

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Гуменюк Ігор Анатолійович



УДК 621.891

**ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
СТАЛІ 12Х18Н10Т, ПОВЕРХНЕВО МОДИФІКОВАНОЇ
КОМБІНОВАНИМИ ПОКРИТТЯМИ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах
Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мнацаканов Рудольф Георгійович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри технологій виробництва та
відновлення авіаційної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Диха Олександр Володимирович,
Хмельницький національний університет,
завідувач кафедри зносостійкості і
надійності машин

кандидат технічних наук, доцент
Савчук Анатолій Миколайович,
Національний транспортний університет,
доцент кафедри виробництва, ремонту та
матеріалознавства

Захист дисертації відбудеться «25» жовтня 2018 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 11, ауд. 220.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 8.

Автореферат розісланий «__» вересня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., с.н.с.



О. Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасних технологій машинобудування, ставить високі вимоги до працездатності деталей машин, інструментів та продуктивності праці з урахуванням їх специфічних умов роботи. Розв'язання цієї задачі полягає у формуванні комплексу високих експлуатаційних характеристик поверхні матеріалів за рахунок зміни її складу і структури. Шляхи вирішення даної задачі дають можливість створення нових захисних покриттів з наперед заданими структурою і властивостями комбінованими методами обробки. На сьогодні корозійностійкі сталі є важливим класом конструкційних матеріалів, які знайшли широке використання у різних галузях промисловості: хімічній, нафтохімічній, аерокосмічній, атомній енергетиці, біомедицині тощо. Такий спектр застосування зумовлений хорошою пластичністю, зварюваністю і високим опором корозії, перш за все сталей аустенітного класу, до якого відноситься сталь 12X18H10T. Однак через низьку твердість, яка обумовлює незадовільну зносостійкість, суттєво обмежується область можливого використання таких матеріалів. При підвищенні зносостійкості поверхневих шарів без впливу на корозійну стійкість основи з'являється можливість покращити матеріал з високим комплексом вказаних властивостей. Дослідження в цьому напрямку мають обмежений характер.

Тому важливим напрямком в удосконаленні методів поверхневого зміцнення сталей цього класу є науково-обґрунтований пошук сучасних, прогресивних та малозатратних методів поверхневого зміцнення дискретними і градієнтними покриттями, впровадженню яких передують моделювання роботи трибовузлів, встановлення впливу зовнішніх чинників на їх працездатність, вивчення процесів, що розвиваються на поверхнях тертя.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертації пов'язана з науковими дослідженнями кафедри технологій виготовлення та відновлення авіаційної техніки і кафедри машинознавства Національного авіаційного університету і виконана як складова частина досліджень за бюджетними темами: «Фізико-технологічні основи комбінованих методів формування зносостійких покриттів на титанових сплавах деталей авіаційної техніки» (№ ДР 0114U001604); «Наукові основи створення сучасних технологій інженерії поверхні деталей з титанових сплавів авіаційних трибомеханічних систем» (№ ДР 0117 U004330).

Мета і завдання дослідження. *Метою дисертаційної роботи* є підвищення зносостійкості аустенітної корозійностійкої сталі 12X18H10T шляхом створення та нанесення комбінованих покриттів дискретного і градієнтного типу на основі встановлення закономірностей впливу їх структурно-фазового та хімічного складу, фізико-механічних властивостей та параметрів структури на триботехнічні характеристики.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

- встановити закономірності зношування сталі 12X18H10T з багатокомпонентним градієнтним хромоалітованим покриттям;
- розробити евтектичний сплав для електродів і дослідити вплив відпалювання електроіскрових покриттів на формування їх термодинамічно нерівноважної структури та процеси тертя та зношування;
- встановити закономірності структуроутворення та зношування при азотуванні попередньо дискретно обробленої лазером сталі 12X18H10T;
- теоретично та експериментально дослідити закономірності формування перехідної зони між твердим наповнювачем і м'якою матрицею при хромуванні композиційних електролітичних покриттів (КЕП) та її впливу на напружено-деформований стан та зносостійкість;
- на основі енергетичної моделі дослідити умови руйнування та механізм зношування композиційних електролітичних покриттів;
- на основі багатокритеріальної оптимізації технологічного процесу розробити градієнтне покриття з високою пропрацьованістю і зносостійкістю та встановити механізм його зношування.

Об'єкт дослідження – процеси тертя та зношування сталі 12X18H10T, поверхнево модифікованої комбінованими дифузійними, електроіскровими та композиційними електролітичними покриттями дискретного та градієнтного типів.

Предмет дослідження – закономірності впливу структурно-фазового та хімічного складу, фізико-механічних властивостей і параметрів дискретної та градієнтної структури на триботехнічні характеристики сталі 12X18H10T, обробленої комбінованими методами.

Методи та методика досліджень. Для формування зносостійких поверхневих шарів на сталі 12X18H10T було використано комбіновані методи лазерної обробки (ЛО), хіміко-термічної обробки, електроіскрового легування та електролітичного осадження. Дослідження мікроструктури, визначення фазового та хімічного складу зміцнених поверхневих шарів здійснювалися мікроструктурним, рентгеноструктурним і рентгеноспектральним методами. Механічні властивості поверхневих шарів визначали дюрOMETричними методами. Методи інженерної механіки використовувалися для дослідження залишкових напружень, мікротвердості, триботехнічних властивості сталі 12X18H10T з комбінованими покриттями в умовах тертя ковзання. Методи багатofакторного планування експерименту та математичної статистики – для обробки результатів досліджень та виконання оптимізації технологічного процесу нанесення градієнтного електролітичного покриття з боридним і карбідним наповнювачами.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Досліджені фазовий та хімічний склади, структура та мікротвердість хромоалітованого покриття на сталі 12X18H10T. Встановлено, що процес

зношування композиції «сталь-покриття» контролюється градієнтною структурою багатокомпонентного покриття з фазовими складом Al (Fe, Cr), Al(Fe, Ni) та Fe α (Al, Cr, Ni). Зносостійкість сталі 12X18H10T з покриттям зростає в порівнянні з вихідною у 1,5–2,5 рази.

2. Встановлено, що відпал електроіскрових евтектичних покриттів з дисперсною термодинамічно нерівноважною структурою призводить до створення різного ступеня нерівноважних станів та до зміни механізму їх зношування і триботехнічних властивостей, що дозволяє підібрати раціональні параметри сполученої пари в різних умовах тертя.

3. З метою створення зносостійких поверхневих шарів розроблені технологічні процеси і досліджені особливості структуроутворення при азотуванні попередньо обробленої лазером сталі 12X18H10T. Показано, що зміни структурного складу азотованого шару дозволяють зменшувати крихкість і пористість ϵ -фази, підвищити концентрацію азоту в α -N – і γ' - фазах. Встановлено, що існує оптимальний, з погляду зменшення інтенсивності зношування, вміст зміцнених ділянок, що становить 30–40%, що узгоджується з аналітичними розрахунками напружено-деформованого стану.

4. Вперше експериментально та теоретично доведено, що дифузійне насичення композиційних електролітичних покриттів хромуванням утворює перехідну зону між твердими включеннями та м'якою матрицею, зменшуючи напруження при терті, що узгоджується з аналітичними дослідженнями напружено-деформованого стану.

