

УДК 621.891(14)

М.В. Кіндрачук, д-р техн. наук
С.В. Федорчук
Джамаль Ібрагім Мансур (Ірак)
В.М. Бураченко

ФОРМУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕРМІЧНИХ ПОЛІВ У КОМПОЗИЦІЙНОМУ МАТЕРІАЛІ ПРИ ТЕРТІ

НАУ, кафедра машинознавства
E-mail: m_kindrachuk@ukr.net

Досліджено вплив температурного фактора на напружений стан, який виникає при терті в поверхневих шарах матеріалу. Напружено-деформований стан розглянуто на моделі композиційного матеріалу з неперервними високомодульними волокнами. Методами математичного моделювання досліджено вплив структурних параметрів композита на конфігурацію нестационарних полів температур і напружень на поверхні тертя.

Influence of temperature on the stressed-strained state which arises as results of friction in surface layers are described. The stressed-strained state is considered on the composite material model with continuous high-module fibres. By the methods of mathematical modelling influence of structural parameters of composite on configuration of the unstationary fields of temperatures and tensions on the surface of friction was explored.

Сутність проблеми та її зв'язок з практичними задачами

Прогресивний напрям триботехнічного матеріалознавства – розробка композицій на металевій основі, зміцнених тугоплавкими високоміцними волокнами або пластинами [1].

Такі матеріали можуть працювати в широкому діапазоні температур [2].

Аналіз антифрикційних властивостей виявив важливу роль розміру включень наповнювача та його об'ємного вмісту [3]. На зносостійкість гетерогенних матеріалів суттєво впливає напружений стан, що виникає під час контактування поверхонь при терті [4].

Проблема використання цих композитів пов'язана з тим, що внаслідок різних значень фізико-механічних характеристик, таких, як теплоємність, теплопровідність, коефіцієнтів теплового розширення, на межі між матрицею та включеннями, а також у перехідній зоні між покриттям та основою виникають великі напруження.

Відомі експериментальні та теоретичні дані [5] не дають змоги робити висновок про розподіл напружень у композиційному матеріалі за реальних умов тертя, зокрема, з урахуванням температурного режиму елементів пари тертя.

Унаслідок суттєвої різниці в коефіцієнтах теплопровідності та питомої теплоємності матеріалів матриці та включень (карбіди, бориди, силіциди, нітриди та ін.) миттєві температури в різних точках композита можуть значно відрізнятись. Ці перепади температур можуть викликати руйнування композита, структурні та фазові перетворення, накопичення значних пошкоджень.

Проте вдалий підбір співвідношення складових може сприяти зменшенню цих напружень, підвищенню працездатності деталей та конструкції в цілому. Важливим є також визначення точок із максимальними перепадами температур і напружень та впливу на них внутрішніх і зовнішніх факторів.

Мета роботи – аналітичне дослідження впливу природи твердих включень, їх розміру і об'ємного вмісту на напружено-деформований стан, що виникає під час тертя в приповерхневих шарах композиційного матеріалу з урахуванням температурного фактора, та на формування нестационарних термічних полів і напружень у композиційному матеріалі при терті.

Напружено-деформований стан

Фізико-механічні властивості металеві матриці на основі нікелю зі зміцнювальними фазами дибориду титану TiB_2 , дибориду хрому CrB_2 і карбіду кремнію SiC наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості компонентів композиції

Матеріал	Модуль, МПа		Густина ρ , кг/м ³	Коефіцієнт Пуассона
	пружності E,	зсуву G,		
Ni	$1,86 \cdot 10^5$	$0,72 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^3$	0,3
Ti B ₂	$5,1 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^3$	0,1
CrB ₂	$2,2 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^3$	0,1
SiC	$3,86 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^3$	0,1

Матеріал композиції модельований безперервно-армованими перпендикулярно до поверхні тертя циліндричними волокнами з однаковими поперечними перерізами.

Простір між волокнами заповнений сполучним середовищем – матрицею, пружні характеристики якої відрізняються від відповідних характеристик волокон (рис. 1, а). Для врахування ефекту взаємодії між включеннями, досить суттєвого при високому об'ємному вмісті наповнювача, допускається, що включення розташовані згідно зі схемою (рис. 1, б) у вузлах тетрагональних ґрат.

