

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Корнієнко Анатолій Олександрович**

УДК 621.891

**ФОРМУВАННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ  
НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ СТВОРЕННЯМ  
ГРАДІЄНТНИХ СТРУКТУР**

Спеціальність 05.02.04 - тертя та зношування в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі машинознавства Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковій керівник: доктор технічних наук, професор  
**Кіндрачук Мирослав Васильович**  
Національний авіаційний університет, завідувач  
кафедри машинознавства

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки  
і техніки України  
**Тихонович Вадим Іванович**  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів  
НАН України, старший науковий співробітник

кандидат технічних наук  
**Грінкевич Костянтин Едуардович**  
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича  
НАН України, старший науковий співробітник

Провідна установа: Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка  
НАН України, м. Київ

Захист відбудеться « 19 » квітня 2007 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.062.06 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 1

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 8

Автореферат розісланий «\_\_\_» березня 2007 р.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У загальній проблемі підвищення надійності та довговічності об'єктів машинобудування центральне місце займають питання поверхневого зміцнення конструкційних матеріалів. Особливо це важливо для вузлів тертя, оскільки 80% відмов машин і механізмів відбувається через поверхневе руйнування. Часто ці деталі працюють в екстремальних умовах. Тому потрібні матеріали зі складним комплексом фізико-механічних властивостей. Ефективним виходом із ситуації, що склалася, є формування на поверхні виробів з конструкційних матеріалів зносостійких градієнтних нашарувань з гетерогенним складом, шаруватою або дискретною структурою матрично-наповненого або скелетного типу із заданим комплексом властивостей. Серед таких покриттів перспективним є використання багатофункціональних градієнтних композиційних електролітичних покриттів (КЕП). Саме градієнтність, здатність цілеспрямовано регулювати кількісне і якісне співвідношення структурних і фазових складових дають змогу керувати фізико-механічними й експлуатаційними властивостями покриттів.

Проте використання таких покриттів на практиці гальмується значною мірою через те, що недостатньо визначені механізми їх формування, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. Майже немає даних про триботехнічні властивості КЕП, про вплив напружено-деформованого стану на експлуатаційні властивості. Обмежені відомості про вплив високонцентрованих джерел енергії (лазера) на їх структуру і зносостійкість. Немає чіткого регулювання співвідношення частки твердих включень і металевієї основи, природи і форми зміцнювальних фаз.

Тому актуальним завданням є дослідження та систематизація триботехнічних характеристик КЕП на нікелевій основі, які вміщують як зміцнювальну фазу зносостійкі включення карбідів і боридів, визначення напружено-деформованого стану, особливостей впливу структури КЕП на зносостійкість таких покриттів і можливості керування їх триботехнічними властивостями за рахунок створення композицій з наперед заданою структурою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано в рамках відомчих бюджетних тем “Розробка науково-технологічних основ формування концентрованими джерелами енергії евтектичних покриттів триботехнічного призначення із нанокристалічною структурою градієнтного типу” (номер держреєстрації 0105U001818) та “Розробка наукових основ формування дифузійно-легованих та евтектично-оплавлених покриттів, отриманих з використанням концентрованих джерел енергії із нанокомпозиційною структурою градієнтного типу” (номер держреєстрації 0104U008781), а також госпрозрахункового договору між Національним авіаційним університетом та Житомирським ремонтно-механічним заводом (281-Х05).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення зносостійкості КЕП формуванням градієнтних структур з макро- та нанонаповнучачами на основі встановлених закономірностей впливу структурно-фазового складу, напружено-деформованого стану та термічної обробки на їх триботехнічні характеристики.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **завдання**:

- аналітично дослідити напружено-деформований стан, який виникає під час тертя одно- та багатошарових покриттів і ступеня його впливу на процеси тертя та зношування;

- установити взаємозв'язок фізико-механічних властивостей, структури, співвідношення частки твердих включень і металевої зв'язки, природи і розміру зміцнювальних частинок та їх вплив на зносостійкість композиції;

- дослідити вплив градієнта структурної будови на зносостійкість багатошарових покриттів;

- дослідити триботехнічні властивості покриттів, отриманих співосадженням макро- та наночастинок з різним градієнтом будови;

- визначити вплив додаткової обробки КЕП оплавленням у вакуумі, концентрованими джерелами енергії в режимі повного оплавлення та дискретної обробки на їх структурно-фазовий стан та зносостійкість;

- систематизувати отримані дані про зносостійкість різних КЕП та дати рекомендації щодо їх застосування.

**Об'єкт дослідження:** процеси формування зносостійких градієнтних КЕП Ni–SiC.

**Предмет дослідження:** вплив напружено-деформованого стану, структури, градієнта будови, фізико-механічних властивостей на закономірності формування триботехнічних характеристик.

**Методи дослідження.** Дослідження проведені на композиційних електролітичних покриттях Ni–SiC з використанням методів аналітичного дослідження напружено-деформованого стану композицій, навантажених силами тертя, хімічного аналізу, вимірювання мікротвердості, модуля пружності методом безперервного вдавнення індентора, металографічного, мікрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного аналізів та ожеспектроскопії. Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проведено за схемою вал–площина.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у такому:

- уперше проведено аналітичні дослідження напружено-деформованого стану одно- та багатошарових градієнтних КЕП, навантажених силами тертя. Показано, що величиною напружень у контактній зоні та за глибиною покриття можна керувати, змінюючи конструкцію та фізико-механічні характеристики покриттів;

- встановлено оптимальні щодо зносостійкості будову та режими нанесення КЕП Ni–SiC. Вивчено вплив кількості та розміру частинок наповнювача на триботехнічні властивості покриттів. Найвищою зносостійкістю характеризуються нікелеві КЕП з частинками SiC фракції 28/20 мкм, об'ємна частка яких становить 20 – 25 %;

- уперше проведено експериментальні дослідження впливу градієнта структури КЕП на триботехнічні властивості. Встановлено, що більш високою зносостійкістю характеризуються градієнтні КЕП з “прямим” градієнтом будови, тобто від основи композиційні шари розмішуються у міру зменшення в них вмісту та розміру наповнювача і верхнім є найбільш зносостійкий шар (із включеннями SiC фракції 28/20 мкм), що узгоджується з теоретичними розрахунками напружено-деформованого стану. Порівняно з аналогічними одношаровими покриттями зносостійкість цих градієнтних КЕП підвищується в 1,5 разу;