5. Вперше на основі енергетичної моделі трибопроцесу виконано аналітичне дослідження умов утворення частинок зносу в процесі фрикційного руйнування поверхневих шарів. Визначено, що умова руйнування покриття в процесі тертя визначається його механічними властивостями і досягається швидше для частинок зносу більших розмірів $d \sim \gamma/E$. Розмір частинок зносу менший у випадку матеріалу з більшою твердістю (з великим значенням E), але більший – у матеріалу з більшою міцністю (великі значення γ). За зростанням тривалості проміжку часу до настання процесу руйнування поверхні та підвищення зносостійкості покриття можна розташувати в наступний ряд: Ni-SiC \rightarrow Ni-TiB $_2$ \rightarrow Ni-WC.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Застосовуючи енергетичний підхід до оцінювання зносостійкості поверхневих шарів за умов їх руйнування при терті розроблено технологічний процес формування градієнтного покриття з високою припрацьованістю і зносостійкістю, що обумовлено забезпеченням виконання правила додатного градієнта механічних властивостей. Максимальну зносостійкість мають градієнтні покриття, що містять у зовнішній частині верхнього шару гранули WC діаметром 1–5 мкм. При зменшенні розміру гранул до 0,5 мкм зникає ефект макрозміцнення покриття. Збільшення розміру гранул порошку WC зверх 5 мкм

також знижує зносостійкість, що обумовлено зменшенням вмісту включень в підшарі, зниженням його механічних властивостей, зокрема пластичності.

2. Розроблено спосіб формування дискретних азотованих покриттів (патент № 100638 України на корисну модель) з підвищеною зносостійкістю;

3. Розроблено зносостійкий евтектичний сплав на основі заліза для нанесення електроіскрових покриттів (патент № 102244 України на корисну модель);

4. Розроблене градієнтне покриття (наповнювач WC) з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю (патент № 125389 України на корисну модель).

Триботехнічні випробування в умовах тертя ковзання без змащування показали збільшення зносостійкості в 2,3 рази в порівнянні зі сталлю 12X18H10T з покриттям (наповнювач SiC) і в 9,5 рази в порівнянні зі сталлю без покриття.

Одержані в роботі практичні результати пройшли апробацію і прийняті до впровадження на підприємствах ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор» та ДП «Завод 410 цивільної авіації»; результати дисертаційної роботи використовуються у процесі підготовки докторів філософії галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності: 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Тертя та зношування в машинах» на кафедрі машинознавства НАУ.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи одержані автором особисто. Роботи, виконані разом, зі співавторами, наведені в переліку публікацій. З робіт, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Наукові результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: міжнародній науково-практичній конференції [«Ольвійський форум»], (м. Миколаїв, 2014р., 2016 р.); Восьмій міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів (м. Київ, 2015р.); 6-тій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування (м. Херсон, 2015 р.); 7-мій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (м. Херсон, 2016 р.); міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6» за підтримки «MMATENG» проекту, інженерно-фізичного факультету НТУУ «КПІ» (м. Київ, 2016р.); The seventh world congress “Aviation in the XXI-st century” (м. Київ, 2016 р.); Науково-технічній конференції студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології» (м. Київ, 2017 р.); Одинадцятій міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів (м. Київ, 2018).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалася на засіданні науково-технічного семінару зі спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах 13 червня 2018 р., протокол № 29.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі: 8 праць у фахових виданнях переліку МОН України, які включені до міжнародних науко-метричних баз даних; 2 у закордонних періодичних виданнях; 3 патенти України на корисну модель; 7 матеріалів та тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків та двох додатків. Повний обсяг дисертації становить 201 сторінку. Обсяг анотації становить 14 сторінок. Дисертація містить 48 рисунків, 21 таблиці. Список використаних джерел із 171 найменувань займає 20 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 154 сторінок, додатки 13 – сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, поставлені мета та завдання дослідження, визначенні об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення результатів, які винесені на захист. Вказано особистий вклад здобувача, апробацію результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі наведено аналіз літературних джерел про відомі методи нанесення покриттів на сталі 12X18H10T з властивими їм перевагами та недоліками. Проведений аналіз відомих досліджень в галузі створення комбінованих зносостійких покриттів.

Результати аналізу літературних джерел показали, що суцільний зміцнений шар на поверхні деталей машин не завжди дозволяє забезпечити потрібну довговічність трибосполучень у жаростійких умовах експлуатації, що потребує розробки і дослідження способів створення дискретних поверхонь. Встановлено також, що одношарові покриття не дозволяють повною мірою забезпечити комплекс необхідних фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Перспективним шляхом зміцнення поверхневих шарів аустенітних сталей є створення комбінованих покриттів, внаслідок чого будуть поєднуватися переваги кожного з методів, що надасть можливість підвищити їх триботехнічні й експлуатаційні властивості. За рахунок багатшарових градієнтних покриттів можна покращити механічні й триботехнічні властивості та керувати напружено-деформованим станом, міцністю зчеплення та хімічною взаємодією в системі «покриття – сталь 12X18H10T».

Ґрунтуючись на вищевказаному визначена мета роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі наведено відомості про сталь 12X18H10T, методи отримання та методи дослідження покриттів. ЛО проводили на установці «ЛАТУС-31» за режимами: потужність випромінювання – 0,9–1,1 кВт, діаметр ділянки фокусування променя – 5 мм, швидкість пересування лазерного променя – 0,5–1,2 м/хв. Дифузійне азотування проводили за відомою технологією в шахтній печі в середовищі аміаку при температурі 540 °С. Час витримки 1–36 год. Хромоалітовані покриття наносили в герметичній камері контактним порошковим методом при 950–1050 °С, впродовж 2–6 годин. Визначення фазового складу азотованих та хромоалітованих покриттів здійснювали шляхом пошарового аналізу поверхні зразків на рентгенівському дифрактометрі ДРОН УМ-1 у мідному монохромтизованому випромінюванні.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили за допомогою мікроскопа РЕМ-106И. Мікроструктурні дослідження проводили шляхом візуального вивчення та фотографування на мікроскопі МИМ-8 з приставкою Digital Camera DCM 130. Визначення товщини і мікротвердості покриттів проводилося на приладі ПМТ-3. Дослідження зносостійкості покриттів та коефіцієнт тертя в умовах тертя ковзання без змащування проведено за схемою «вал-площина» або «вал-частковий вкладиш» на машинах тертя СМЦ-2, М22-М у парі із загартованою сталлю 45 (HRC 45–50). Для обробки результатів дослідів та виконання оптимізації технологічного процесу осадження градієнтного електролітичного покриття з боридними і карбідними наповнювачами використовували методи багатофакторного планування експерименту та математичної статистики.

У третьому розділі наведено результати досліджень фізико-механічних і триботехнічних властивостей сталі 12X18H10T після хромоалітування, електроіскрового легування та комбінованої обробки: дискретної лазерної з наступним азотуванням.

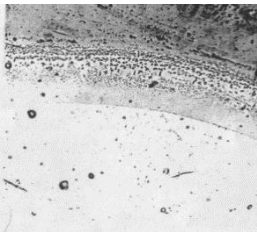


Рис. 1. Мікроструктура хромоалітованого шару на сталі 12X18H10T, $\times 300$

Хромоалітування. Хромоалітований дифузійний шар має гетерофазну і пошарову будову з різкою границею поділу між покриттям і основою (рис. 1). Встановлено, що після хромоалітування сталі 12X18H10T на поверхні зразків утворюється багатокомпонентні покриття за участю оксиду алюмінію Al_2O_3 , інтерметалідних сполук $Al(Fe, Cr)$, $Al(Fe, Ni)$ та твердого розчину $Fe_a(Al, Cr, Ni)$.

