

## ВПЛИВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ БАГАТОШАРОВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ

Національний авіаційний університет

*Проведено аналітичні дослідження напружено-деформованого стану на моделі пластини з багатошаровим покриттям та встановлено вплив структурного градієнта та напружено-деформованого стану, що виникає при терті, на зносостійкість композиційних електролітичних покриттів.*

**Постановка задачі.** У результаті контактної взаємодії конструктивних елементів у машинах і обладнанні часто на локальних ділянках поверхні виникають дуже великі питомі навантаження, котрі викликають значні напруження у матеріалі деталей, що призводить до передчасного їх виходу з ладу внаслідок зіношування та втомного руйнування. У зв'язку з цим важливим є знання напружено-деформованого стану (НДС) в деталі від дії навантаження та його залежність від структури матеріалу. Величина напружень залежить не лише від прикладеного навантаження, а визначається значною мірою структурою матеріалу. Особливо це актуально для композиційних покриттів, оскільки досить мало робіт в яких визначається вплив розмірів, вмісту, типу наповнювача, кількість шарів на НДС покриття. Так в роботі [1] описується важливість визначення НДС для створення нових композиційних покриттів і встановлено взаємозв'язок між концентрацією напружень в покритті, співвідношенням механічних властивостей матриці і включень, щільністю розташування включень. Продовженням цих досліджень є робота [2], в якій авторами на основі розрахунків НДС запропонована модель покриття з можливістю самоорганізації під час тертя, в якому реалізується позитивний градієнт властивостей, що забезпечує мінімальний знос при терті. Але відкритим залишається питання, щодо впливу градієнта структури на НДС композиційних багатошарових покриттів. Тому метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану, який виникає під час тертя одного багатошарових покриттів, і ступеня його впливу на зносостійкість

багатошарових композиційних покриттів.

**Методи дослідження.** Дослідження проведені на композиційних електролітичних покриттях Ni-SiC із використанням методів аналітичного дослідження напружено-деформованого стану композицій, навантажених силами тертя, металографічного аналізу. Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проведено за схемою вал-площина на машині тертя M22-M у парі із загартованою сталлю 45 (HRC 45-48). Програма досліджень: швидкість ковзання – 0,5 м/с, шлях тертя – 1 км, навантаження – 20, 40, 60 Н. Контролювали масовий знос зразка, масовий знос контртіла, лінійний знос пари тертя та коефіцієнт тертя.

**Обговорення результатів.** Задля вивчення впливу фізико-механічних характеристик (товщини, модуля пружності та градієнта властивості за глибиною) покриття на величину і характер розподілу напружень в матеріалі деталі при контактному навантаженні нами проведені теоретичні дослідження НДС на моделі (пластини з різними покриттями) числовими методами з використанням графової моделі напруженого тіла [3] і пакета програм «Термопружність», розробленого в Інституті проблем міцності НАН України.

Ця модель являє собою пластину нескінченну завдовжки та велику завтовшки, на поверхню якої були нанесені покриття з різними фізико-механічними властивостями (рис. 1, а). Досліджувана область розбивалася на 120 елементів прямокутної форми. При цьому розбивка проводилася таким чином, що більш густа сітка була у верхніх шарах, що моделювали покриття (рис. 1, б) [4].

Навантаження силами тертя моделювалися рівномірно розподіленим нормальним навантаженням  $Q = 200$  МПа і дотичним навантаженням  $F = \mu Q$ , де  $\mu$  – безрозмі-

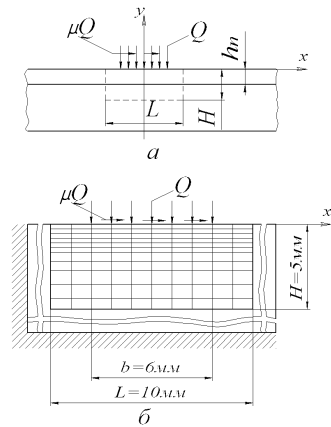


Рис. 1. Розрахункова модель: а – загальний вид; б – ділянка дослідження НДС

ний коефіцієнт (коефіцієнт тертя,  $\mu < 1$ ). Ця модель являє собою плоский штамп, що ковзає по покриттю.

Задача вирішувалася в пружній області. Досліджувався плоский напружено-деформований стан пластини. Розрахунки проводилися при постійному значенні модуля пружності основи, який для вуглецевої сталі становить  $E_o = 2 \cdot 10^5$  МПа. Параметри покриття і коефіцієнт  $\mu$  змінювалися в таких межах: товщина покриття  $h_n = 100 \dots 400$  мкм; модуль пружності покриття  $E_n = (1,9 \dots 2,9) \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,1 \dots 0,9$ . Для проведення розрахунків було вибрано 12 варіантів різних покриттів, які відрізнялися градієнтом механічних властивостей за товщиною, та модель пластини без покриття.