- уперше показано роль співосаджених макро- та наночастинок на комплекс фізико-механічних і триботехнічних властивостей. Композиційні електролітичні покриття, що містять, крім макронаповнювача, також наночастинки, характеризуються зносостійкістю вищою в 1,3 разу. Так, макрочастинки сприймають на себе навантаження під час тертя, а наночастинки зміцнюють матрицю, обмежуючи її пластичні деформації, та протидіють викришуванню макрочастинок;

- встановлено, що оплавленням покриттів системи Ni–SiC, які містять додатково бор, можна значно підвищити їх фізико-механічні властивості та зносостійкість. При цьому для оплавлення більш ефективним є застосування лазерної обробки, що дозволяє отримати підвищення зносостійкості до двох разів порівняно з термообробкою за пічного нагрівання у вакуумі та до п'яти разів порівняно з неоплавленими покриттями. Встановлено, що дискретно-оплавлені покриття зі створенням стовпчастої структури характеризуються найвищими триботехнічними властивостями та встановлено оптимальну площу оплавлення 25–40%. Порівняно із суцільно оплавленими покриттями зносостійкість таких покриттів у три рази вища.

**Практична цінність.** Розроблено та оптимізовано склад КЕП системи Ni–SiC з підвищеними триботехнічними властивостями за рахунок керування конструкцією та структурою покриттів, що працюють в умовах тертя ковзання без мастила. Обґрунтовано перспективність застосування КЕП, зміцнених нанопорошками, дискретною обробкою концентрованими джерелами енергії, використанням градієнтного підшару. Розроблені результати можуть бути застосовані до інших аналогічних систем композиційних покриттів. Практичне застосування результатів досліджень підтверджено актом виробничих випробувань, що проведені на Термогальванічному заводі (м. Київ).

Результати роботи використовуються в навчальному процесі під час читання курсу “Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів” у Національному авіаційному університеті.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, належать особисто здобувачу. Автору належать: обґрунтування мети, проведення наукових досліджень, обробка результатів та їх аналіз, підготовка статей до друку, участь у проведенні дослідно-промислової перевірки. Постановка завдання, обговорення отриманих результатів та формулювання основних висновків за темою роботи виконано спільно з науковим керівником.

У працях, виконаних із співавторами, особистий внесок здобувача полягає у виконанні теоретичних та експериментальних досліджень, обробленні результатів досліджень, обґрунтуванні отриманих результатів і формуванні висновків.

Автор висловлює вдячність та засвідчує своє визнання канд.техн.наук, старш.наук.співроб. М. В. Лучці (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України), який надавав консультації і підтримку під час виконання дисертаційної роботи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах і науково-технічних конференціях: V Міжнародній науково-технічній конференції студентів та молодих вчених “Політ-2004” (Київ, НАУ, 2004 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції “Авіа-2004” (Київ, НАУ, 2004 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “DSR-2004” (Тернопіль, ТДТУ, 2004.р.); V Міжнародній науково-технічній конференції студентів та молодих вчених “Політ-2005” (Київ, НАУ, 2005 р.); 7 Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, НУ “Львівська політехніка. 2005 р.); Міжнародній конференції “Современное материаловедение: достижение и проблемы „MMS-2005” (Київ, ІПМ НАН України, 2005 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції „Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів” (Запоріжжя, ЗНТУ, 2005 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції “Авіа-2006” (Київ, НАУ, 2006 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 15 друкованих робіт, з яких 7 статей у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України, 8 публікацій за матеріалами доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 95 найменувань і двох додатків. Роботу викладено на 174 сторінках, містить 62 рисунка, 14 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок роботи з науковими планами і темами, сформульовано мету дослідження, визначено завдання та способи їх розв'язання, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

**У першому розділі** проведено огляд та аналіз літературних джерел, у яких викладено основні теорії тертя та зношування і сучасні методи поверневого зміцнення деталей машин.

Зносостійкість конкретної деталі залежить від багатьох факторів. Якщо не змінювати зовнішні умови тертя і вид контакту, то вирішальну роль у підвищенні зносостійкості матеріалу відіграють його властивості та особливості структури: взаємне розташування, розмір, кількісне співвідношення і характер взаємодії окремих складових структури. Важливим є знання напружено-деформованого стану в матеріалі від дії навантаження, його залежності від структури і вплив на триботехнічні властивості.

На сьогодні формування на поверхні виробів гетерогенних покриттів із заданим комплексом функціональних властивостей найбільш доцільне для вирішення проблеми надійності та довговічності роботи машин і механізмів. Великі можливості для одержання гетерогенних покриттів має електrolітичний метод одночасного осадження металів або сплавів і дисперсних порошків різноманітних матеріалів через його технологічну простоту, економічність, у поєднанні з можливістю одержання щільних, гладких, рівномірних покриттів будь-якої контрольованої товщини на деталях складної конфігурації, можливість регулювання в широких межах хімічного складу та структурну будову. Показано, що для підвищення експлуатаційних властивостей деталей перспективним є створення багатошарових градієнтних композицій з формуванням комплексу властивостей на поверхні деталі, що не притаманні моношаровим покриттям.

На основі проведеного аналізу визначено мету та завдання дослідження.

**У другому розділі** обґрунтовано вибір матеріалів, описано експериментальні установки, зразки та методики досліджень.

Досліджувались КЕП Ni-SiC та Ni-SiC-B. Покриття наносились з хлористих електролітів нікелювання із введеними в них частинками другої фази на горизонтальний катод у режимі імпульсного перемішування, що дозволяє отримувати КЕП з необхідною кількістю наповнювача.

Термічну обробку покриттів проводили відпалом зразків у вакуумі за температур утворення евтектики 1100 °C на установці ОКБ 8086. Поверхневу термічну обробку концентрованими джерелами енергії проводили за допомогою безперервного CO<sub>2</sub> лазера "Латус-31".

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.

Кількість наповнювача в покриттях оцінювали методом хімічного та металографічного аналізу. Металографічний аналіз проводили за допомогою світлового мікроскопа Неофот-32 з адаптованою цифровою камерою та сканувального електронного мікроскопа JSM-840 фірми JEOL. Мікротвердість структурних складових вимірювали на приладі ПМТ-3. Модуль пружності вимірювали за допомогою приладу “Мікрон-гамма 09”, користуючись методами безперервного вдавнення індентора. Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили за допомогою енергодисперсійного спектрометра “Link 860/500” та програми DIGMAP. Фазовий склад покриттів після термічної обробки аналізували за допомогою рентгенівської установки ДРОН-1 в  $\text{Co-K}_\alpha$  випромінюванні. Оже-спектроскопія проводилася Оже-мікрозондом марки “JEOL” JAMP-10S.