За даними дюрOMETричного аналізу мікротвердість сполук $Al(Fe, Cr)$ та $Al(Fe, Ni)$ знаходиться на рівні 5,0–6,8 ГПа. Випробовування в умовах тертя ковзання без змащування сталі 12X18H10T з комплексними покриттями показали підвищення зносостійкості в 1,5–2,6 в порівнянні з вихідною. Аналіз мікроструктури та хімічного складу поверхні зношування та матеріалу покриття поблизу неї дозволив виділити зони, збагачені киснем (до 47% мас). Мікрорентгеноспектральним аналізом показано,

що сполуки в цих зонах відповідають оксиду алюмінію Al_2O_3 . Встановлено, що процес зношування композиції «сталь-покриття» контролюється градієнтною структурою багатокомпонентного покриття, матеріал якого присутній не тільки на поверхні, але й у вигляді окремих включень в основі, структурою та властивостями матеріалу основи (сталь 12X18H10T), а також міцністю зчеплення покриття і основи.

Електроіскрові покриття. Досліджувалася можливість управління триботехнічними властивостями евтектичних покриттів на сталі 12X18H10T, що створені за рахунок диспергації їх структури і використання різного ступеня нерівноважності.

Покриття отримували електроіскровим легуванням електродом з розробленого евтектичного сплаву (патент № 102244 України на корисну модель). Для порівняння ефективності впливу на триботехнічні характеристики різних термодинамічних нерівноважних станів випробувалися як покриття у початковому стані, так і покриття, що були відпалені за двома різними режимами. Відпал проводився у вакуумній печі СШВЛ за тиску залишкової атмосфери 5 мм.рт.ст. і температурі $900^{\circ}C$ ($0,75 T_{пл}$) протягом 15 і 45 хв.

Мікроструктура вихідного напиленого електроіскрового евтектичного покриття є сумішшю ультрадисперсних кристалів бориду титану і хрому, які рівномірно розподілені в металевій матриці, що має склад нержавіючої сталі 12X18H9. Така структура покриттів принципово відрізняється структури від литого стану, оскільки внаслідок великої швидкості охолодження, що реалізується під час електроіскрового напилення, відбувається зміна механізму евтектичною кристалізації з формуванням структури тонкого конгломерату фаз.

Високотемпературний відпал вихідного покриття призводить до часткового розпаду пересиченої металевої матриці, зниження мікротвердості і коагуляції спочатку високодисперсних кристалів боридів. Зі збільшенням часу відпалу ступінь розпаду твердого розчину на основі заліза і ступінь коагуляції кристалів боридів зростають, що приводить до зміни мікромеханічних властивостей структурних складових покриття. Це позначається на триботехнічних характеристиках покриття в цілому (рис. 2).

Якщо коефіцієнт тертя вихідного покриття навіть дещо знижується зі збільшенням навантаження, то у відпалених покриттях залежність складніша. Більш тривалий відпал (45 хв) до навантажень 0,15 МПа обумовлює мінімальні значення, нижчі ніж в початковому стані, а при великих значеннях навантаження він різко зростає. Така залежність визначається описаними вище процесами зниження твердості, міцності і підвищення пластичності металевої матриці покриття, яка несе основне навантаження. Ці ж процеси можуть призвести до збільшення вагового зносу покриття при великих навантаженнях (рис. 2), що спостерігається для обох режимів відпалу. Катастрофічне збільшення зносу відпаленого протягом 15 хв покриття при $P > 0,15$ МПа, швидше за все, викликано

повним зношуванням покриття до підкладки і його безпосередньою участю в процесі тертя.

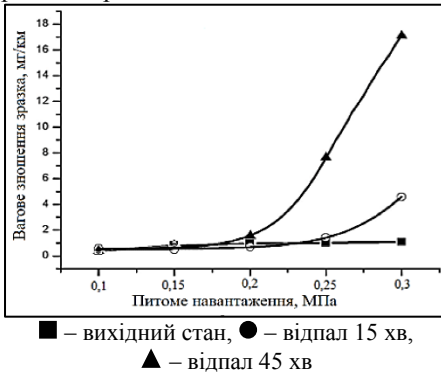
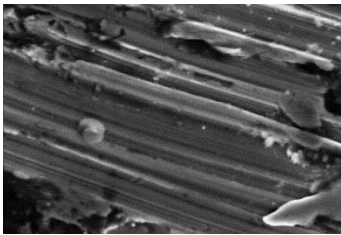
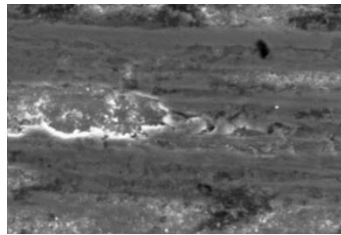


Рис. 2. Зносостійкість електроіскрових евтектичних покриттів у вихідному і відпаленому за різними режимами станях

всіх окисних плівок, як вихідного, так і відпалених покриттів, лежать сполуки заліза з киснем, іноді леговані хромом і нікелем в кількості (в атомних частках, %) 18,6–1,8 і 4,9–0,17 відповідно. Склад цих сполук відповідає формулам Fe_3O_4 і Fe_2O_3 . Збільшення часу відпалу сприяє зниженню корозійної стійкості вихідного покриття і, як наслідок, призводить до збільшення кількості окисних плівок.



а



б

Рис. 3. Поверхня тертя вихідного (а) і відпаленого (б) протягом 15 хв при 900°C електроіскрового евтектичного покриття, $\times 200$

Таким чином, в результаті відпалу покриттів відбуваються конкуруючі процеси, які призводять до протилежних результатів. З одного боку, збільшується кількість окисних плівок, які грають роль твердого мастильного матеріалу, і зростає пластичність, що знижує утомне руйнування і викришування покриття, що приводить до зниження зношування. З іншого боку, відпал призводить до зниження твердості і міцності металевої матриці, яка несе навантаження і сприяє

Наведене пояснення підтверджується дослідженням поверхні тертя вихідних і відпалених покриттів (рис. 3). Якщо на поверхні тертя вихідного покриття видно сліди крихкого руйнування і викришування окремих областей, то після відпалу протягом 15 хв з'являються сліди пластичної деформації, ступінь якої збільшується при збільшенні тривалості відпалу до 45 хв.

За результатами дослідження хімічного складу утворених в процесі тертя плівок були встановлені наступні закономірності. В основі

підвищенню зношування покриття, особливо за великих навантажень. Таким чином, змінюючи ступінь нерівноважного стану отриманих покриттів шляхом їх відпаду, можна в деякому діапазоні змінювати їх триботехнічні властивості, мінімізуючи сумарний знос пари тертя.

Дискретно-азотовані покриття (лазер + азотування). Представлені процеси формування дискретно азотованих покриттів та результати досліджень впливу структури і параметрів дискретної обробки на фізико-механічні і триботехнічні властивості сталі 12X18H10T. Комбіновану обробку проводили за розробленою технологією (патент №100638 України на корисну модель).

Аналіз отриманих даних показав, що залежно від технологічних параметрів ЛО змінюється фазовий склад, товщина і мікротвердість азотованого шару.

На ділянках зразків без ЛО товщина азотованого шару становила 0,15 мм, а мікротвердість на поверхні – 3,5 ГПа. Після ЛО товщина азотованого шару досягає 0,460 мм з мікротвердістю 8 ГПа.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що оптимальною щодо зносостійкості є площа обробки, що становить 30–40% від загальної площі поверхні зразка (рис.4, крива 1). Разом з іншими факторами це можна пояснити мінімальною концентрацією напружень, які виникають в умовах тертя.

Оскільки основна роль твердих дискретно азотованих лазером ділянок матриці є зміцнення, то наявність твердих вкраплень (діаметром 3 мм) зміцнює матрицю, обмежуючи її пластичний плин. Оптимальне відношення відстані між центрами включень і їхнім розміром $L/d \geq 3,3$, при якому вкраплення найбільше ефективно стискають матрицю, обмежують її пластичну деформацію й забезпечують максимальний опір втомному зношуванню.

