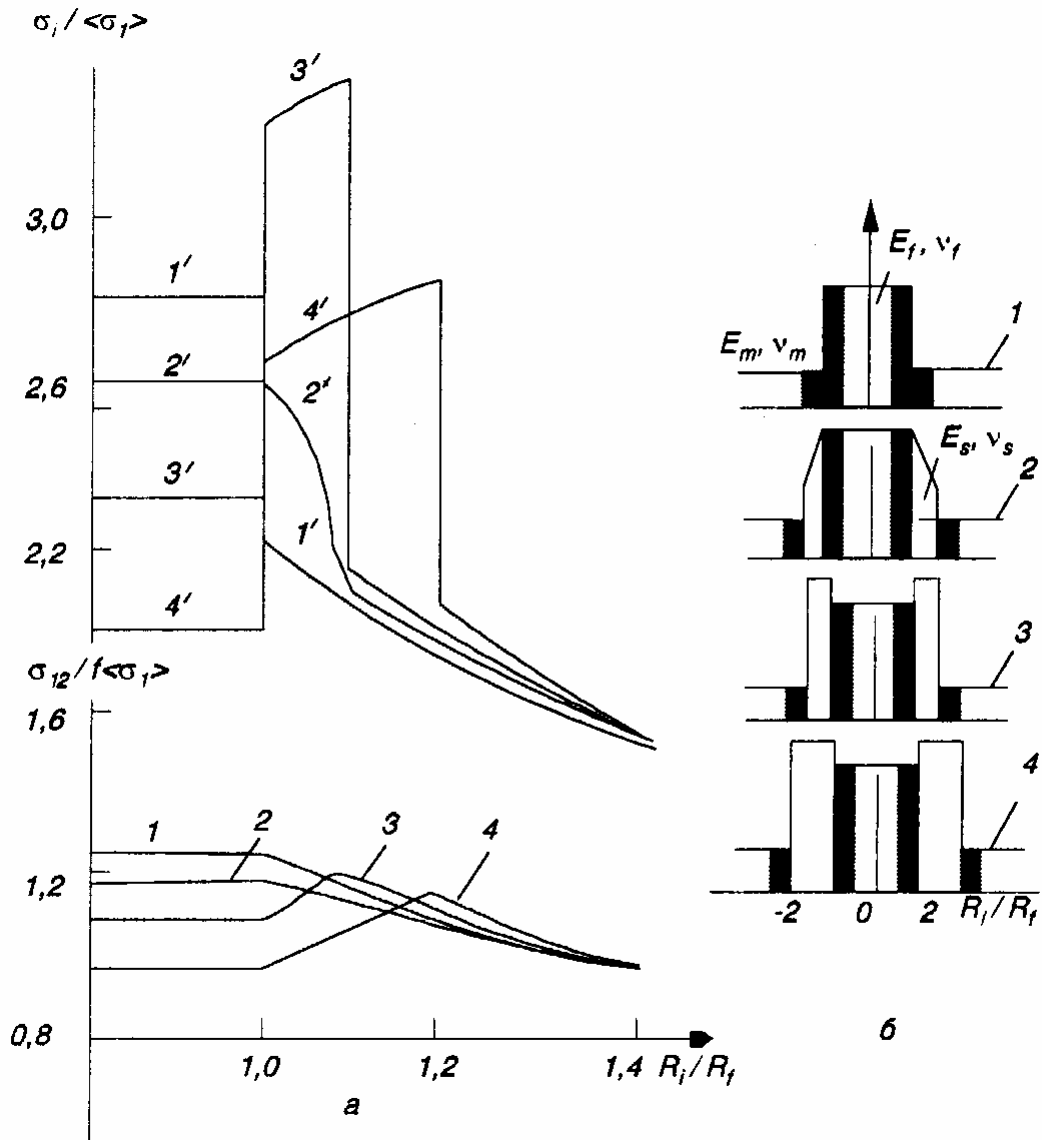


Рис. 3. Зміна локальних відносних інтенсивностей напружень $\sigma_i / \langle \sigma_1 \rangle$ та $\sigma_{12} / \langle \sigma_1 \rangle$ в перехідній зоні по мірі віддалення від поверхні включення в глибину матриці (а) в залежності від навантаження силами поперечного стиску і характеру зміни в перерізі елементарного об'єму механічних властивостей E_i, ν_i (б):

- 1 - перехідна зона відсутня; 2 - модуль пружності в перехідній зоні змінюється лінійно; 3 - механічні властивості міняються скачкоподібно; 4 - перехідна зона значно ширше попередньої. 1' - 4' - такі ж, як і для випадку навантаження силами тєртя.