**У третьому розділі** виконано аналітичні дослідження напружено-деформованого стану одно- та багат шарових градієнтних КЕП, навантажених силами тертя.

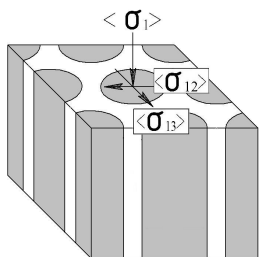


Рис. 1. Модель композиційного матеріалу і схема навантаження

Матеріал композиції моделювали безперервно-армованим середовищем (рис. 1). Така структура покриття формується під час термічної обробки КЕП концентрованими джерелами енергії за рахунок направленої кристалізації евтектик, що характеризуються дендритно-стовпчастою будовою.

Розрахунки напружено-деформованого стану показали, що максимальні напруження виникають у точці міжфазної межі, де відстань між включеннями мінімальна. У разі порівняння коефіцієнтів максимальних концентрацій напружень зсуву  $K_{1r}$  та стиску  $K_r$  останні будуть значно меншими і, відповідно, на напружений стан композиції більший вплив будуть справляти зсувні напруження. Максимальний коефіцієнт концентрації зсувних напружень обраховують за формулою

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

де  $\xi$  – об’ємний вміст наповнювача;  $G_m$  і  $G_f$  – модулі зсуву матриці та наповнювача.

Згідно з результатами розрахунків у композиційних матеріалах, якщо об’ємна частка включень становить 30–40 % локальні дотичні напруження у матриці будуть мінімальними. Зниження концентрації максимальних дотичних напружень зі зростанням кількості зміцнювальної фази на початку пов’язано зі збільшенням частки навантаження, що передається на вклю-



чення. Подальше (якщо об'ємна частка включень понад 40 %) підвищення напружень зумовлено взаємодією включень між собою та локальним зміцненням матриці. Таким чином, в умовах тертя краще застосовувати композиції, з об'ємною часткою 30–40 % зміцнювальних включень.

З метою формування вимог до створення градієнтних багатошарових покриттів були проведені дослідження їх напружено-деформованого стану на моделі пластини безконечної довжини і великої товщини, на поверхню якої нанесено одно- та багатошарові покриття з різним градієнтом зміни будови та властивостей по глибині (розрахунки проводили за 12 варіантами моделей системи “основа-покриття”) з її контактним навантаженням. Дослідження проводили числовими методами з використанням графової моделі напруженого тіла і пакета програм “Термопружність”, що був розроблений в Інституті проблем міцності НАН України. Моделі багатошарових покриттів являють собою КЕП з різним розміром і кількістю шарів (їх чередування) у покритті. Причому порядок слідування шарів у градієнтному підшарі від поверхні до основи, що характеризуються збільшенням розміру частинок та їх вмісту і, відповідно, механічних властивостей умовно будемо вважати “прямим” градієнтом будови і навпаки, якщо верхній шар має високі властивості, а в міру віддалення від поверхні розташовані шари з нижчими механічними властивостями – “обернений” градієнт.

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 по глибині, тому досліджувались 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 з властивостями, близькими до властивостей основи і збільшуються зі збільшенням різниці між властивостями основи та покриття. В багатошарових 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 по глибині для покриттів з різним градієнтом будови показано на рис. 2. При нанесенні верхнім шару з властивос-

тями, вищими ніж основи в покритті виникають значні дотичні розтяжні та стискальні напруження (рис. 2, *а* 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, *а* крива 5) і майже повністю зникають дотичні напруження розтягу (рис. 2, *а* крива 2), які найбільш небезпечні та прискорюють руйнування. Для багатошарових покриттів з “оберненим” градієнтом зменшуються дотичні напруження і нормальні розтяжні напруження, але збільшуються стискальні (рис. 2, *б* криві 3, 6). 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.

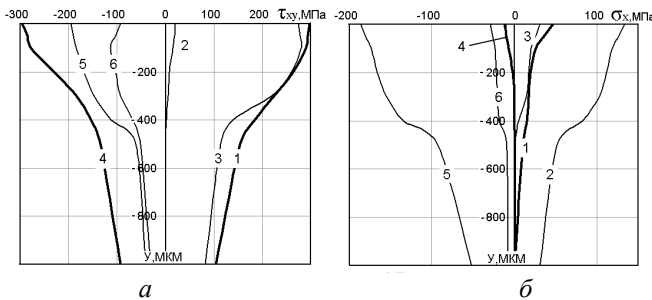


Рис. 2. Максимальні напруження  $\sigma_x$  та  $\tau_{xy}$  по глибині покриття при  $\mu = 0,9$ ; 1, 4 – відповідно розтяжні та стискальні напруження для одношарових покриттів; 2, 5 – багатошарових покриттів з “прямим” градієнтом; 3, 6 – багатошарових покриттів з “оберненим” градієнтом: *а* – дотичні напруження  $\tau_{xy}$ ; *б* – нормальні напруження  $\sigma_x$

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 дозволили сформулювати вимоги до формування покриттів з урахуванням їх напружено-деформованого стану для підвищення несучої здатності та довговічності за контактного навантаження шляхом 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 зменшуються небезпечні дотичні розтяжні напруження.

**У четвертому розділі** наведено закономірності формування КЕП із заданою структурою та встановлено взаємозв'язок фізико-механічних властивостей, структури, співвідношення частки твердих включень і металевої зв'язки, природи і розміру зміцнювальних частинок та їх вплив на зносостійкість композиції. Досліджено вплив градієнта структурної будови на зносостійкість багат шарових покриттів.

Досліджено вплив режимів і параметрів осадження таких як кількість частинок наповнювача в електроліті, їх розмір, густина струму, кислотності електроліту, температурного режиму, способу перемішування на структуру КЕП.

Триботехнічними дослідженнями встановлено, що на зносостійкість КЕП найбільший вплив має розмір частинок наповнювача та їх вміст у композиції.