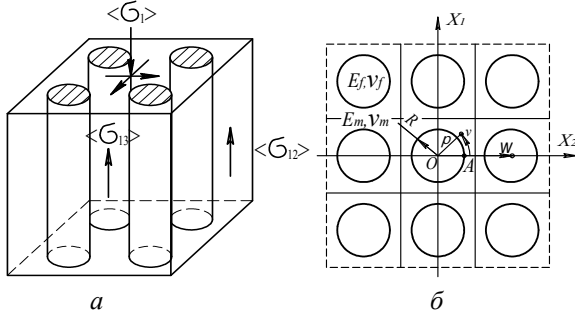


Рис. 1. Модель матеріалу:

а – схема навантаження; б – структурна модель

На гетерогенний матеріал діють сили нормального стиснення, які викликають у ньому стан поздовжнього стиснення $\langle \sigma_1 \rangle$, і сили тертя, що викликають стан поздовжнього зсуву $\langle \sigma_{12} \rangle$, $\langle \sigma_{13} \rangle$ (рис. 1, а). У пружній області ці стани розділяються, що дає змогу вирішувати два самостійні завдання. Оскільки контактне завдання в такій постановці не розглядалося, то локальні поля напружень у компонентах визначалися на деякій відстані від поверхні, де крайові ефекти загасають. Для напруженого стану лінійно-армованого середовища, що знаходиться в умовах чистого зсуву при дії середніх поздовжніх дотичних напружень $\langle \sigma_{12} \rangle$ і $\langle \sigma_{13} \rangle$, поставлена задача зводиться до визначення двох розділних функцій $\varphi_m(z)$ і $\varphi_f(z)$ у матриці і включенні відповідно. Ці функції зв'язані з поздовжніми переміщеннями U_1 і дотичними напруженнями σ_{12} , σ_{13} такими співвідношеннями [6]:

$$\begin{aligned} U_1 &= \varphi(z) + \varphi(z); \\ \sigma_{12} - i\sigma_{13} &= 2G\varphi'(z); \\ \sigma_{13} &= G[\varphi'(z)e^{i\nu} + \varphi'(z)e^{-i\nu}], \end{aligned} \quad (1)$$

де G – модуль зсуву (у співвідношеннях, справедливих для матриці та включень, індекси опускаються).

Досконалий контакт на межі включення з матрицею досягається за умови

$$\begin{aligned} \sigma_{1r}^+(\tau) &= \sigma_{1r}^-(\tau); \\ U_1^+(\tau) &= U_1^-(\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

де τ – координата точки на межі; знаками “+” і “-” позначено області справа та зліва від межі контакту відповідно.

Ці умови контакту зводяться до співвідношення $(1+G_f/G_m)\varphi_f(\tau) + (1-G_f/G_m)\varphi_f(\tau) = 2\varphi_m(\tau)$. (3)

Для замкнення системи рівнянь необхідно задати середні напруження $\langle \sigma_{12} \rangle$, $\langle \sigma_{13} \rangle$ або середні кути зсуву $\langle \gamma_{12} \rangle$, $\langle \gamma_{13} \rangle$, які для тетрагональної структури зв'язані співвідношеннями:

$$\langle \gamma_{12} \rangle = \langle \sigma_{12} \rangle / \langle G_{12} \rangle; \quad \langle \gamma_{13} \rangle = \langle \sigma_{13} \rangle / \langle G_{13} \rangle, \quad (4)$$

де G_{12} – модуль поздовжнього зсуву матеріалу.