Досліджено вплив поверхневої концентрації азоту зміцнених поверхонь сталі 12X18H10T на їх триботехнічні властивості. Максимальна зносостійкість спостерігається при значеннях концентрацій азоту в діапазоні 6–8,5% мас (рис. 5). Це можна пояснити тим, що в такому випадку поверхневі нітридні шари пар тертя складаються переважно з ϵ -фази (гексагонального карбонітрида $Fe_{2-3}(NC)$, близької до своєї нижньої границі розчинності азоту. Така структура ϵ -фази дозволяє виключити її крихкість і одержання в шарі дисперсного нітриду Fe_2N (ϵ – фаза є більше пластичної, але менш твердої, чим гранецентрований нітрид Fe_4N). При цьому, твердість зміцненого шару наближується до твердості γ -фази, з одночасним

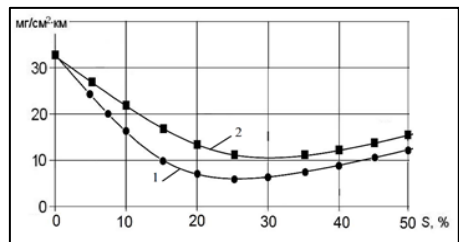


Рис. 4. Залежність зношування сталі 12X18H10T від площі обробленої поверхні (ЛО + азотування):

1 – навантаження 1 МПа;

2 – навантаження 2 МПа

збереженням пластичності ϵ -фази, створюючи таким чином, оптимальні структурні передумови для підвищення зносостійкості.

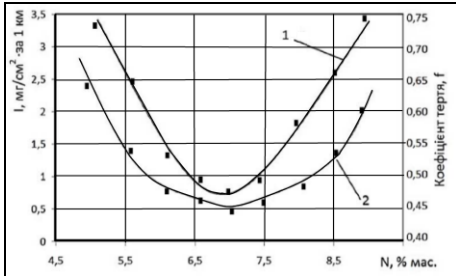


Рис. 5. Залежність інтенсивності зношування (крива 1) і коефіцієнта тертя (крива 2) сталі 12X18H10T від концентрації азоту

зменшуються від максимального значення на поверхні до нульових значень на глибині, де закінчується дифузійний шар. Режимам без попередньої термообробки властивий інший варіант розподілу напружень по товщині зміцненого шару з максимумом величини напружень на деякій глибині (крива 1).

Проведені дослідження хімічного складу поверхонь тертя методами мікрорентгеноспектральним та оже-спектроскопії показали наявність заліза, вуглецю і кисню, які утворюють оксиди Fe_2O_3 Fe_3O_4 . Утворення на поверхні тертя плівок вторинних структур, які складаються з оксидів, поліпшує умови тертя та зменшує можливість абразивного руйнування матеріалу. Поверхня тертя гладка і характеризується пелюстково-плівковою структурою.

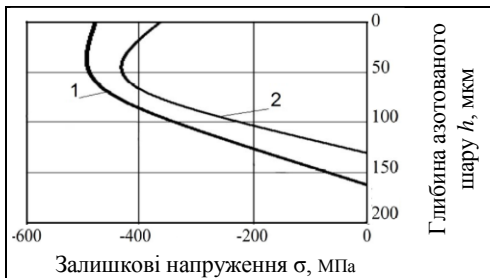


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару зразків зі сталі 12X18H10T: 1 – дискретна лазерна обробка + азотування; 2 – газове азотування

Дослідження макронапружень показали, що азотованому шару властиві залишкові напруження стиску, які є наслідком збільшення концентрації зв'язаного азоту (рис. 6).

На епорах залишкових напружень можна спостерігати, що при режимах з попередньою дискретною лазерною термообробкою (крива 2) напружень стиску поступово

Встановлено, що основними механізмами підвищення зносостійкості сталей внаслідок застосування комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки є: зміцнення поверхневих шарів; утворення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів; зміна хімічних і адгезійних властивостей поверхні.

Четвертий розділ

присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням закономірностей формування композиційних електролітичних покриттів (КЕП) на сталі 12X18H10T і встановленню впливу фізико-механічних властивостей, структури,

співвідношення частки твердих включень і металевої зв'язки, природи і розміру зміцнювальних частинок термічної обробки на механізм зношування та зносостійкість композиції «сталь-КЕП».

Триботехнічними дослідженнями встановлено, що зносостійкість КЕП залежить від розміру часток наповнювача, їх вмісту та сили зчеплення з нікелевою основою. Показано, що *дифузійне хромування КЕП* зміцнює ці сили зв'язку.

Поверхневий шар КЕП Ni-TiB₂ після хромування збіднений частинками TiB₂, а на глибині його боридна фаза дещо коагулізувалася і сформувалася дифузійна зона на границі покриття-основа, яка і забезпечує підвищену міцність зчеплення КЕП (рис. 7).

Характер залежності зносостійкості КЕП з різною фракцією TiB₂ до і після хромування однаковий і різниця лише в тому, що зниження зносостійкості у першому випадку починається від величини боридного включення приблизно 50 мкм, а у другому випадку від 70 мкм при навантаженні 20 Н і 80 мкм при навантаженні 10 Н.

З метою обґрунтування впливу хромування на зносостійкість КЕП на моделі композиційного матеріалу, в якому між наповнювачем та матрицею є перехідна зона з відповідним законом зміни в ній механічних властивостей, досліджено характер напруженого стану, що виникає в умовах навантаження силами тертя.

Дифузійне хромування формує перехідну зону у вигляді твердого розчину зменшуючи різницю в механічних властивостях наповнювача і матриці. Визначався розподіл відносної інтенсивності напружень $\sigma_i / \langle \sigma_1 \rangle$ стиску та зсуву в перехідній зоні (матриця Ni: $E_m = 2,0 \cdot 10^5$ МПа, $G_m = 0,8 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0,28$; зміцнююча фаза TiB₂: $E_f = 5,3 \cdot 10^5$ МПа, $G_f = 2,3 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_f = 0,15$; перехідна зона легована Cr: $E_s = 2,9 \cdot 10^5$ МПа, $G_s = 1,4 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_s = 0,21$).

При відсутності перехідної зони між матрицею і включенням концентрація напружень у включенні максимальна, а в матриці вони зосереджені на границі розподілу фаз (криві 1 і 1'). За наявності перехідної зони у вигляді твердого розчину одного з компонентів, що характеризується плавною (лінійною) зміною в ній міцнісних властивостей, концентрація напружень у включенні знижується і найбільш плавно переходить в матрицю, поступово зменшуючись до рівня напружень у матриці (криві 2 і 2') (рис. 8).

Отже, деконцентрацію напружень на межі «матриця – включення» можна здійснити організацією перехідної зони з підвищеними фізико – механічними властивостями та порогом початку пластичної деформації, зниженням інтенсивності деформаційного зміцнення та густини дислокацій.

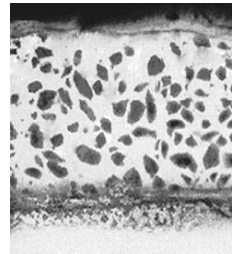


Рис.7. Мікроструктура КЕП Ni-TiB₂ після дифузійного хромування $\times 300$.

Досліджено вплив *термічної обробки відпалюванням* на триботехнічні властивості КЕП з наповнювачами евтектичного сплаву з різним ступенем нерівноважного структурного стану.