Досліджувались нікелеві КЕП з наповнювачем SiC фракції 50 нм, менше 5, 28/20, 50/40 та 100/80 мкм. Установлено, що найвищою зносостійкістю характеризуються КЕП з частинками розміром 20-50 мкм (рис. 3), це зумовлюється, напевно, навантаженням, яке вони сприймають. Аналіз макро- і мікроструктур поверхонь тертя КЕП дозволяє стверджувати, що відносна поверхня дотику композиції зменшується зі збільшенням розміру частинок наповнювача. Для композицій, що містить частинки розміром 5 мкм та наночастинки, менших від розмірів одиночних плям контакту, основний внесок у зносостійкість робить нікелева матриця. На поверхні тертя спостерігаються сліди схоплювання, пластичної деформації. Для КЕП з наповнювачем фракції 100/80 мкм, відношення площ одиночної плями контакту і площі твердого включення збігаються з відносною площею дотикання, але на поверхні тертя мають місце сліди абразивного зношування вільними частинками наповнювача, або закріпленими (шаржированими в поверхню контртіла). Для композицій з частинками фракції 28/20 мкм відсутні процеси схоплювання, абразивного і крихкого руйнування не відбувається, а проходить нормальний механо-окиснювальний процес зношування і інтенсивність зношування порівняно з іншими покриттями при цьому менша.

Щодо зносу контртіла (рис. 3), то зі збільшенням розміру частинок наповнювача в покритті зношування зростає через те, що більші частинки можуть викришуватись та виконувати роль абразиву.

Досліджено вплив вмісту зміцнювальної фази на зносостійкість покриттів. Установлено, що існує оптимальна об'ємна частка зміцнювальної фази 20-25% (рис. 4) для частинок різного розміру за якого покриття характеризуються найвищою зносостійкістю.

Аналіз геометричних параметрів будови покриттів, показав, що для оптимальних складів композицій (об'ємна частка яких 20 – 25 %) для всіх розмірів включень спостерігається закономірність – відношення відстаней між центрами включень до їх діаметрів становить  $\geq 3$ .

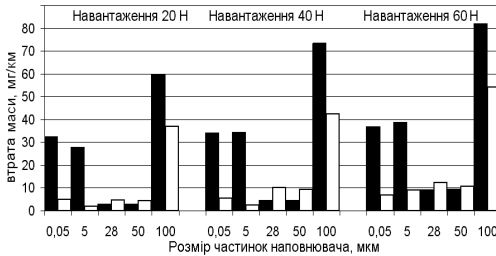


Рис. 3. Зносостійкість КЕП Ni–SiC залежно від розміру наповнювача:  
 ■ – знос зразка; □ – знос контртіла

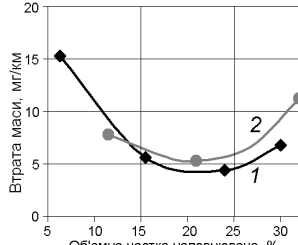


Рис. 4. Зносостійкість КЕП залежно від умісту наповнювача:  
 1 – з частинками фракції 28/20 мкм;  
 2 – з частинками фракції 100/80 мкм

Пояснити такі залежності можна тим, що за незначного вмісту об'ємної частки наповнювача в композиції (за меншої ніж 20 %) співвідношення зносостійкої фази до пластичної незначне. Основне навантаження припадає на нікелеву матрицю, відбувається процес її пластичного деформування та зношування. У такій кількості частинки не можуть ефективно підвищувати зносостійкість покриття і тому зношування відносно високе, хоча є в два рази нижчим від зношування гальванічного нікелю. Якщо об'ємна частка більша ніж 25 %, відстань між частинками буде невеликою (відношення відстаней між центрами включень до їх діаметрів менше за 3), пластична матриця не може ефективно витримувати навантаження і виникають великі внутрішні напруження (що узгоджується з теоретичними розрахунками), відбувається значне локальне зміцнення матриці, що призводить до зниження міцності композиції через утворення тріщин на ослаблених межах розділу частинки, які спричиняють їх викришування та руйнування покриття.

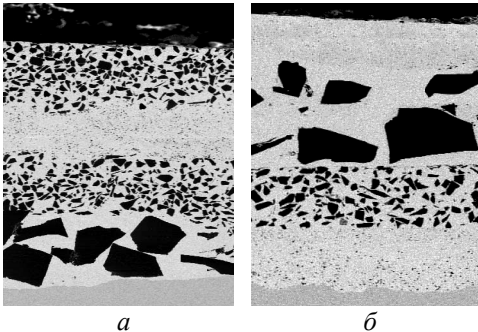


Рис. 5. Мікроструктури багатoshарових градієнтних КЕП,  $\times 100$ : *a* – “прямий” градієнт + шар з частинками фракції 28/20 мкм; *б* – “обернений” градієнт + шар з наночастинками 50 нм

На основі результатів аналітичних досліджень напружено-деформованого стану зроблено багатoshарові градієнтні покриття Ni–SiC (рис. 5) та проведено їх триботехнічні дослідження.

Зносостійкість для градієнтних КЕП з наночастинками для обох типів градієнта порів-

няно 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. 6), 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.

Таким чином, встановлено і експериментально підтверджено, що існує пряма залежність між напруженим станом багатшарових покриттів та їх зносостійкістю. Нанесення покриттів на градієнтний підшар сприяє кращому розподілу напружень та підвищенню несучої здатності покриття.

У п'ятому розділі досліджено вплив модифікування нанорозмірними частинками нікелевої матриці КЕП на їх зносостійкість. Показано, що в разі введення в композицію наночастинок відбувається дисперсне зміцнення матеріалу матриці, обмеження її пластичної течії, підвищення мікротвердості композиту. Проте зносостійкість підвищується при цьому несуттєво. З метою підвищення зносостійкості в пластичну нікелеву матрицю були введені одночасно частинки SiC двох фракцій: наночастинок (близько 50 нм) та макрочастинок (28/20 мкм). При цьому кожен вид наповнювача виконує в композиції свою роль. Так завдяки введенню наночастинок відбувається дисперсне зміцнення матриці та підвищення її механічних властивостей (модуль пружності матриці збільшується до  $2,07 \cdot 10^5$  МПа), а макрочастинок сприймають контактні навантаження у процесі тертя та роблять основний внесок в зносостійкість такого композиту. Композиції з макро- та наноаповнювачем характеризуються підвищенням зносостійкості в 1,3 разу порівняно з КЕП, що містять наповнювач фракції 28/20 мкм та мають на порядок більшу зносостійкість ніж КЕП, зміцнені лише наночастинками. Серед іншого, підвищення зносостійкості пояснюється виникненням менших напружень, оскільки згідно з рекомендаціями даних при виконанні аналітичних розрахунків, зі зменшенням різниці між механічними власти-

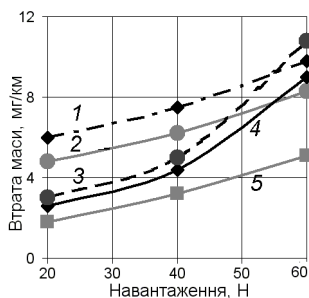


Рис. 6. Зносостійкість градієнтних КЕП:

1 – “прямий” градієнт + шар з наночастинками; 2 – “обернений” градієнт + шар з наночастинками; 3 – “обернений” градієнт + шар з частинками 28 мкм; 4 – одношарове покриття з частинками 28 мкм; 5 – “прямий” градієнт + шар з частинками 28 мкм

востями матриці та наповнювача, будуть виникати менші напруження.