Задачу розв'язували методом послідовної регуляризації [7]. З урахуванням співвідношень (1)–(4), опускаючи громіздкі викладки, наведемо вираз для розподілу полів зсувних напружень при дії середніх напружень $\langle \sigma_{12} \rangle$ ($\langle \sigma_{13} \rangle = 0$) у будь-якій точці матриці:

$$\begin{aligned} \sigma_{12} &= \frac{1+G_f/G_m}{\eta+(1+\xi)G_f/G_m} \left\{ \left(1-S \frac{1}{\rho^2} \cos 2\nu \right) + 4S \frac{\xi^2}{\pi^2} \left[3(-\rho^2 \cos \nu + \right. \right. \\ &\left. \left. + S \frac{1}{\rho^4} \cos 4\nu) \right] + 7 \frac{\xi^2}{\pi^2} \left(-\rho^6 \cos 6\nu + S \frac{1}{\rho^8} \cos 4\nu \right) \right\} \langle \sigma_{12} \rangle; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1r} &= \frac{1+G_f/G_m}{\eta+(1+\xi)G_f/G_m} \left\{ \left(1-S \frac{1}{\rho^2} \right) \cos 2\nu + 4S \frac{\xi^2}{\pi^2} \left[3(-\rho^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + S \frac{1}{\rho^4} \right) \cos 3\nu + 7 \frac{\xi^2}{\pi^2} \left(-\rho^6 + S \frac{1}{\rho^8} \right) \cos 7\nu \right] \right\} \langle \sigma_{12} \rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

$$S = \frac{1-G_f/G_m}{1+G_f/G_m},$$

де η , ξ – об'ємний вміст матриці і наповнювача відповідно; G_m , G_f – модулі зсуву матриці й включення; ρ і ν – координати точки в матриці. Вирази (5) ураховують ефект взаємодії волокон і справедливі при достатньо високому об'ємному вмісті наповнювача.

Аналіз формули (4) показує, що концентрація зсувних напружень максимальна в точці міжфазної межі з координатами $\rho=1$; $\nu=0$; π – відстань між включеннями мінімальна (рис. 1, а, точка А), тоді максимальний коефіцієнт концентрації зсувних напружень

$$\begin{aligned} K_{1r} &= \frac{\sigma_{1r}}{\langle \sigma_{12} \rangle} = \frac{2G_f/G_m}{\eta+(1+\xi)G_f/G_m} \times \\ &\times \left[1 + 4S \frac{\xi^2}{\pi^2} \left(3 + 7 \frac{\xi^2}{\pi^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Вираз (6) ураховує як механічні характеристики компонентів, так і їх об'ємний вміст.

Стан середовища при поздовжньому розтягненні–стисненні подано у вигляді двох простіших:

– стану розтягнення–стиснення без урахування взаємодії між компонентами при дії невідомих постійних напружень за припущення, що площина $x_1 = \text{const}$ не викривляється в процесі деформування;

– плоского деформованого стану для заданих зміщень на міжфазних межах за відсутності поздовжніх деформацій.

Зміщення задаються такими, щоб різниця поперечних зміщень матриці та наповнювача забезпечувала неперервність сумарних зміщень для обох станів на поверхні контакту фаз.

Розв'язуючи задачу на розтягнення–стиснення невзаємодіючих компонентів, визначають напруження в наповнювачі та матриці відповідно:

$$\sigma_1 = E_f/E_1 <\sigma_1>;$$

$$\sigma_1 = E_m/E_1 <\sigma_1>;$$

$$E_1 = \xi E_f + \eta E_m + \frac{8G_m \eta (v_f - v_m)^2}{2 - \xi + (\chi_f - 1)G_m / G_f};$$

$$\chi = 3 - 4\nu,$$

де E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона.

При поздовжньому стисненні композиційного матеріалу внаслідок різниці коефіцієнтів Пуассона ν_f і ν_m включення і матриці реалізується плоский деформований стан.