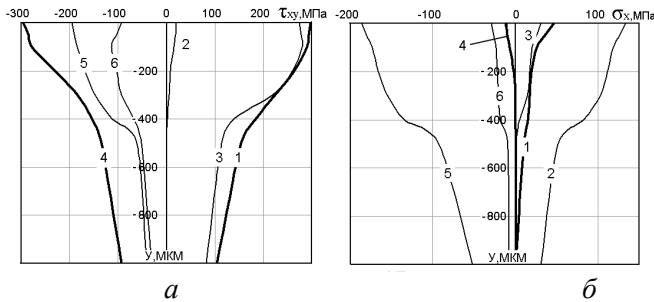


Рис. 2. Максимальні напруження  $\sigma_x$  та  $\tau_{xy}$  за глибиною покриття при  $\mu = 0,9$ ; 1, 4 – відповідно розтяжні та стискальні напруження для одношарових покриттів; 2, 5 – багат шарових покриттів з «прямим» градієнтом; 3, 6 – багат шарових покриттів з «оберненим» градієнтом: а – дотичні напруження  $\tau_{xy}$ ; б – нормальні напруження  $\sigma_x$

Моделі багат шарових покриттів являють собою КЕП з різним розміром і кількістю наповнювача (частинки SiC) і, відповідно, різним модулем пружності та різною кількістю шарів (їх чергування) у покритті. Шару з модулем  $1,9 \cdot 10^5$  МПа відповідає КЕП з включеннями розміром 50 нм і вмістом 4 об.%; модуль  $2,05 \cdot 10^5$  МПа мають покриття з включеннями розміром 5 мкм і вмістом близько 10 об.%; шар з частинками фракції 28/20 мкм має модуль  $2,4 \cdot 10^5$  МПа при вмісті 25 об.% і шар з модулем  $2,9 \cdot 10^5$  МПа – КЕП з включеннями розміром 100 мкм і вмістом 50 об.%. Причому порядок слідування шарів у градієнтному підшарі від поверхні до основи, що характеризуються збільшенням розміру частинок та їх вмісту і, відповідно, механічних властивостей умовно, вважатимемо

«прямим» градієнтом будови ( $\text{Ni}+\text{SiC}_5 \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}_{28} \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}_{100} \rightarrow$  основа) і навпаки, якщо верхній шар має високі властивості, а в міру віддалення від поверхні розташовані шари з нижчими механічними властивостями – «оберненим» градієнтом ( $\text{Ni}+\text{SiC}_{100} \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}_{28} \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}_5 \rightarrow$  основа), де  $\text{Ni}+\text{SiC}_5$ ,  $\text{Ni}+\text{SiC}_{28}$ ,  $\text{Ni}+\text{SiC}_{100}$  – покриття з включеннями частинок розміром 5, 28 та 100 мкм відповідно.

Розрахунки показали, що максимальні напруження виникають у верхньому шарі і зменшуються у міру віддалення від поверхні. Нормальні напруження  $\sigma_y$  є напруженнями стиску і майже не залежать від механічних властивостей покриття та їх градієнта за глибиною, тому досліджувалися нормальні  $\sigma_x$  та дотичні  $\tau_{xy}$  напруження. Їх величина залежить від товщини покриття, коефіцієнта дотичного навантаження  $\mu$  (коефіцієнта тертя), модуля пружності покриття та його співвідношення з модулем пружності основи і зростають зі збільшенням цих параметрів. Мінімальними напруженнями характеризується матеріал без покриття, або коли верхнім є шар із властивостями, близькими до властивостей основи і збільшуються зі збільшенням різниці між властивостями основи, та покриття. В багат шарових покриттях максимальні напруження можуть бути на поверхні або всередині покриття в шарі з найвищими механічними властивостями, у міру віддалення від якого вони значно зменшуються. Збільшення товщини покриття призводить до виникнення значних розтяжних напружень як дотичних, так і нормальних. Зі збільшенням коефіцієнта тертя  $\mu$  відбувається збільшення дотичних напружень та нормальних розтяжних напружень. При цьому для одношарових покриттів максимум дотичних напружень переміщується з глибини покриття до поверхні і при  $\mu = 0,5$  і більше припадає на поверхню.

Характер зміни напружень за глибиною для покриттів з різним градієнтом будови показано на рис. 2. При нанесенні верхнім шару з властивостями, вищими ніж основи, в покритті виникають значні дотичні розтяжні та стискальні напруження (рис. 2, *a* криві 1 та 4). Нанесення цих покриттів на градієнтний підшар спричиняє значний перерозподіл напружень і сприяє їх зменшенню. Із нанесенням покриттів на підшар з «прямим» градієнтом будови зменшуються дотичні напруження стиску (рис. 2, *a* крива 5) і майже повністю зникають дотичні напруження розтягу (рис. 2, *a* крива 2),

які найбільш небезпечні та прискорюють руйнування. Для багат шарових покриттів з «оберненим» градієнтом зменшуються дотичні напруження і нормальні розтяжні напруження, але збільшуються стискальні (рис. 2, б криві 3, б). Якщо порівнювати градієнтні покриття між собою, то за «прямого» градієнта будуть значно меншими дотичні розтяжні напруження та дещо більшими дотичні стискальні напруження, нормальні напруження будуть більшими за «прямого» градієнта.