Під час вивчення впливу термічної обробки на зносостійкість встановлено, що оплавленням КЕП Ni+SiC, які містять додатково бор, суттєво підвищуються їх фізико-механічні властивості та зносостійкість.

Порівняно з неоплавленими покриттями зносостійкість покриттів після вакуумного відпалу за температури 1095 °С підвищується в 1,5 – 2 рази за рахунок утворення евтектики Ni-Ni<sub>3</sub>B, яка являє собою своєрідний твердий каркас, в проміжках якого розташована пластична складова (твердий розчин бору в нікелі). Фазовим рентгеноструктурним аналізом встановлено дві фази – Ni та борид – Ni<sub>3</sub>B. Утворена евтектика має мікротвердість  $H_{\mu} = 6,4 - 7,2$  ГПа, пластична складова покриття –  $H_{\mu} = 3,5 - 4,6$  ГПа.

Проведені експериментальні дослідження структуроутворення і триботехнічних властивостей КЕП після лазерної обробки показали, що застосування лазера для оплавлення з формуванням стовпчастих структур більш ефективно підвищує зносостійкість КЕП. Стовпчасту структуру на мікрорівні одержували за рахунок великих швидкостей нагрівання та охолодження за направленої кристалізації евтектики Ni-Ni<sub>3</sub>B від основи до поверхні. На макрорівні стовпчасту будову (двовимірну – оплавлення точками – рис. 7, а, або одновимірну – оплавлення смугами – рис. 7, б) отримували дискретною обробкою при фокусуванні пучка лазера на поверхні з оплавленням на глибину. При цьому евтектика, отримана при лазерному оплавленні, має значно вищу твердість  $H_{\mu} = 10 - 12$  ГПа.

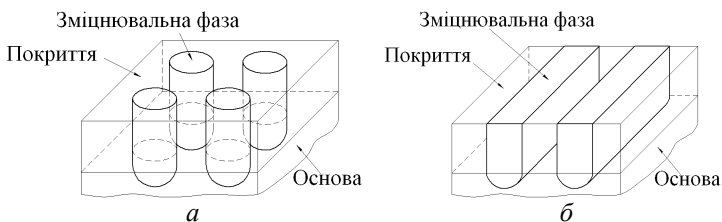


Рис. 7. Дискретно оброблені КЕП за допомогою лазера:  
а – точковим оплавленням; б – оплавленням смугами

Зносостійкість КЕП Ni+SiC+B за суцільного лазерного оплавлення підвищується у 1,7 разу порівняно з термообробкою при пічному нагріванні в вакуумі (рис. 8), що пояснюється більш дисперсною структурою оплавлених покриттів (евтектик та боридів) та їх більш високою твердістю.

Для дискретно-оплавлених покриттів площа оплавлення становила 15, 25 та 45% (у разі точкової обробки) і 20, 40 та 60% (у разі оплавлення смугами). Визначено, що дискретно-оплавлені покриття характеризуються вищими триботехнічними властивостями (рис. 8) та встановлено оптимальну площу оплавлення 25 – 40%, за якої зносостійкість буде найвищою. Порівня-

но із суцільно оплавленими лазером покриттями більш ефективно підвищується зносостійкість при оплавленні точками (зносостійкість підвищується до трьох разів), ніж смугами (зносостійкість підвищується в 1,3 разу).

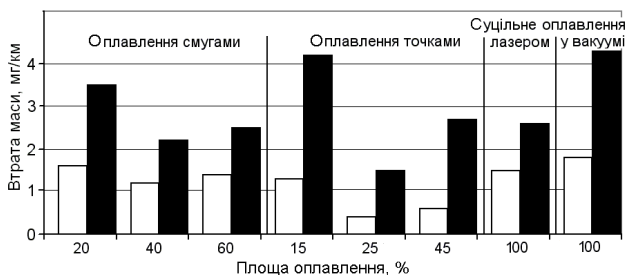


Рис. 8. Зносостійкість оплавлених КЕП залежно від площі оплавлення:  
□ – навантаження 20 Н; ■ – навантаження 60 Н

Більш висока зносостійкість дискретно-оплавлених покриттів порівняно з повністю оплавленими забезпечується сприятливим поєднанням пластичних властивостей покриттів у вихідному стані та високої твердості і зносостійкості оплавлених ділянок з евтектичною структурою. Так, за великої площі оплавлення через високу твердість та крихкість покриттів у ньому можуть виникати тріщини в результаті дії сил поверхневого натягу в момент кристалізації із рідкого стану розплавленої ділянки покриття. Для покриттів з незначною площею оплавлення м'яка пластична матриця не може ефективно сприймати навантаження під час тертя і буде руйнуватись.

Щодо зносу контртіла під час тертя в парі з оплавленими покриттями, то найбільший знос контртіла буде в парі з повністю оплавленими покриттями, причому більше зношується контртіло у парі з покриттями, оплавленими у вакуумі. Це можна пояснити тим, що в парі з такими покриттями коефіцієнт тертя буде найбільшим і можливі процеси схоплення, чого не спостерігається у разі оплавлення покриттів лазером. Зі зменшенням площі оплавлення знос контртіла буде зменшуватись і найменшим він буде за мінімальної площі оплавлення.

Проведені дослідження хімічного складу поверхонь тертя методами мікрорентгеноспектрального та оже-спектроскопії показали наявність великої кількості заліза, нікелю та кисню (рис. 9, а), які утворюють відповідні оксиди  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{NiO}$ . Також у покритті наявний бор, який з досягненням відповідних умов здатний утворювати з киснем оксид  $\text{B}_2\text{O}_3$ , що має високі механічні властивості. Утворення на поверхні тертя плівок вторинних структур, які складаються з оксидів, поліпшує умови тертя та зменшує можливість абразивного руйнування матеріалу. Поверхня тертя досить гладка і характеризується пелюстково-плівковою структурою (рис. 9, б).