Напруження в компонентах визначаються через дві роздільні функції $\phi(z)$ та $\psi(z)$:

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 2[\phi(z) + \psi(z)];$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 + 2i\sigma_{23} = 2[z\phi'(z) + \psi(z)];$$

$$(\sigma_r - i\sigma_{rv}) = \phi(z) + \psi(z) - 2e^{2iv} [z\phi'(z) + \psi(z)].$$

Розв'язання задачі про плоску деформацію описаними методами дає змогу отримати в уточненому вигляді вирази для полів напружень у матриці:

$$\sigma_r = Q \left\{ \left(\frac{1}{\rho^2} - \xi \right) + 9 \left[T \frac{1}{\rho^4} \left(6 - 5 \frac{1}{\rho^2} \right) + \rho^2 \right] \cos 4\nu \frac{\xi^2}{\pi^2} \right\} <\sigma_1>,$$

$$Q = \frac{1}{E} \frac{4G(v_m - v_f)}{2 - \xi + \chi_m \xi + \eta G_m / G_f (\chi_f - 1)};$$

$$T = \frac{1 - G_m / G_f}{\chi_m + G_m / G_f}.$$

Напруження в матриці при дії середніх напружень поздовжнього стиснення будуть максимальними в точках міжфазної межі, де зближення включень максимальне.

Найбільший коефіцієнт концентрації напружень становитиме:

$$Kr = \frac{\sigma_r}{<\sigma_1>} = Q \left\{ 1 - \xi + 3 \frac{\chi_m + 1}{\chi_m + G_m / G_f} \left(3 + 10 \frac{\xi^2}{\pi^2} \right) \frac{\xi^2}{\pi^2} \right\}.$$

Отже, отримані аналітичні вирази для локальних полів напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}, \sigma_{12}, \sigma_{13}$, що діють у матриці залежно від механічних характеристик компонентів і структури композиційного матеріалу.

На рис. 2, а показано характерні залежності максимальної концентрації зсувних напружень K_{1r} від об'ємного вмісту включень при температурі 20, 300, 450 °С.

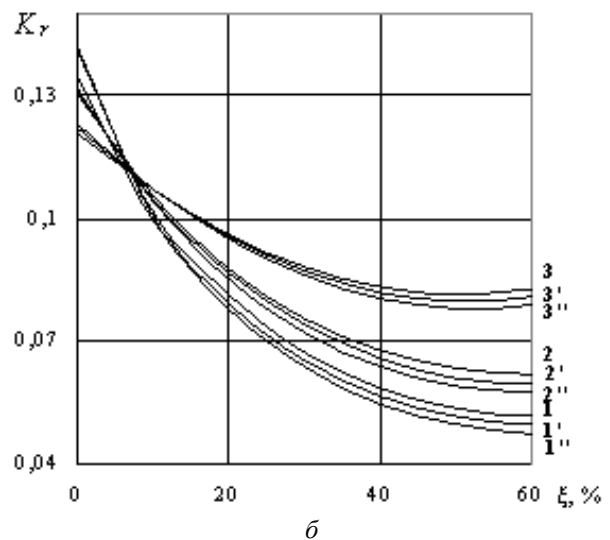
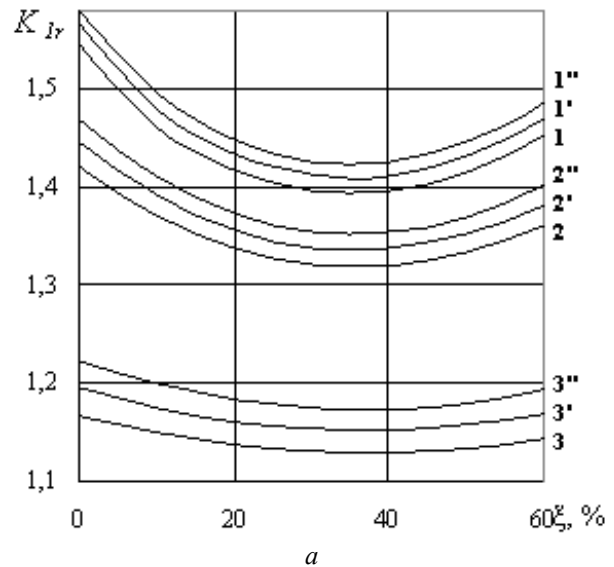


Рис. 2. Залежність концентрації напружень поздовжнього зсуву (а) та поперечного розтягнення (б) від об'ємного вмісту TiB_2 (1), SiC (2), SiB_2 (3): 1, 2, 3 – 20 °С; 1', 2', 3' – 300 °С; 1'', 2'', 3'' – 450 °С

Визначені напруження $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_{23}$, що виникають унаслідок різниці коефіцієнтів Пуассона, досить малі. Концентрація зсувних напружень максимальна на межі контакту компонентів композиційного матеріалу в місцях, де відстань між включеннями мінімальна. Початкове зниження інтенсивності дотичних напружень пов'язано зі збільшенням частки навантаження, що передається на включення. Наступне (якщо включень понад 40%) підвищення інтенсивності напружень зумовлено взаємодією кожного включення з прилеглим.