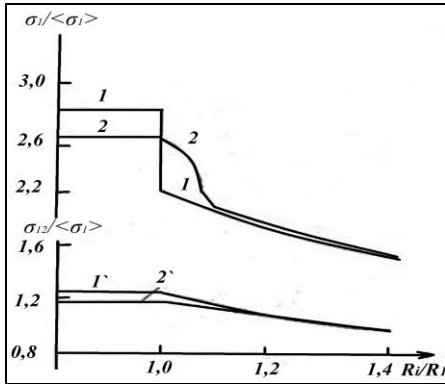


Рис. 8. Схема розподілу відносної інтенсивності напружень $\sigma_i / \langle \sigma_i \rangle$ в перехідній зоні при різній віддаленості від поверхні включення в глибокій матриці (1 – перехідна зона відсутня; 2 – модуль нормальної пружності змінюється лінійно; 1', 2' – те ж, при навантаженні силами тертя).

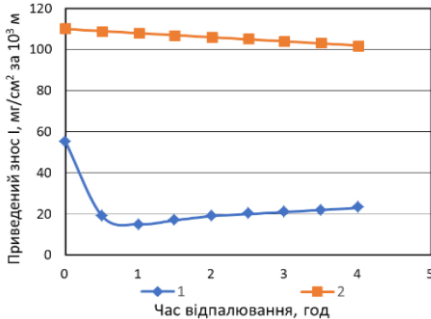


Рис. 9. Зносостійкість відпалених КЕП з евтектичними включеннями 28/20 мкм (1) і 250/210 мкм (2)

Дослідження тертя та зношування термооброблених КЕП з евтектичними наповнювачами двох фракцій показало різну їх зносостійкість в залежності від часу відпалювання.

Встановлено підвищення зносостійкості КЕП з евтектичним наповнювачем фракції 28/20 мкм вже після відпалювання протягом 0,5 год. В той час як відпалювання покриття з евтектичним наповнювачем фракції 250/210 мкм не суттєво впливає на його зносостійкість. Це пов'язано з різним ступенем нерівноважного стану евтектичних складових покриттів і зміною їх властивостей під час відпалювання (рис. 9).

Суттєві зміни відбуваються в евтектичних включеннях фракції 28/20 мкм, які знаходяться в більш нерівноважному стані. Зокрема знижується їх мікротвердість та крихкість (таблиця).

Це, в свою чергу, відображається на триботехнічних характеристиках покриття в цілому.

Наведене пояснення підтверджується дослідженням поверхні тертя відпалених покриттів. Якщо на поверхні тертя покриття з крупними включеннями видно сліди абразивного зношування вільними частинками наповнювача, або

закріпленими (шаржированими в поверхню контртіла), то для композицій з розмірами частинок 28 мкм відсутні процеси схоплювання, абразивного і крихкого руйнування, має місце нормальний механо-окислювальний процес зношування.

Таблиця

Мікротвердість евтектичних включень КЕП в залежності від часу відпалювання

Розмір евтектичних включень, мкм	Мікротвердість до відпалювання H_{μ} , МПа	Мікротвердість H_{μ} , МПа		
		Тривалість відпалювання, хв		
		30	60	90
250/210	9700	8400	8100	8050
28/20	11200	7800	6400	6300

Проведений аналіз динаміки руйнування поверхневих шарів та зносостійкості КЕП на основі енергетичної моделі. Адаптуючи розроблену Д. Г. Громаковським енергетичну модель аналізу кінетики втомного зношування здійснений аналіз умов утворення частинок зносу.

Умовою руйнування матеріалу (утворення частинок зносу) є виконання нерівності:

$$E_{def} \geq E_S, \quad (1)$$

де E_{def} – енергія деформації, що накопичується в процесі тертя, при цьому

$$E_{def} = \frac{\sigma_{max}^2}{2E} \cdot \frac{\pi d^3}{12}, \quad (2)$$

де σ_{max} – максимальна деформація;

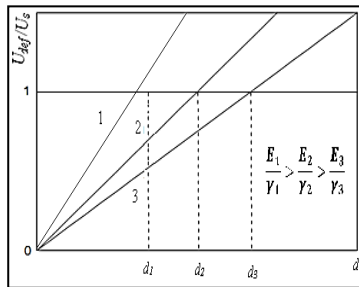
E_S – енергія активації руйнування, визначається когезійними властивостями матеріалу, при цьому

$$E_S = 2\gamma\pi d^2, \quad (3)$$

де γ – питома енергія когезії; d – розмір частинок зносу.

Прирівнюючи вирази 2 і 3 отримуємо $d \sim \gamma/E$, тобто умова руйнування матеріалу в процесі тертя визначається його механічними властивостями. Розмір частинок зносу менший у випадку матеріалу з більшою твердістю (з великим значенням E), але більший – у матеріалі з більшою міцністю (великі значення γ) (рис. 10).

Аналізуючи наведені на рис. 10 результати можна зробити наступне трактування зносостійкості КЕП. Початкове підвищення зносостійкості КЕП зі збільшенням вмісту та розміру наповнювача контролюється відповідно твердістю (E) і питомою енергією когезії (γ). Мінімум приведенного зносу відповідає оптимальним значенням вмісту і розміру наповнювача, коли розмір



$$E_1/\gamma_1 \text{ WC} = 31,25$$

$$E_2/\gamma_2 \text{ TiB}_2 = 39,23$$

$$E_3/\gamma_3 \text{ SiC} = 54,82$$

Рис. 10. Зміна розміру частинки зносу (d) зі зміною механічних властивостей матеріалу (E – модуль пружності, γ – питома енергія когезії)

зерна наповнювача відповідає розміру частинок зносу ($d_{\text{сер}}$). Якщо розмір зерен наповнювача стає більшим від середнього розміру частинки зносу, характерного для даного рівня насичення, то частинками зносу будуть зерна наповнювача (TiB_2). Характер зношування стає більш абразивним і знос росте.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що за однакової питомої когезії SiC (12,68 eВ), TiB_2 (13,51 eВ) і WC (12,95 eВ) перевагу щодо підвищення зносостійкості потрібно надавати наповнювачу з більшою твердістю SiC (392 ГПа), TiB_2 (530 ГПа), WC (710 ГПа), тоді відповідно E/γ для $\text{SiC}=31,25$, для $\text{TiB}_2=39,23$, для $\text{WC} = 54,82$.

Аналізуючи часові залежності величини E_{def} і E_S для конкретної трибосистеми, можна визначити тривалість проміжку часу до настання процесу руйнування поверхні. За зростанням проміжку часу до настання процесу руйнування поверхні та зносостійкості КЕП можна розташувати в наступний ряд: $\text{Ni-SiC} \rightarrow \text{Ni-TiB}_2 \rightarrow \text{Ni-WC}$.

У п'ятому розділі застосовуючи енергетичний підхід до оцінювання зносостійкості поверхневих шарів за умов їх руйнування при терті розроблено багатшарове градієнтне покриття, що формується на сталі 12X18H10T, досліджено механізм його зношування та триботехнічні властивості.

Відомо, що будь-який об'єкт трибосистеми, піддається структурній пристосовуваності. Утворені вторинні структури на робочих поверхнях спряження під час припрацювання в значній мірі визначають його подальшу зносостійкість, тобто зносостійкість і працездатність визначаються вихідною структурою матеріалу, а також станом контактних шарів, сформованих під час припрацювання (на початковому періоді експлуатації).

Тому було поставлено задачу створення способу нанесення композиційного електролітичного покриття з високою контактною втомною міцністю і зносостійкістю за рахунок формування його градієнтної структури: поверхневий шар зі складом та структурою з пониженим опором зсуву і глибинного підшару з більш крупними гранулами евтектичного сплаву.