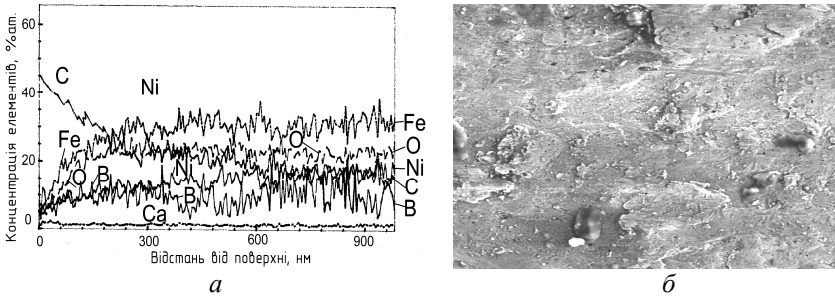


Рис. 9. Аналіз поверхні тертя оплавлених КЕП:  
 а – результати оже-спектроскопії; б – поверхня тертя,  $\times 600$

Узагальнивши дані по зносостійкості досліджених покриттів (рис. 10), відзначимо, що серед неоплавлених покриттів найвищою зносостійкістю характеризуються градієнтні багатoshарові покриття, особливо за високих навантажень, але такі покриття інтенсивно зношують контртіло. Оскільки складові покриття інертні до дії температур їх можна рекомендувати до застосування у важконавантажених вузлах тертя, які працюють при підвищених температурах і де потрібна максимальна зносостійкість однієї деталі. Якщо вимагається мінімальне зношення пари тертя, то кращим є покриття з макро- та нанопоповнювачем, які характеризуються мінімальним сумарним ваговим зносом.

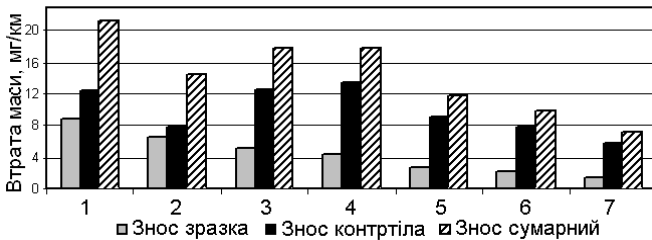


Рис. 10. Зносостійкість КЕП за навантаження 60 Н:

1 – покриття з частинками 28 мкм; 2 – покриття з макро- та наночастинками; 3 – багатoshарові покриття “прямий” градієнт + шар з частинками 28 мкм; 4 – суцільно оплавлені в вакуумі покриття; 5 – суцільно оплавлені лазером покриття; 6 – дискретно-оплавлені смугами покриття (40%); 7 – дискретно-оплавлені точками покриття (25%)

Серед оплавлених покриттів найменше зношення як зразка, так і контртіла для дискретних покриттів оплавлених точками, вони характеризуються найнижчим коефіцієнтом тертя. Такі покриття можна рекомендувати для застосування у вузлах тертя, що працюють за високих швидкостей та навантажень в умовах тертя без змачення.



## ВИСНОВКИ

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень у дисертації вирішено важливе науково-технічне завдання – розроблення градієнтних електролітичних покриттів на нікелевій основі з керованими триботехнічними властивостями:

1. На підставі аналітичних розрахунків напружено-деформованого стану КЕП, навантажених силами тертя, встановлено, що композиції, які містять 30 – 40 % об’ємних часток зміцнювальних включень, мають мінімальні локальні дотичні напруження у матриці. Показано, що для композиційних матеріалів, у яких механічні властивості компонентів і матриці близькі, концентрація напружень зменшується зі збереженням характеру її зміни від умісту зміцнювальної фази. Вищими механічними властивостями характеризуються покриття із стовпчастою будовою зміцнювальних фаз.

2. Проведено дослідження напружено-деформованого стану багатошарових композицій. Показано, що максимальні напруження, як дотичні, так і нормальні, зосереджуються у верхньому шарі і в міру віддалення від поверхні поступово зменшуються; у багатошарових покриттях максимальні напруження виникають на поверхні та в шарі з найвищими механічними властивостями; зі збільшенням коефіцієнта тертя  $\mu$  збільшуються дотичні напруження та нормальні напруження розтягу. Встановлено, що із нанесенням покриттів на градієнтний підшар відбувається значний перерозподіл напружень та їх зменшення. Найменшими напруженнями характеризуються покриття нанесені на градієнтний підшар з “прямим” градієнтом властивостей.

3. Дослідженнями впливу кількості та розміру частинок наповнювача на триботехнічні властивості покриттів встановлено, що найвищою зносостійкістю характеризуються нікелеві КЕП з наповнювачем фракції 28/20 мкм, об’ємна частинка якого становить 20 – 25 %. За такого вмісту наповнювача відношення міжцентрової відстані частинок до їх розміру  $L/d$  становить  $\geq 3$ . При  $L/d < 3$  внаслідок зменшення відстані між частинками (об’ємна частка більше 40 %) відбувається значне локальне зміцнення матриці, що призводить до зниження міцності композиції через утворення тріщин на ослаблених межах розділу частинка – частинка. Якщо  $L/d \gg 3$ , то зміцнення буде не суттєвим і  $\langle \sigma_1 \rangle / \langle \sigma_{пл} \rangle_m$  наближується до одиниці.

4. Установлено вплив структурного градієнта на зносостійкість КЕП. 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 дисперсією 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.

5. Уперше встановлено, що ефективним щодо підвищення зносостійкості КЕП є введення у пластичну нікелеву матрицю одночасно частинок SiC двох фракцій: наночастинки (близько 50 нм) для дисперсного зміцнення матриці та макрочастинки (28/20 мкм). Зносостійкість таких композицій в 1,3 разу вища, ніж покриттів з частинками фракції 28/20 мкм та на порядок більша ніж у КЕП зміцнених лише наночастинками.

6. Установлено, що термічна обробка КЕП складу Ni+B+SiC значно підвищує їх триботехнічні властивості завдяки отриманню в покриттях включень боридів Ni<sub>3</sub>B та евтектики Ni–Ni<sub>3</sub>B, особливо за високих навантажень. Показано, що введення частинок SiC значно підвищує зносостійкість оплавлених КЕП порівняно з покриттями складу Ni+B.