Відстань між центрами включень визначають за формулою [8]:

$$\varpi = \sqrt{\pi/\xi}. \quad (7)$$

У матеріалі, який містить 40% зміцнювальної фази, $\omega=2,8R$ (R – радіус включення).

У композиційних матеріалах, в яких механічні характеристики наповнювача і матриці близькі, наприклад, для системи Ni-CrB₂ (рис. 2, а), концентрація напружень знижується при збереженні характеру її зміни від вмісту фази зміцнення.

Наведені результати свідчать про те, що існує такий об'ємний вміст включень ($\approx 40\%$), за якого фіксується мінімум інтенсивності локальних дотичних напружень у матриці.

Випробування на тертя та зношування проводили на машині торцевого тертя при навантаженні 1 МПа, швидкості ковзання 0,1 м/с. Контртіло – сплав ЖС6К. Зразки для випробувань попередньо оплавливали променем лазера для отримання стовпчастої структури. Результати триботехнічних досліджень показано на рис. 3.

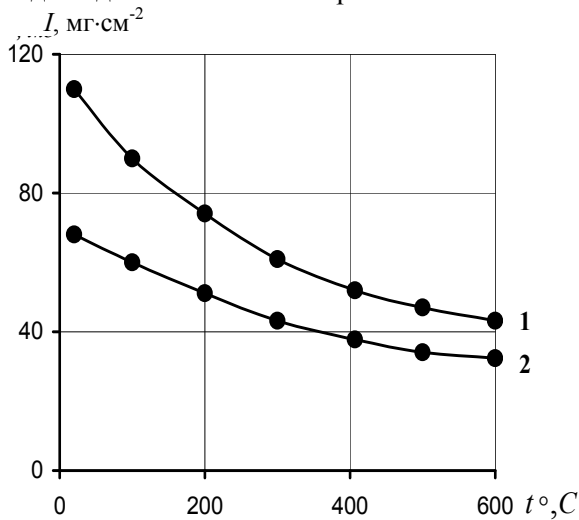


Рис. 3. Температурна залежність зносу композитів (P=1 МПа, V=0,1 м/с):
1 – Ni-TiB₂; 2 – Ni-CrB₂

Більш високу зносостійкість композиту Ni-CrB₂ порівняно з Ni-TiB₂ можна пояснити зниженням концентрації локальних напружень у матеріалі. Хоча з підвищенням температури напруження дещо збільшуються (рис. 2, а), спостерігається зменшення зносу в композитах, що обумовлено превалюванням іншого фактора – схильності матеріалів до окиснення й утворення оптимальних щодо зносостійкості вторинних структур (окислів).

Нестационарні термічні поля і напруження

У процесі експлуатації при терті виникають теплові та силові потоки, які в умовах гетерогенності композиційних покриттів суттєво неоднорідні.

Оцінку цієї неоднорідності за температурою та напруженням, а також впливу складу, розмірів і фізико-механічних властивостей структурних складових композитів Ni-TiB₂, Ni-CrB₂, Ni-SiC виконано за розробленими в праці [9] математичною моделлю сприйняття композиційним матеріалом температурних навантажень та алгоритмами імітаційного дослідження на ПЕОМ.

При розробці математичної моделі були прийняті такі припущення:

- форма включень та їх розміри усереднені у певному діапазоні;
- склад і властивості матриці (зв'язки) постійні у всьому об'ємі покриття;
- дифузійний обмін із довкіллям відсутній;
- товщина покриття перевищує (дорівнює) найбільший розмір включень;
- джерелом тепла є тертя у фрикційному контакті.