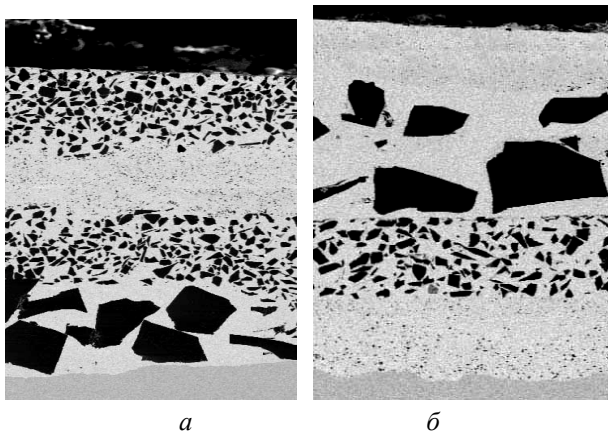


Рис. 3. Мікроструктури багат шарових градієнтних КЕП,  $\times 100$ : *a* – «прямий» градієнт + шар з частинками фракції 28/20 мкм; *б* – «обернений» градієнт + шар з наночастинками 50 нм

У разі нанесення покриттів гальванічним методом у покриттях виникають залишкові напруження розтягу, тому кращим є варіант, коли під час тертя виникатимуть стискальні напруження, тобто варіант, коли покриття наноситься на «прямий» градієнт. За такої будови покриття сумарні напруження (залишкові та від тертя) будуть меншими.

Проведені аналітичні дослідження дали змогу сформулювати вимоги до формування покриттів з урахуванням їх напружено-деформованого стану для підвищення несучої здатності та довговічності за контактного навантаження через нанесення зносостійких покриттів з високим модулем пружності; створення покриттів, у яких під час тертя виникають стискальні напруження, що компенсують технологічні залишкові розтяжні напруження; створення градієнтних покриттів з «прямим» градієнтом будови, за якого зменшу-

ються небезпечні дотичні розтяжні напруження.

На основі результатів аналітичних досліджень напружено-деформованого стану розроблено багат шарові градієнтні покриття Ni-SiC (рис. 3) та проведено їх триботехнічні дослідження. Зносостійкість для градієнтних КЕП з наночастинками для обох типів градієнта порівняно з аналогічними одношаровими покриттями підвищується у 4 – 7 разів. У разі нанесення шару з частинками фракції 28/20 мкм на градієнтний підшар з «прямим» градієнтом зносостійкість підвищується в 1,5 – 2 рази (рис. 4), а з використанням

«оберненого» градієнта зносостійкість дещо менша. Підвищення зносостійкості зумовлено високими дисипативними властивостями градієнтного підшару, в якому виникають дотичні стискальні напруження (згідно з проведеними аналітичними розрахунками), на відміну від градієнтних КЕП з «оберненим» градієнтом, у яких виникають дотичні розтяжні напруження.

**Висновки.** Проведені дослідження напружено-деформованого стану багат шарових композицій показали, що із нанесенням покриттів на градієнтний підшар відбувається значний перерозподіл напружень та їх зменшення, при цьому найменшими напруженнями характеризуються покриття, нанесені на градієнтний підшар з «прямим» градієнтом властивостей. Установлено вплив структурного градієнта на зносостійкість КЕП. Так, порівняно з аналогічними одношаровими покриттями зносостійкість КЕП із «прямим» градієнтом будови, тобто покриттів, у яких шари розміщуються від основи у порядку зменшення в них умісту та розміру частинок наповнювача і верхнім є найбільш зносостійкий шар (з включеннями SiC дисперсністю 20–28 мкм), підвищується в 1,5–2 рази. Це пояснюється сприятливим розподілом напружень, які виникають під час тертя, що узгоджується з теоретичними розрахунками напружено-деформованого стану.

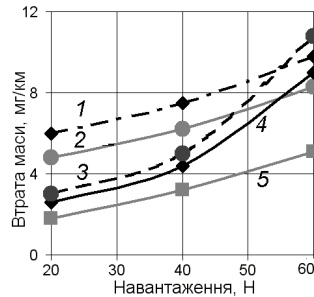


Рис. 4. Зносостійкість градієнтних КЕП: 1 – «прямий» градієнт + шар з наночастинками; 2 – «обернений» градієнт + шар з наночастинками; 3 – «обернений» градієнт + шар з частинками 28 мкм; 4 – одношарові покриття з частинками 28 мкм; 5 – «прямий» градієнт + шар з частинками 28 мкм

### Список літератури

1. *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.
2. *Киндрачук М.В., Душек Ю.Я., Лучка М.В.* Эволюция структуры и свойств эвтектических покрытий при трении // Порошковая металлургия. – 1995. – № 5–6. – С. 104–110.
3. *Кузаков Е.Г.* Графовая модель упругого тела. Расчет напряженно-деформированного состояния. – К., 1985. – 53 с. (Препр. АН УССР, Ин-т пробл. проч.; 85–24).
4. *Каплун П.В.* Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: Дис.... канд. техн. наук: 05.02.01. – К., 2004. – 175 с.

Стаття надійшла до редакції 28.03.09.