7. Показано, що порівняно з покриттями, оплавленими у вакуумі, лазерна обробка покриттів значно підвищує їх триботехнічні властивості за рахунок більшої дисперсності структурних складових, що характеризуються вищими механічними властивостями. Визначено, що дискретно-оплавлені покриття зі створенням структури стовпчастого типу характеризуються вищими триботехнічними властивостями та встановлено оптимальну площу оплавлення 25 – 40%. Порівняно з суцільно оплавленими покриттями зносостійкість таких покриттів у три рази вища.

8. Розроблені КЕП Ni+SiC у міру зростання їх зносостійкості розміщуються таким чином: одношарові покриття із включеннями фракції 28/20 мкм; покриття із співосадженими макро- та наночастинками; покриття з частинками фракції 28/20 мкм нанесені на підшар з “прямим” градієнтом будови; термічно оброблені покриття Ni+B+SiC у разі їх суцільного оплавлення у вакуумі, лазером та дискретним оплавленням смугами і точками.

9. Результати виконаних досліджень дозволили розробити необхідні рекомендації щодо формування КЕП з високими триботехнічними властивостями. Виробничі випробування технологічного процесу зміцнення і відновлення деталей КЕП системи Ni–SiC виконано без зауважень і показали підвищення довговічності в 1,5 –2 рази порівняно із заводською технологією виготовлення. Результати роботи використовуються в навчальному процесі при читанні курсу “Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів” у Національному авіаційному університеті.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Вплив структури на закономірності припрацювання евтектичних сплавів / М. В. Кіндрачук, М. Е. Кульгавая, А. О. Корнієнко, Г. К. Веласкес // Проблеми трибології. – 2004. – № 3,4. – С. 113–117.

2. Закономірності кавітаційного зношування сформованих концентрованими джерелами енергії евтектичних покриттів / М. В. Кіндрачук, А. О. Корнієнко, В. В. Постернак та ін. // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2005. – № 1. – С. 42–48.

3. Кіндрачук М.В., Лучка М.В., Корнієнко А.О. Експериментально-аналітичні дослідження триботехнічних характеристик покриттів матрично-наповненого типу // Проблеми трибології. –2005. – № 2. – С. 74–80.

4.Формування зносостійких композиційних електролітичних покриттів, зміцнених наночастинками карбиду кремнію / М. В. Кіндрачук, М. В. Лучка, А. О. Корнієнко, Я. П. Замора // Металознавство та обробка металів. –2005. – № 2. – С. 3-8.

5.Напружено-деформований стан композиційного матеріалу, навантаженого силами тертя та температурою / М. В. Кіндрачук, А. О. Корнієнко, С. В. Федорчук, О. В. Тісов // Проблеми трибології. –2006. – № 1. – С. 153–157.

6.Формування метастабільності та триботехнічних властивостей евтектичних покриттів термоциклічною обробкою / М. В. Кіндрачук, Д. І. Мансур, С. В. Федорчук, А. О. Корнієнко // Технологічні системи. – 2006. – №2. – С. 59–63.

7.Корнієнко А. О. Разработка износостойких композиционных электролитических покрытий с использованием дискретной обработки лазером // Проблеми тертя та зношування. – 2006. – Вип. №46. – С. 185–192.

8.Корнієнко А. О., Бівойно Т. П. Вплив складу та структури композиційних електролітичних покриттів на зносостійкість вуглецевої сталі // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих учених “Політ-2004” (15–16 квітня 2004 р.). – К.: НАУ, 2004. – С. 18.

9.Формування зносостійких композиційних покриттів з урахуванням їх напружено-деформованого стану / М. В. Кіндрачук, М. В. Лучка, А. О. Корнієнко, Я. П. Замора // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції “Авіа-2004”, т. 3 (26–28 вересня 2004 р.). – К.: НАУ, 2004. – С. 36.27–36.3.

10.Закономірності кавітаційного зношування сформованих концентрованими джерелами енергії евтектичних покриттів / М. В. Кіндрачук, А. О. Корнієнко, В. В. Постернак та ін. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції “DSR-2004” (4–7 жовтня 2004 р.). – Тернопіль: Терноп. держ. техн. ун-т, 2004. – С. 355–360.

11.Корнієнко А.О. Інженерія та трибологічні властивості одно- та багатощарових композиційних електролітичних покриттів // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих учених “Політ-2005 (12–13 травня 2005 р.). – К.: НАУ, 2005. – С. 6.

12. Кіндрачук М. В., Лучка М. В., Корнієнко А. О. Формування зносостійких композиційних електролітичних покриттів градієнтного типу // Матеріали 7 міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові (18-20 травня 2005 р.). – Л.: “Львівська політехніка”, 2005. – С. 118–119.

13.Трибоінженерія композиционных электролитических покрытий градиентного типа / А. А. Корниенко, М. В. Киндрачук, М. В. Лучка та ін.// Тезиси докладов международной конференции „Современное материало-

ведение: достижение и проблемы „MMS-2005” (26-30 вересня 2005 р.). – К.: ІПМ НАНУ, 2005. – С. 530–531.

14. Кіндрачук М. В., Корнієнко А. О. Формування композиційних електролітичних покриттів системи Ni-SiC // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції “Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів” (20-22 вересня 2005 р.). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – С. 28–30.

15. Федорчук С. В., Корнієнко А. О., Тісов О. В. Формування напружено-деформованого стану та нестационарних термічних полів у композиційному матеріалі при терті // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції “Авіа-2006”, т. 2 (25–27 вересня 2006 р.). – К.: НАУ, 2006. – С. 3.132–3.135.

Особистий внесок здобувача в публікаціях: у працях [1; 2; 6; 10] – проведення випробувань на тертя та зношування та металографічних досліджень; у працях [3; 4; 8; 9; 13; 14] – нанесення композиційних електролітичних покриттів, проведення випробувань, обробка результатів, виконання металографічних дослідження та формулювання висновків; у працях [5; 15] – проведення розрахунків напружено-деформованого стану композиційних покриттів та обробка результатів.

## АНОТАЦІЯ

**Корнієнко А. О. Формування триботехнічних властивостей композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю створенням градієнтних структур.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Національний авіаційний університет, Київ, 2007.