Для розв'язання поставлених завдань моделювання композиційного матеріалу здійснювалося з використанням методу скінчених елементів. Розглядалися температура t довільного елемента $x_{i,j,k}$, вирізаного з об'єму матеріалу. Припускаючи, що точки зв'язані між собою температурними стрижнями, й використовуючи рівняння Фур'є та інтегральні перетворення, отримали різницеві відношення, які описують зміну температури точки залежно від параметрів для одновимірної задачі:

$$t_{i,k+1} = \frac{a\Delta\tau}{h_x^2}(t_{i+1,k} + t_{i-1,k}) - \frac{2a\Delta\tau}{h_x^2}t_{i,k} + t_{i,k}, \quad (8)$$

де a – коефіцієнт, який визначає теплоінерційність: $a=\lambda/c_p\rho$; c_p – питома теплоємність матеріалу; ρ – густина матеріалу; τ – поточний час процесу; h_x – розмір елементарної зображеної комірочки вздовж осі Ox .

Позначивши $F_{Ox}=a\Delta\tau/h_x^2$ за умови, що $F_{Ox}<0,5$:

$$t_{i,k+1} = F_{Ox}(t_{i+1,k} + t_{i-1,k}) + (1 - 2F_{Ox})t_{i,k} \quad (9)$$

за умови, що $F_{Ox} \geq 0,5$:

$$t_{i,k+1} = 0,5(t_{i+1,k} + t_{i-1,k}).$$

Для тривимірної задачі умови (7) і (8) теж справедливі, але у цьому разі умова рівноваги ($F_{Ox} + F_{Oy} + F_{Oz} \leq 0,5$).

$$\begin{cases} \sigma_x = E\alpha \frac{(1-\nu)\Delta T_x + \nu(\Delta T_y + \Delta T_z)}{1-\nu-2\nu^2}; \\ \sigma_y = E\alpha \frac{(1-\nu)\Delta T_y + \nu(\Delta T_z + \Delta T_x)}{1-\nu-2\nu^2}; \\ \sigma_z = E\alpha \frac{(1-\nu)\Delta T_z + \nu(\Delta T_x + \Delta T_y)}{1-\nu-2\nu^2}; \\ \tau_{xy} = G\alpha(\Delta T_x - \Delta T_y); \\ \tau_{yz} = G\alpha(\Delta T_y - \Delta T_z); \\ \tau_{zx} = G\alpha(\Delta T_z - \Delta T_x); \end{cases}$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження в напрямках X, Y, Z; E – модуль пружності; α – коефіцієнт лінійного теплового розширення; ν – коефіцієнт Пуассона; $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{zx}$ – дотичні напруження в площадках XY, YZ, ZX;

G – модуль зсуву:

$$G = E/2(1-\nu).$$

Математична модель тривимірного тіла складається із 3N (N – кількість елементарних комірок тіла) виразів (7), (8).

Послідовно визначаючи температуру кожної комірки в часі, отримуємо загальну картину температурного поля в просторово-часовій системі координат композиційного матеріалу. Результати розрахунків формуються у багатовимірні масиви, за якими будуються просторові поля температур та за системою рівнянь (9) поля термічних напружень.

Інтенсивність напружень в елементарній комірці знаходимо за формулою

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Для визначення впливу параметрів структури та складу покриття на поля температур і термічні напруження проведено відповідні дослідження за вихідними даними, наведеними в табл. 2.

Таблиця 2

Теплофізичні властивості компонентів композицій

Матеріал	Питома теплоємність C, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт	
		теплопровідності λ , Вт/(м·К)	теплового розширення, 1/К
Ni	435	88,5	$13,3 \cdot 10^{-6}$
Ti B ₂	44,18	64,53	$4,3 \cdot 10^{-6}$
CrB ₂	51,16	31,84	$10,5 \cdot 10^{-6}$
SiC	26,84	41,9	$4,7 \cdot 10^{-6}$

Результати досліджень впливу параметрів структури та складу на напружений стан композицій зведено у табл. 3.