випадку дає ключ для розуміння, яка із конкретних фаз може утворитися в перехідній зоні, передбачити послідовність виникнення тієї чи іншої фази в перехідній зоні, а також її якісний склад.

Так, в процесі ізотермічної дифузії між двома простими речовинами має місце утворення однофазних шарів, склад яких відповідає складу всіх однофазних областей діаграми стану, які перетинаються утворення дифузійних зон між взаємодіючими компонентами композиційних матеріалів. їх формування ініціюється поліморфними перетвореннями, наприклад, аустеніту в ферит (γ в α -фазу) в процесі дифузійного легування будь-якими елементами залізовуглецевих сплавів, що на практиці найбільш широко використовується, а сам процес ХТО - достатньо вивчений. При цьому слід відрізнити три основні типи насичуючих елементів: нікель, марганець (рис.2, а (I)), дифундуючі елементи, які розширюють межі існування γ -області на ізотермічному процесі дифузійного легування сталі; алюміній, хром, ванадій, титан (рис.2, б (I)) які замикають γ -область заліза; ніобій, тантал, цирконій (рис.2, в (I)), які утворюють неявно виражену γ або ($\gamma+\alpha$)-області. Будову і фазовий склад перехідної дифузійно легуваної зони, яка утворюється в кожному з наведених різновидностей рівноважних діаграм стану, схематично зображено на рис.2, а - в (II). У відповідності з діаграмою стану вибраної системи, розподіл в перехідній зоні дифундуючих елементів при утворенні відповідних твердих розчинів чи окремих сполук (фаз постійного чи перемінного складу) для кожного із розглянутих випадків можна графічно показати у вигляді рис.2, а - в (III).

В сучасному матеріалознавстві ще нема загальних закономірностей, які пов'язують уявлення про фазові рівноваги з фізичними і механічними властивостями сплавів, але наявний досвід показує, що в металевих системах, які мають подібні рівноважні діаграми, виявляється схожість в структурі і властивостях, і саме напрям зміни властивостей при цьому може бути

ізотермою, що відповідає температурі процесу дифузійної взаємодії. При цьому кожний шар розміщується в зоні взаємодії в тій послідовності, що і відповідні їм однофазні області на діаграмі стану.

В термооброблених композиціях, коли найбільш імовірна реалізація вакансійного механізму переміщення атомів, в переважній більшості випадків має місце

визначено з відповідних діаграм стану, очевидно, навіть з метастабільних.

Тому, припустивши, що міцності властивості твердих розчинів лінійно понижуються із відповідним зменшенням концентрації дифундуючого елемента (рис.2, а (IV)) або що вони значно перевищують властивості матеріалу матриці чи наповнювача, практично не змінюючись в межах утвореної нової фази (рис.2 б, в (IV)), а в межах перехідної зони змінюється за певним законом, можна змодельовати практично будь-який напружено-деформований стан композиційного матеріалу навантаженого силами тертя, в якому окрім матриці і наповнювача є ще перехідна зона з наперед заданим законом зміни в ній механічних властивостей (рис.3).

Як приклад тут розглянуто вплив закону зміни механічних властивостей в перехідній зоні (рис.3, а) на напружений стан в компонентах елементарного об'єму, при заданих середніх напруженнях поздовжнього зсуву $\langle\sigma_{12}\rangle$, поздовжнього стиснення $\langle\sigma_1\rangle$, що відповідає випадку навантаження силами тертя матеріалу з включеннями (волокнами), які розташовані нормально до поверхні тертя. На цьому малюнку також представлені залежності відносної інтенсивності напружень $\sigma_i/\langle\sigma_1\rangle$ ($\langle\sigma_{12}\rangle/f < \sigma_1 >$ при $f=1$) в точці на осі x_2 від характеру зміни механічних властивостей в перехідній зоні, відносна зміна величини яких приведена на рис. 3, б. Нумерація кожної із схем відповідає розглянутому випадку поздовжнього стискання із зсувом: залежності, які відмічені знаком "штрих", ілюструють (для порівняння) аналогічні залежності для випадку дії лише середніх напружень поздовжнього зсуву $\langle\sigma_{12}\rangle$. Всі схеми побудовані тільки для випадку, коли

величина модуля пружності включення значно перевершує модуль пружності для матриці: $E_f/E_m=5-6$.