Дисертацію присвячено розробленню градієнтних композиційних електролітичних покриттів зміцнених макро- та наночастинками з керованими триботехнічними властивостями. Проведено аналітичні дослідження напружено-деформованого стану одно- та багатошарових градієнтних КЕП, навантажених силами тертя. Експериментально встановлено оптимальні щодо зносостійкості будову та режими нанесення КЕП Ni-SiC. Визначено вплив кількості та розміру частинок наповнювача на триботехнічні властивості покриттів. Проведенням експериментальних досліджень впливу градієнта будови КЕП на триботехнічні властивості встановлено, що більш високою зносостійкістю характеризуються градієнтні КЕП з “прямим” градієнтом будови, що узгоджується з теоретичними розрахунками напружено-деформованого стану. Дослідженнями встановлено, що із введенням одночасно макро- та наночастинок в КЕП значно підвищується зносостійкість таких покриттів. Показано, що оплавленням покриттів Ni-SiC, які містять додатково бор, мо-

жна значно підвищити їх фізико-механічні властивості та зносостійкість. При цьому для оплавлення більш ефективним є застосування лазера, а створення дискретно-опалених покриттів дозволяє отримати значно вищі триботехнічні властивості порівняно з повністю оплавленими покриттями.

**Ключові слова:** композиційні електролітичні покриття, напруження, термічна обробка, зносостійкість, градієнтні покриття.

## АНОТАЦІЯ

**Корниенко А. А. Формирование триботехнических свойств композиционных электролитических покрытий на основе никеля созданием градиентных структур. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и изнашивание в машинах. – Национальный авиационный университет, Киев, 2007.

Диссертация посвящена разработке градиентных композиционных электролитических покрытий упрочненных макро- и наночастицами с управляемыми триботехническими свойствами. Разработаны и оптимизированы состав КЕП Ni-SiC с повышенными триботехническими свойствами за счет управления конструкцией и структурой покрытий, которые работают в условиях трения скольжения без смазки. Обоснована перспективность применения КЕП упрочненных нанопорошками, дискретной обработкой концентрированными источниками энергии, использованием градиентного подслоя.

Проведены аналитические исследования напряженно-деформированного состояния одно- и многослойных градиентных КЕП, нагруженных силами трения. Показано, что величиной напряжений в контактной зоне и по глубине покрытия можно управлять путем изменения конструкции и физико-механических характеристик покрытий.

Установлены оптимальные строение и режимы нанесения КЕП Ni-SiC. Изучено влияние количества и размера частиц наполнителя на триботехнические свойства покрытий. Наивысшей износостойкостью характеризуются никелевые КЕП с частицами SiC фракции 28/20 мкм, объемная доля которых составляет 20 – 25 %.

Проведены экспериментальные исследования влияния градиента структуры КЕП на триботехнические свойства. Установлено, что более высокой износостойкостью характеризуются градиентные КЕП с “прямым” градиентом строения, т.е. от основы композиционные слои размещаются в порядке уменьшения содержания и размера наполнителя и верхним наносится наиболее износостойкий слой (с включениями SiC фракции 28/20 мкм), что согласуется с теоретическими расчетами напряженно-деформированного состояния. Износостойкость таких градиентных КЕП повышается в 1,5 раза в сравнении с аналогичными однослойными покрытиями.

Показана роль и влияние совместно осажденных макро- и наночастиц на комплекс физико-механических и триботехнических свойств. Композиционные электролитические покрытия, содержащие кроме макроапполнителя также наночастицы, характеризуются повышением износостойкости в 1,3 раза, при этом макроапполнители воспринимают на себя основные нагрузки при трении, а наночастицы укрепляют матрицу, ограничивая ее пластические деформации и противодействуют выкрашиванию макроапполнителей.

При изучении влияния термической обработки на износостойкость КЕП установлено, что оплавлением покрытий Ni-SiC, которые содержат дополнительно бор, можно значительно повысить их физико-механические свойства и износостойкость (в сравнении с неоплавленными покрытиями износостойкость таких покрытий повышается в 2,6 раза). При этом для оплавления более эффективным является использование лазера, что позволяет увеличить износостойкость в 2 раза. Установлено, что дискретно-оплавленные покрытия имеют более высокие триботехнические свойства в сравнении с полностью оплавленными покрытиями. Максимальной износостойкостью характеризуются покрытия с площадью оплавления 25–40%. Определено, что более эффективным является проведение дискретной обработки в импульсном режиме с созданием структуры покрытия столбчатого типа. Такие покрытия характеризуются повышением износостойкости в 3 раза в сравнении с полностью оплавленными покрытиями.

Результаты работы могут быть применены к другим аналогичным системам композиционных покрытий. Практическое применение результатов исследований подтверждается актом производственных испытаний, проведенных на Термогальваническом заводе (г. Киев). Результаты работы используются в учебном процессе при чтении курса “Материаловедение и технология конструкционных материалов” в Национальном авиационном университете.

## ABSTRACT

Kornienko A.A. Forming of tribotechnical properties of composition electrolytic coatings on the basis of nickel by creation of gradient structures. – Manuscript.

Thesis for a scientific degree of the Candidate of Sciences, Specialty 05.02.04 – Friction and Wear in Machines. National Aviation University, Kiev, 2007.

Thesis is aim at development of gradient composition electrolytic coatings hardened by macro- and nanoparticles with the guided tribotechnical properties. Analytical researches of the tensely deformed state of single- and multi-layered gradient CEC loaded with forces of friction are conducted. The optimum structure and parameters process of CEC Ni-SiC are experimentally established in relation to wearproofness. Influencing of amount and size of particles of stuff on tribotechnical property of coatings is determined. Experimental researches of influencing of gradient of structure of CEC are conducted on tribotechnical

property. It is established that the higher wearproofness is characterize gradient CEC with the “direct” gradient of structure, that conforms to the theoretical calculations of the tensely deformed state. Researches is established, introduction simultaneously of macro- and nanoparticles into CEC raise wearproof of such coatings. It is established, meltback of coatings Ni-SiC, which contain the boron additionally, it is possible considerably to raise their physical-mechanical properties and wearproofness. Thus for meltback more effective is application of laser, and the creation of discretely meltback coatings allows to get considerably higher tribotechnical properties comparatively with fully meltback coatings.

**Key words:** composition electrolytic coatings, tensions, heat treatment, wearproofness, gradient coatings.

Підп. до друку 16.03.07. Формат 60×84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25  
Тираж 100 пр. Замовлення №73-1. Вид. №16/IV

Видавництво НАУ  
03680, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002