Таблиця 3

Статистичні характеристики полів термічних напружень композицій на основі нікелю для розмірів комірок r = 0,035 мм

Матеріал	Теплоємність Ср, Дж/кг·К	Термічні напруження в композиційному шарі, МПа		
		$\sigma_{роз.}$	$\sigma_{ст.}$	$\sigma_{ср.}$
TiB ₂	44,18	71	-75	1,82
CrB ₂	51,16	66,4	-70	1,75
SiC	26,84	126	-115,5	1,96

На рис. 4, а показано термічне поле в товщі покриття Ni-TiB₂ у момент часу, що відповідає закінченню проходження контртілом усієї досліджуваної ділянки. У цей момент весь поверхневий шар нагрітий від енергії, виділеної тертям. Глибші шари внаслідок теплоінерційності та розсіювання тепла нагріті значно менше. Крім того, спостерігаються великі перепади миттєвих температур між матрицею та включеннями, які зумовлені значною неоднорідністю їх теплофізичних властивостей. Ця неоднорідність температурних полів по поверхні (у площині XY) та між шарами по глибині Z, а також різні значення коефіцієнтів термічного розширення викликають значні термічні напруження в композиційних матеріалах покриттів. Приклад поля термічних напружень показано на рис. 4, б.

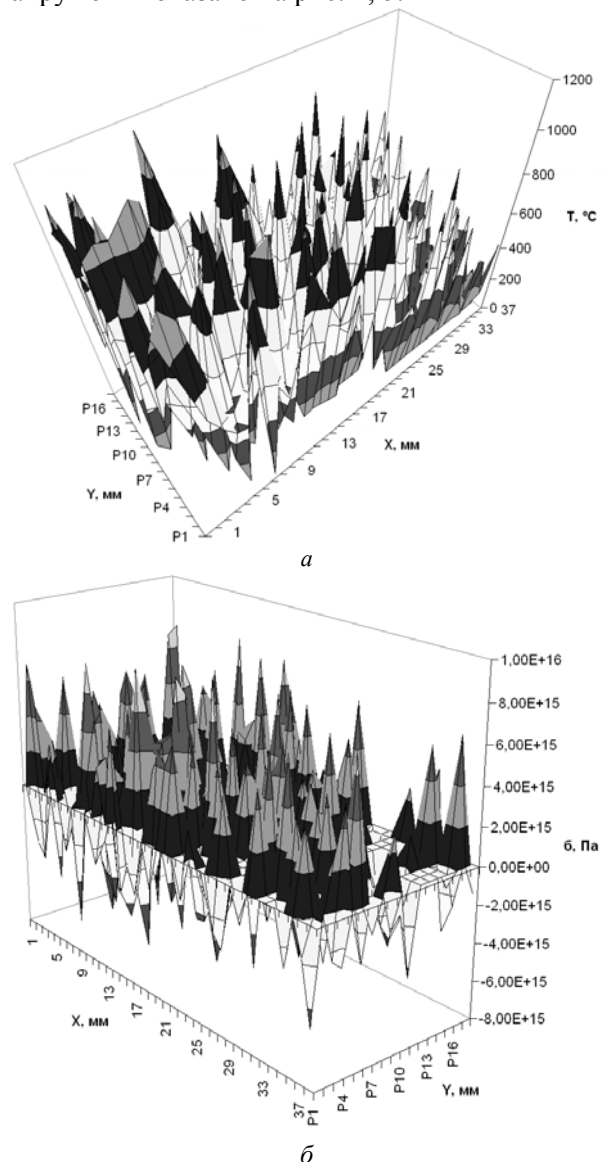


Рис. 4. Поля температури (а) та термічного напруження (б) у композиційному матеріалі Ni-TiB₂

Вплив параметрів структури та складу покриттів на напружений стан матеріалу показано на рис. 5.