З наведеного видно, що закон зміни локальних полів напружень суттєво міняється в залежності від закону зміни властивостей в перехідній зоні. Так, при наявності в перехідній зоні лише однієї фази, модуль пружності якої не змінюється по її товщині, а його величина значно перевершує модуль включення, напруження в останньому значно зменшуються. Проте, така заново утворена фаза стає місцем найбільшої концентрації локальних напружень в структурі композиції, а максимум розподілу напружень зсувається на межу з матрицею (крива 3). По мірі росту товщини фази, що утворилася при

дифузійній взаємодії компонентів, концентрація напружень досить швидко зменшується (крива 4). При відсутності перехідної зони як такої концентрація напружень в волокні максимальна, а в матриці вони концентруються поблизу границі розділу (криві 1 і 1¹). При наявності перехідної зони в вигляді твердого розчину одного із компонентів, який характеризується плавною зміною (лінійною) в такій перехідній зоні міцностних властивостей, концентрація напружень у волокні (наповнювачі) зменшується і вони найбільш плавно переходять в матрицю, вирівнюючись з властивостями останньої (крива 2 і 2¹).

- [1] Л.В. Заболотний. Распределение напряжений в антифрикционных материалах // *Порошковая металлургия.* - **11.** - С. 54-59 (1979).
- [2] А.В. Ковалевский, В.И. Тихонович Моделирование напряженно-деформированного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения // *Пробл. трения и изнашивания.* - Киев: Техніка, - Вып. **30.** - С. 85-87 (1986).
- [3] Г.А. Ванин *Микромеханика композиционных материалов.* Киев: Наук. думка, 302 с (1985).
- [4] М.В. Киндрачук, Ю.Я. Душек, М.В. Лучка. Локальный характер напряженно-деформированного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения // *Порошковая металлургия.* - **9/10.** - С. 56-57 (1994).
- [5] Эволюция структуры и свойств эвтектических покрытий при трении / М.В.Киндрачук, Ю.Я.Душек, М.В.Лучка, А.Н.Гладченко // *Порошковая металлургия.* - **5/6.** - С. 104-110 (1995).
- [6] Г.А. Ванин Новый метод учета взаимодействия в теории композиционных систем // *Докл. АН УССР, Сер. А.* - N 4. - С. 321-324 (1976).
- [7] Б.У Розен., Н.Ф. Дау *Механика разрушения волоконных композитов.* - М.: Мир. - **Ч. 1.** - С. 300-366 (1976.).
- [8] М.В. Лучка, Ю.Я. Душек, М.В. Киндрачук, Н.А. Уськова. Роль строения и свойств переходной зоны "матрица-наполнитель" в напряженном состоянии композиционных материалов триботехнического назначения // *Порошковая металлургия.* - **3/4.** - С. 86-93 (1998).
- [9] П.И. Мельник *Технология диффузионных покрытий.* - Киев: Техніка. - 150 с. (1978).

¹M.V.Luchka, ²M.V.Kindrachuk

Protective coating with a gradient texture on metals and alloys

¹*I.M.Francevich Institute of Materials Problems NAS Ukraine
Kryzhanivskij str., 3, 03142, Kyiv, tel.: (044) 444-20-55, E-mail uvarova@materials.kiev.ua*

²*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnical Institute"
Peremogy av., 37, 02056, Kyiv, tel.: (044) 441 19 64*

The distribution of the local stresses in composite coatings loaded by friction forces with transient zone in structure, which has different properties between matrix and each inclusion is studied. The stresses in elementary volume of composite for certain load are dependent on zone properties distributions. The redistributions of stress concentrations in matrix, inclusions and transient zone can be predicted on the base for metals and alloys equilibrium state diagrams taking into account composition and mechanical properties of transient zone.