Структура багатшарового градієнтного покриття складалася з нижнього шару, який було нанесено безпосередньо на поверхню сталі із наночастинок SiC та гранул евтектичного сплаву діаметром 140–200 мкм і верхнього шару покриття, який в свою чергу складається з двох прошарків – зовнішнього товщиною 10–15 мкм із наночастинок і гранул WC діаметром 1–5 мкм і нижнього із наночастинок SiC та гранул евтектичного сплаву діаметром 20–100 мкм (патент № 125389 України на корисну модель).

Співвідношення, склад і розмір компонентів у верхньому (зовнішньому) підшарі забезпечує менший зсувний опір завдяки підвищеній пластичності порівняно з нижнім основним підшаром. Більша дисперсність (1–3 мкм) гранул WC забезпечує пластичність, а їх вища мікротвердість (13 ГПа) порівняно з гранулами евтектичного сплаву – зносостійкість.

Зовнішній прошарок товщиною 10–15 мкм за час припрацювання утворює специфічні вторинні структури з високою стійкістю до температурно-силових впливів контактного фрикційного процесу і створює оптимальні умови для роботи основного матеріалу покриття, виключаючи його тріщиноутворення та крихке руйнування при терті.

Підвищення зносостійкості градієнтного покриття у порівнянні з КЕП Ni-SiC, обумовлено підвищенням твердості і пластичності поверхневого прошарку за рахунок більш твердого і дисперсного наповнювача карбиду вольфраму та мінімізацією напружень при терті.

Максимальну зносостійкість мають градієнтні покриття, що містять у зовнішній частині верхнього шару гранули WC діаметром 1–5 мкм. При зменшенні розміру гранул до 0,5 мкм зникає ефект макрозміцнення покриття. Збільшення розміру гранул порошку WC зверх 5 мкм також знижує зносостійкість, що обумовлено зменшенням вмісту включень в підшарі, зниженням його механічних властивостей, зокрема пластичності.

За результатами експерименту було проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі залежностей критеріїв оптимізації-величини зносу (Y_1) та коефіцієнта тертя (Y_2) від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

$$Y_1 = 27,4683 + 10,2644X_1 - 9,64441X_1X_2^2X_5^2 - 2,37748X_3X_4^2X_5; \quad (3)$$

$$Y_2 = 0,455106 + 0,237014X_1 - 0,0653093X_1X_4^2X_5^2 + 0,0572851X_2^2X_3X_5, \quad (4)$$

де X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 – конструктивні, технологічні та експлуатаційні фактори.

Перевірка отриманих моделей за критеріями математичної статистики підтвердили їх адекватність, відтворюваність та інформативність. Наочне уявлення про графічний образ функції відгуку одержано внаслідок побудови відповідних геометричних поверхонь (рис. 11)

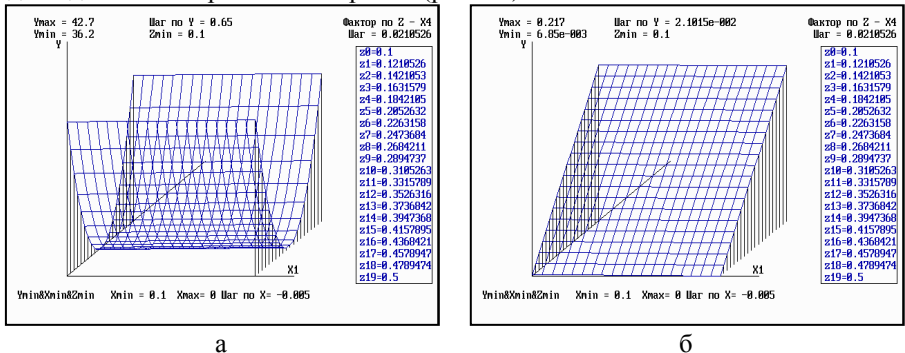


Рис. 11. Графіки дослідження відгуку $Y_1 = f(X_1, X_4)$ (а) та $Y_2 = f(X_1, X_4)$ (б) в тривимірному просторі

Таким чином, у результаті проведеної з використанням одержаних математичних моделей багатокритеріальної (компроміс за Парето) оптимізації,

було знайдено найоптимальніше поєднання рівнів конструктивних та технологічних факторів, що впливають на критерії оптимізації: діаметр гранул (X_1) – 2 мкм, вміст гранул (X_2) – 26,7 %, товщина покриття (X_3) – 14,6 мкм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджені фазові та хімічні склади, структура та мікротвердість хромалітованого покриття на сталі 12X18H10T. Встановлено, що процес зношування композиції «сталь-покриття» контролюється градієнтною структурою багатокомпонентного покриття з фазовими складом Al (Fe, Cr), Al(Fe, Ni) та $Fe_3(Al, Cr, Ni)$. Зносостійкість сталі 12X18H10T з покриттям зростає в порівнянні з вихідною у 1,5–2,5 рази.

2. Встановлено, що відпал електроіскрових евтектичних покриттів з дисперсною термодинамічно нерівноважною структурою призводить до створення різного ступеня нерівноважних станів та до зміни їх триботехнічних властивостей, що дозволяє підібрати раціональні параметри сполученої пари в різних умовах тертя.

3. Вперше з метою створення зносостійких поверхневих шарів розроблені технологічні процеси і досліджені особливості структуроутворення при азотуванні попередньо обробленої лазером сталі 12X18H10T. Показано, що зміни структурного складу азотованого шару дозволяють зменшувати крихкість і пористість ϵ -фази, підвищити концентрацію азоту в α -N – і γ' - фазах.

4. Встановлено, що існує оптимальний, з погляду зменшення інтенсивності зношування, вміст зміцнених ділянок, що становить 30–40%, що узгоджується з аналітичними розрахунками напружено–деформованого стану та встановлено, що в дискретно азотованих шарах виникають залишкові напруження стиску (450...900 МПа), більші, ніж в суцільно азотованих покриттях, які зосереджуються у верхньому шарі і по мірі віддалення від поверхні поступово знижуються.

5. Вперше експериментально та теоретично доведено, що дифузійне хромовання КЕП ущільнює його та зміцнює сили зчеплення частинок наповнювача з нікелевою основою, утворюючи перехідну зону між твердими включеннями та м'якою матрицею та зменшуючи напруження при терті, що узгоджується з аналітичними дослідженнями напружено-деформованого стану.

6. Вперше на основі енергетичної моделі трибопроцесу виконано аналітичне дослідження умов утворення частинок зносу в процесі фрикційного руйнування поверхневих шарів. Визначено, що умова руйнування покриття в процесі тертя визначається його механічними властивостями і досягається швидше для частинок зносу більших розмірів $d \sim \gamma/E$. Розмір частинок зносу менший у випадку матеріалу з більшою твердістю (з великим значенням E), але більший – у матеріалу з більшою міцністю (великі значення γ).

7. Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що за однакової питомої когезії SiC (12,68 eВ), TiB₂ (13,51 eВ) і WC (12,95 eВ) перевагу щодо підвищення зносостійкості потрібно надавати наповнювачу з більшою твердістю SiC (392 ГПа), TiB₂ (530 ГПа), WC (710 ГПа), тоді відповідно E/γ для SiC=31,25, для TiB₂=39,23, для WC=54,82. За зростанням тривалості проміжку часу до настання процесу руйнування поверхні та підвищення зносостійкості покриття можна розташувати в наступний ряд: Ni-SiC → Ni-TiB₂ → Ni-WC.