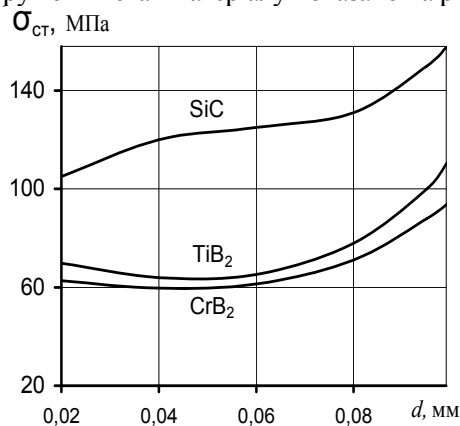


Рис. 5. Вплив розмірів включень на пікові стискуючі напруження в композиційних матеріалах

Опосередковано отримані результати можна також пояснити аналітичними дослідженнями залежності параметрів контактування і трибометричних характеристик від структури і складу композицій матрично-наповненого типу [3].

Крупні тверді включення за того самого об'ємного вмісту більшою мірою діють на параметри контактування. Так, за об'ємної частки твердих включень 0,25 розміром 100 мкм відносна площа дотику при терті становить 0,015, тоді як для включень 1 мкм вона дорівнює 0,024.

Фізичний зміст такої різниці відносних площ дотику композицій з одним і тим самим об'ємним складом, але різною структурою полягає в тому, що на одиничних контактуючих ділянках твердого матеріалу включень більшого розміру діють значно більші контактні навантаження. Це призводить до збільшення локального нагрівання твердих включень і, як наслідок, термічних напружень.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє зробити висновки про суттєву неоднорідність по всіх координатах нестационарних теплових полів, викликаних у композиційних матеріалах процесами тертя. Конфігурація цих полів зумовлена гетерогенністю структури, теплофізичними властивостями композита та динамікою процесу тертя. Параметри структури та її склад мають значний вплив на статичні характеристики цих полів. Використання імітаційного моделювання дозволило виявити, що в композиційних матеріалах під впливом температурних полів виникають поля термічних напружень зі значними перепадами, які залежать від неоднорідності фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу. Найбільш навантаженими ділянками композиційного матеріалу покриття є перехідні зони між покриттям і основою та між включеннями і матрицею.

Позитивний ефект щодо зменшення перепадів напружень і підвищення релаксаційної здатності проявляється при застосуванні дрібнодисперсних композиційних матеріалів.

Висновки

1. Виходячи з ідеалізованих умов, розраховано залежності концентрації напружень у композиції від співвідношення механічних властивостей, об'ємного співвідношення матриці та включень теплофізичних характеристик. З аналізу цих залежностей видно, що за умов тертя слід віддавати перевагу композиціям, що містять 30–40% високомодульних волокон.
2. Установлено, що в досліджуваному інтервалі температур більш суттєвий вплив на напружено-деформований стан матеріалу мають фізико-механічні властивості компонентів композиту ніж теплові.
3. Поля температур та термонапружень композиційного матеріалу відзначаються значною неоднорідністю, яка зумовлена наявністю включень у матриці, теплофізичні властивості яких значно відрізняються. Найбільш суттєвий вплив на конфігурацію цих полів має концентрація та розміри включень.

Література

1. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наук. думка, 1980. – 404 с.
2. Щурин А.К., Панарин В.Е., Киндрачук М.В. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения // Пробл. трения и изнашивания. – 1981. – Вып. 19. – С. 65–73.
3. Киндрачук М.В., Лучка М.В., Корнієнко А.О. Экспериментально-аналитичні дослідження триботехнічних характеристик покриттів матрично-наповненого типу // Пробл. трибології. – 2005. – №2. – С. 69–73.
4. Киндрачук М.В., Душек Ю.Я., Лучка М.В. Локальный характер напряженно-деформированного состояния композиционного материала, нагруженного силами трения // Порошковая металлургия. – 1994. – № 9–10. – С. 56–61.
5. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: АН СССР, 1954. – 647с.
7. Ванін Г.А. Новый метод учета взаимодействия в теории композиционных систем // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1976. – № 4. – С. 321–324.
8. Ванін Г.А. Микромеханика композиционных материалов. – К.: Наук. думка, 1985. – 302 с.
9. Савуляк В.І., Березюк О.В., Дяченко В.В. Термічні поля в парах тертя з композиційних матеріалів // Пробл. трибології. – 2002. – №3, 4. – С. 124–128.

Стаття надійшла до редакції 16.03.06.