

УДК 621.891

А. О. КОРНІЄНКО

Національний авіаційний університет

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН У КОМПОЗИЦІЙНОМУ МАТЕРІАЛІ ПРИ ТЕРТІ ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

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

Ключові слова: напружено-деформований стан, тертя, композит, підвищені температури, знос.

Сутність проблеми та її зв'язок з практичними задачами. Прогресивним напрямком триботехнічного матеріалознавства є розробка композицій на металевій основі, зміцнених тугоплавкими високоміцними волокнами або пластинами. Такі матеріали можуть працювати в широкому діапазоні температур [1]. Аналіз антифрикційних властивостей виявив важливу роль розміру включень наповнювача та його об'ємного вмісту [2]. На зносостійкість гетерогенних матеріалів суттєво впливає напружений стан, що виникає під час контактування поверхонь при терті [3]. 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. Проте вдалий підбір співвідношення складових може сприяти зменшенню цих напружень, підвищенню працездатності деталей та конструкції в цілому.

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 фактору.

Результати і обговорення. Металевою матрицею вибрано нікель, а зміцнювальними фазами служили диборид титану TiB_2 , диборид хрому CrB_2 і карбід кремнію SiC . Їх фізико-механічні властивості приведені в таблиці. Матеріал композиції модельований безперервно-армованими перпендикулярно до поверхні тертя циліндричними волокнами з однаковими поперечними перерізами [1]. Простір між волокнами заповнений сполучним середовищем – матрицею, пружні характеристики якої відрізняються від відповідних характеристик волокон (табл.). На гетерогенний матеріал діють сили нормального тиску, які викликають в ньому стан поздовжнього стиску $\langle\sigma_1\rangle$ і сили тертя, що викликають стан поздовжнього зсуву $\langle\sigma_{12}\rangle$, $\langle\sigma_{13}\rangle$. В пружній області ці стани розділяються, що дає змогу вирішувати два самостійні завдання. Оскільки контактне завдання в даній постановці не розглядалося, то локальні поля напружень у компонентах визначалися на деякій відстані від поверхні, де кромочні ефекти згасають. Розглядаючи напружений стан 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 роздільних функцій $\varphi_m(z)$ і $\varphi_l(z)$ у матриці і включенні відповідно.

Таблиця

Фізико-механічні властивості компонентів композиції

Матеріал	Модуль пружності E, МПа	Модуль зсуву G, МПа	Густина ρ , кг/м ³	Коефіцієнт Пуассона
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

Розв'язання задачі проводилось методом послідовної регуляризації [4]. Опускаючи громіздкі викладки, наведемо вираз для розподілу полів зсунаних напружень при дії середніх напружень $\langle \sigma_{12} \rangle$ ($\langle \sigma_{13} \rangle = 0$) в будь-якій точці матриці:

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

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

де $S = \frac{1-G_f/G_m}{1+G_f/G_m}$; η і ξ – об'ємний вміст відповідно матриці і наповнювача; G_m і

G_f – модулі зсуву матриці і включення; ρ і ν – координати точки в матриці. Ці вирази враховують ефект взаємодії волокон і справедливі при достатньо високому об'ємному вмісті наповнювача.

Аналіз формул показує, що концентрація зсувних напружень максимальна в точці міжфазної границі з координатами $\rho = 1$; $\nu = 0$; π , де відстань між включеннями мінімальна. Тоді максимальний коефіцієнт концентрації зсувних напружень

$$K_{1r} = \frac{\sigma_{1r}}{\langle \sigma_{12} \rangle} = \frac{2G_f/G_m}{1-\xi+(1+\xi)G_f/G_m} \left[1 + 4 \left(\frac{1-G_f/G_m}{1+G_f/G_m} \right) \frac{\xi^2}{\pi^2} \left(3 + 7 \frac{\xi^2}{\pi^2} \right) \right].$$

Цей вираз враховує як механічні характеристики компонентів, так і їх об'ємний вміст.

Стан середовища при поздовжньому розтягуванні-стисканні подано у вигляді двох простіших: стану розтягування-стискання без урахування взаємодії між компонентами при дії невідомих постійних напружень в припущенні, що площина $x_1 = \text{const}$ не викривляється в процесі деформування; плоского деформованого стану для заданих зміщень на міжфазних границях при відсутності поздовжніх деформацій. Розв'язуючи задачу на розтягання-стискання невзаємодіючих компонентів, визначають напруження в наповнювачі і матриці відповідно. При поздовжньому стисканні 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 $\psi(z)$. Розв'язання задачі про плоску деформацію описаними методами дає змогу отримати в уточненому вигляді вирази для полів напружень в матриці:

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

$$\text{де } Q = \frac{1}{E} \frac{4G(\nu_m - \nu_f)}{2 - \xi + \chi_m \xi + (1 - \xi)G_m/G_f(\chi_f - 1)}; T = \frac{1 - G_m/G_f}{\chi_m + G_m/G_f}.$$

Напруження в матриці при дії середніх напружень поздовжнього стиску будуть максимальними в точках міжфазної границі, де максимальне зближення включень. Найбільший коефіцієнт концентрації напружень становитиме:

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

Таким чином, отримані аналітичні вирази для локальних полів напружень, що діють в матриці залежно від механічних характеристик компонентів і структури композиційного матеріалу.

За допомогою даної методики проведені розрахунки напруженого стану з урахуванням температурного фактору (рис. 1), який виникає в евтектичному сплаві, в якому металевою матрицею є нікель, а зміцнювальними фазами – диборид титану TiB_2 , диборид хрому CrB_2 і карбід кремнію SiC (табл.).