8. Застосовуючи енергетичний підхід до оцінювання зносостійкості поверхневих шарів за умов їх руйнування при терті розроблено технологічний процес формування градієнтного покриття з високою припрацьованістю і зносостійкістю, що обумовлено забезпеченням виконання правила додатного градієнта механічних властивостей. Максимальну зносостійкість мають градієнтні покриття, що містять у зовнішній частині верхнього шару гранули WC діаметром 1–5 мкм. При зменшенні розміру гранул до 0,5 мкм зникає ефект макрозміщення покриття. Збільшення розміру гранул порошку WC зверху 5 мкм також знижує зносостійкість, що обумовлено зменшенням вмісту включень в підшарі, зниженням його механічних властивостей, зокрема пластичності.

9. Проведено багатокритеріальну оптимізацію технологічного процесу формування зовнішнього підшару верхнього шару градієнтного покриття. Встановлено найоптимальніше поєднання рівнів конструктивних та технологічних факторів, що впливають на критерії оптимізації: діаметр гранул (X1) – 2 мкм, вміст гранул (X2) – 26,7 %, товщина покриття (X3) – 14,6 мкм.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. М. Pashechko Functional Plasma-Deposited Coatings / М. Pashechko, М. Kindrachuk, І. Gumeniuk, О. Tisov, V. Zahrebelniy // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2017. – 11(4). – pp. 301–304. (Видання входить до науко-метричних баз даних Web of Science, EBSCO, DOAJ, IndexCopernicus, J-Gate, Google Scholar, BazTech). *(Здобувачем проведено дослідження зносостійкості покриттів).*

2. М. Pashechko Gradient composite coating for working surfaces of braking devices / М. Pashechko, М. Kindrachuk, І. Humeniuk. // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2018. – №1. – pp. 1–8. (Видання входить до науко-метричних баз даних Web of Science, EBSCO, DOAJ, IndexCopernicus, J-Gate, Google Scholar, BazTech). *(Здобувачем досліджено механічні властивості градієнтного покриття).*

3. Кіндрачук М. В. Роль локалізації напружень і деформацій в перехідній зоні «матриця – наповнювач» в кінетиці руйнування композиційних покриттів під час тертя / М. В. Кіндрачук, М. В. Лучка, В. Я. Лобурак, І. А. Гуменюк // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – № 2 (63). – С. 18–29. (Видання входить до науко-

метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, PИHЦ). *(Здобувачем експериментально досліджено вплив перехідної зони, утвореної хромуюванням КЕП, на зносостійкість).*

4. Кіндрачук М.В. Механізм припрацювання в гетерогенних евтектичних системах / М. В. Кіндрачук, І. А. Гуменюк, О. О. Мікосянчик та ін. // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 94–101. (Видання входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, PИHЦ). *(Здобувачем встановлені закономірності припрацювання сплавів зі структурою евтектичного типу).*

5. Кіндрачук М. В. Механізм зношування аустенітної сталі 12X18H9T в широкому діапазоні зовнішніх навантажень / М. В. Кіндрачук, Р. Г. Мнацаканов, І. А. Гуменюк та ін. // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 2 (67). – С. 18 – 27. (Видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, PИHЦ). *(Здобувачем досліджені закономірності впливу температури та навантаження на зносостійкість сталі 12X18H10T).*

6. Кіндрачук М. В. Параметри дискретної структури азотованих покриттів рівної зносостійкості та з підвищеним опором втомному руйнуванню / М. В. Кіндрачук, В. В. Клімін, І. А. Гуменюк, В. В. Загребельний, С. П. Костюк // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 4 (69). – С. 58–62. (Видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, PИHЦ). *(Здобувачем проаналізовано результати зносостійкості дискретно азотованих покриттів).*

7. Хижняк В. Г. Трибологічні властивості: хромолітованої сталі 12X18H10T в умовах тертя ковзання / В. Г. Хижняк, Р. Г. Мнацаканов, І. А. Гуменюк, Я. В. Богач // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 3 (72). – С. 52–56. (Видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, PИHЦ). *(Здобувачем проведені дослідження структури і мікротвердості хромоалітованого покриття).*

8. Кіндрачук М.В. Формування триботехнічних властивостей плазмових покриттів на сталі 12X18H10T лазерною обробкою / М.В. Кіндрачук, Р.Г. Мнацаканов, І.А. Гуменюк, Я.В. Богач, Ю.В. Пищенко // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – № 2 (75). – С. 72 – 78. (Видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, PИHЦ). *(Здобувачем проведені триботехнічні дослідження)*

9. Дослідження триботехнічних характеристик електроіскрових покриттів з евтектичного сплаву на основі сталі 12X18H10T / В. С. Панарін, І. А. Гуменюк, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов. // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2017. – №4. – С. 6–11. (Видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, PИHЦ). *(Здобувачем проведено дослідження мікротвердості відпалених електроіскрових покриттів).*

10. Триботехнічні характеристики термооброблених композиційних електролітичних покриттів з наповнювачами евтектичного сплаву / А. О. Корнієнко, І. А. Гуменюк, С. В. Федорчук, Ю. В. Пищенко. // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – № 4 (77). С. 63–68. (Видання входить до науко-метричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, World Cat, РІНЦ). *(Здобувачем встановлений взаємозв'язок фізико-механічних характеристик зі зносостійкістю термооброблених композиційних покриттів).*

11. Пат.100638 України. Спосіб формування дискретних азотованих покриттів рівної зносостійкості / Кіндрачук М. В., Клімін В. В., Гуменюк І. А., Духота О. І., Кіндрачук В. М., Корбут Є.В., Герасимова О. В.; № у 201410961; Заявл.07.10.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. – 3с. *(Здобувачем отриманий взаємозв'язок між параметрами дискретної структури покриттів та триботехнічними властивостями).*

12. Пат. 102244 України. Зносостійкий евтектичний сплав на основі заліза / Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Загребельний В. В., Денисенко М. І., Гуменюк І. А., Ничепорук В. В., Добрянський С. С.; № у 201503259; Заявл.07.14.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20. – 3с. *(Здобувачем проведено дослідження зносостійкості евтектичного сплаву).*

13. Пат. 125389 України. Градієнтне покриття з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю / Кіндрачук М. В., Мнацаканов Р. Г., Гуменюк І. А., Духота О. І., Харченко В. В.; № 125389; Заявл. 21.11.2017; опубл. 10.05.2018; Бюл. № 9. – 4с. *(Здобувачем досліджено вплив на триботехнічні властивості параметрів градієнтного покриття).*

14. Кіндрачук М. В. Зносостійкість як енергетична характеристика міцності матеріалу в зоні тертя / М.В. Кіндрачук, М. В. Лучка, В. Я. Лобурак, І. А. Гуменюк: матеріали Міжнародної науково – практичної конференції [«Ольвійський форум – 14: стратегія країн причорноморського регіону в геополітичному просторі»], (Миколаїв, 4–7 червня 2014р) / Міністерство освіти і науки України. – Миколаїв: Вид – во Чорноморський держ. університет ім. Петра Могили, 214. – С. 19–22. *(Здобувачем проведено аналіз результатів зносостійкості КЕП).*

15. Кіндрачук М. В. Характер зниження ефективної межі текучості композиційних покриттів, навантажених силами тертя / М. В. Кіндрачук, Ю. Л. Хлевна, І. А. Гуменюк, В. Я. Лобурак // Тези доповідей Восьмої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико – матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів, 23–24 квітня 2015р., Київ, Україна. – К. – С. 90. *(Здобувачем встановлено взаємозв'язок між розмірами і вмістом наповнювача та межею текучості композиційного покриття).*

16. Кіндрачук М. В. Перспективність створення заевтектичних сплавів триботехнічного призначення на основі заліза з тугоплавкими боридами /

М. В. Кіндрачук, В. Є. Панарін, Р. Г. Мнацаканов, І. А. Гуменюк // 6-та Міжнародна науково – практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування, 24–25 вересня 2015р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – С. 191–192. *(Здобувачем визначено триботхнічні властивості завтектичних сплавів)*