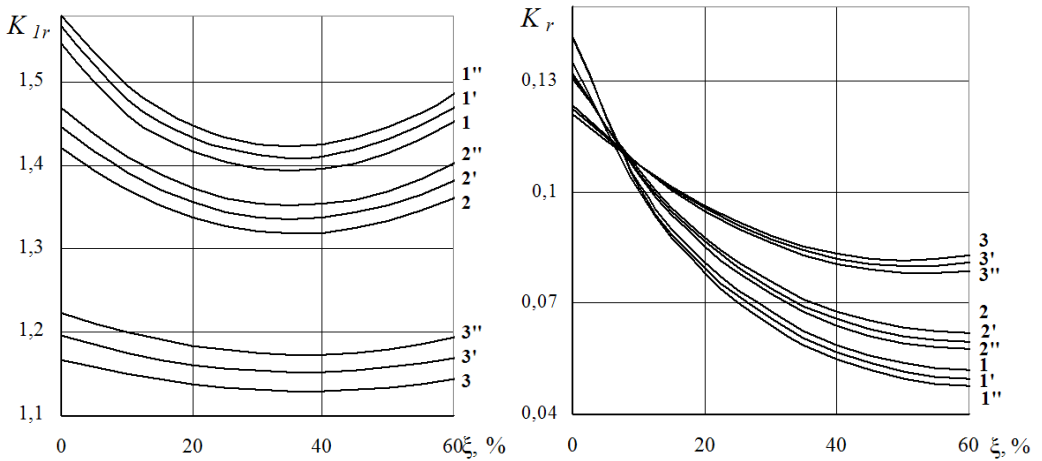


Рис. 1. Залежність максимальної концентрації напружень поздовжнього зсуву K_{lr} (а) та поперечного розтягу K_r (б) від об'ємного вмісту TiB_2 (1), SiC (2), CrB_2 (3) за температур: 1, 2, 3 – 20°C; 1', 2', 3' – 300°C; 1'', 2'', 3'' – 450°C.

Аналіз залежностей показує, що існує такий об'ємний вміст включень (30–40 об. %), при якому фіксується мінімум інтенсивності локальних дотичних напружень у матриці. 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.

Випробування на тертя та зношування проводили на машині торцевого тертя за навантаження 1 МПа, швидкості ковзання 0,1 м/с. Контртіло – сплав ЖСБК. Зразки для випробовувань попередньо оплавливали променем лазера для отримання стовбчастої структури. Результати триботехнічних досліджень наведені на рис. 2. Більш високу зносостійкість композиту $Ni-CrB_2$ порівняно з $Ni-TiB_2$ можна пояснити зниженням концентрації локальних напружень в матеріалі. Хоча з підвищенням температури напруження дещо збільшуються (рис. 1), спостерігається зменшення зносу в композитах, що обумовлено превалюванням іншого фактора – схильності матеріалів до окислення і утворення оптимальних щодо зносостійкості вторинних структур (окислів).

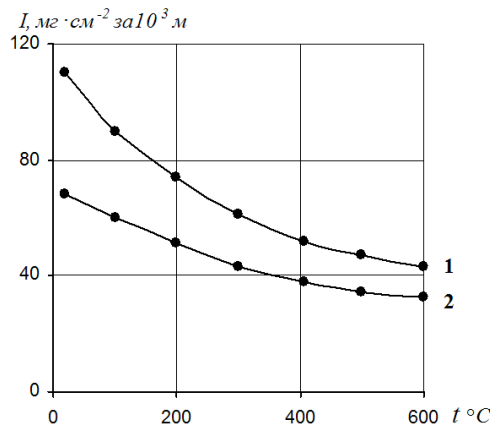


Рис. 2. Температурна залежність зносу композитів: 1 – Ni-TiB₂; 2 – Ni-CrB₂; $P = 1$ МПа, $V = 0,1$ м/с

Висновки. Таким чином, виходячи з ідеалізованих умов розраховані залежності концентрації напружень у композиції від співвідношення механічних властивостей, об'ємного співвідношення матриці і включень та теплофізичних характеристик. З аналізу цих залежностей видно, що за умов тертя слід віддавати перевагу композиціям, що містять 30–40 % (об.) високомодульних волокон. Встановлено, що в досліджуваному інтервалі температур більш суттєвий вплив на напружено-деформований стан матеріалу мають фізико-механічні властивості компонентів композиту ніж теплові.

Список літератури

1. Кіндрачук М.В. Структуроутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка. – К.: Вища шк., 1997. – 120 с.
2. Кіндрачук М.В. Експериментально – аналітичні дослідження триботехнічних характеристик покриттів матрично-наповненого типу / М.В. Кіндрачук, М.В. Лучка, А.О. Корнієнко // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2005. – №2. – С. 69-73.
3. Кіндрачук М.В. Локальний характер напружено-деформованого состояния композиционного материала, нагруженного силами трения / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Духеш, М.В. Лучка // Порошковая металлургия. – 1994. – № 9–10. – С. 56–61.
4. Ванін Г.А. Микромеханика композиционных материалов / Г.А. Ванін. – К.: Наук. думка, 1985. – 302 с.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2013

A. KORNIENKO

THE STRESS-STRAINED STATE IN COMPOSITION MATERIAL AT ELEVATED TEMPERATURES FRICTION

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. Calculations shows that minimal intensity of local tangential stresses in the matrix is in composite with 30-40% of strengthen fillers.

Key words: stress-strained state, friction, composite, elevated temperature, wearing.

Корнієнко Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, nau12@ukr.net.