17. Кіндрачук М. В. Кінетика руйнування композиційних покриттів пар тертя на основі енергетичної моделі / М. В. Кіндрачук, Р. Г. Мнацаканов, І. А. Гуменюк // матеріали 7-мої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування». – Херсон: Херсонська державна морська академія. 2016р. – С. 184 – 185. *(Здобувачем на основі енергетичної моделі проаналізовано руйнування КЕП при терті).*

18. Кіндрачук М. В. Кінетика руйнування композиційного електролітичного покриття на сталі 12X18H10T при терті ковзання / М. В. Кіндрачук, Р. Г. Мнацаканов, І. А. Гуменюк, Н. М. Стебелецька // Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6» за підтримки «ММАТЕНГ» проекту, інженерно-фізичного факультету НТУУ «КПІ», 1–2 грудня 2016р. – м. Київ. – С. 148–152. *(Здобувачем встановлено взаємозв'язок між механічними властивостями наповнювача і зносостійкістю КЕП).*

19. Гуменюк І. А. Зносостійкість сталі 12X18H10T з дифузійно-легованим покриттям системи хром-алюміній / І. А. Гуменюк // Науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології», 15–16 листопада 2017, м. Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2017. – С. 80.

20. Гуменюк І. А. Математичне моделювання формування зносостійких градієнтних покриттів на сталі 12X18H10T / І. А. Гуменюк // Тези доповідей Одинадцятої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико – матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів, 19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна. – К. – С. 242–244.

АНОТАЦІЯ

Гуменюк І.А. Триботехнічні властивості сталі 12X18H10T, поверхнево модифікованої комбінованими покриттями. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю: 05.02.04 – тертя та зношування в машинах (13 – Механічна інженерія). Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання підвищення зносостійкості поверхневих шарів корозійностійкої сталі 12X18H10T шляхом формування зносостійких комбінованих дифузійних, електроіскрових та композиційних електролітичних

покриттів дискретного і градієнтного типу та встановлення закономірностей впливу їх структурно-фазового складу, фізико-механічних властивостей і параметрів структури на триботехнічні характеристики.

Дослідженні закономірності формування та механізми зношування багатокомпонентного хромоалітованого покриття в умовах тертя ковзання без змащення в залежності від хімічного і структурно-фазового складу.

Представлено та описано результати експериментальних досліджень технологічного процесу азотування попередньо обробленої дискретно лазером сталі 12X18H10T. Встановлено закономірності зношування від параметрів дискретної структури.

Досліджено закономірності формування високотемпературним відпалом триботехнічних властивостей електроіскрових і композиційних електролітичних покриттів з евтектичним наповнювачем від ступеня нерівноважності структурно-фазових станів.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив дифузійної перехідної зони між твердим наповнювачем і м'якою матрицею на напружено-деформований стан та зносостійкість композиційних електролітичних покриттів.

На основі енергетичної моделі трибопроцесу виконано аналітичне дослідження умов утворення частинок зносу в процесі фрикційного руйнування приповерхневих шарів композиційного покриття.

Застосовуючи енергетичний підхід до оцінювання зносостійкості поверхневих шарів за умов їх руйнування при терті розроблено технологічний процес формування на сталі 12X18H10T градієнтного покриття з високою припрацьовуваністю і зносостійкістю. Проведено статистичний аналіз та побудовано регресійні моделі залежностей критеріїв оптимізації.

Ключові слова: сталь 12X18H10T, комбіновані покриття, дискретні покриття, градієнтні покриття, зносостійкість, припрацьовуваність, вторинні структури, напружено-деформований стан.

АННОТАЦІЯ

Гуменюк І.А. Триботехнические свойства стали 12X18H10T, поверхностно модифицированной комбинированными покрытиями. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах (13 – Механическая инженерия). Национальный авиационный университет МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения износостойкости поверхностных слоев

коррозионно-стойкой стали 12X18H10T путем формирования износостойких комбинированных диффузионных, электроискровых и композиционных электролитических покрытий дискретного и градиентного типов и установления закономерностей влияния их структурно-фазового состава, физико-механических свойств и параметров структуры на триботехнические характеристики.

Исследованы закономерности формирования и механизмы изнашивания многокомпонентного хромоалитированного покрытия в условиях трения скольжения без смазки в зависимости от химического и структурно-фазового состава.

Представлено и описано результаты экспериментальных исследований технологического процесса азотирования предварительно дискретно обработанной лазером стали 12X18H10T. Показано, что изменение структурного состава азотированного слоя позволяет уменьшить хрупкость и пористость ϵ -фазы, увеличить концентрацию азота в α -N- и γ '-N фазах. Установлено, что существует оптимальное, с точки зрения уменьшения интенсивности изнашивания, содержания упрочненных дискретных участков, что составляет 30–40%.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что диффузионное насыщенное композиционных электролитических покрытий хромированием создает переходную зону между твердым наполнителем при трении, что согласуется с аналитическим исследованием напряженно-деформированного состояния, возникающего при трении.

Исследованы закономерности формирования высокотемпературным отпалом триботехнических свойств электроискровых эвтектических покрытий и композиционных электролитических покрытий с эвтектическим наполнителем от степени неравновесности структурно-фазовых состояний. Установлено, что отжиг покрытый с дисперсной термодинамически неравновесной структурой эвтектических включений приводит к созданию разной степени неравновесных структурных и фазовых состояний и изменения механизма их изнашивания, что позволяет подобрать рациональные параметры пары трения для различных температурно-силовых условий трения.

На основе энергетической модели трибопроцесса выполнено аналитическое исследование условий образования частичек износа в процессе фрикционного разрушения поверхностных слоев. Установлено, что условие разрушения покрытия в процессе трения определяется его механическими свойствами и достигается быстрее для частичек износа больших размеров $d \sim \gamma/E$. Размер частичек износа меньше в случае материала с большей твердостью (с большим значением E), но больше у материала с большей прочностью (большие значения γ).

Используя энергетический подход к оцениванию износостойкости поверхностных слоев в условиях их разрушения при трении разработан

технологический процесс формирования на стали 12X18H10T градиентного покрытия установлены его триботехнические свойства и механизм изнашивания. Высокая износостойкость и прирабатываемость этого покрытия достигается соотношением диаметра и содержания гранул наполнителя в верхнем подслое, за счет чего обеспечивается правило положительного градиента механических свойств благодаря меньшей твердости и повышению пластичности по сравнению с нижним основным подслоем.

Был проведен статистический анализ и исследованы регрессионные модели зависимостей критериев оптимизации – величины износа и коэффициента трения от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

В результате проведенной критериальной оптимизации с использованием полученных математических моделей (компромисс по Парето) было найдено оптимальное сочетание уровней конструктивных и технологических факторов, которые влияют на критерии оптимизации.

Некоторые результаты диссертационной работы прошли производственные испытания и приняты к внедрению в производство.

Ключевые слова: сталь 12X18H10T, комбинированные покрытия, дискретные покрытия, градиент покрытия, износостойкость, прирабатываемость, вторичные структуры, напряженно-деформированное состояние.

ABSTRACT

Gumenyuk I.A. Tribotechnical properties of steel 12C-18Cr-10Ni-Ti, surface-modified by combined coatings. – Manuscript.

Thesis intended for getting scientific degree of Candidate of technical science by specialty: 05.02.04 – Friction and wear in machines (131 – Mechanical Engineering). National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to solving the actual scientific and technical task of increasing the wear resistance of surface layers of corrosion-resistant steel 12C-18Cr-10Ni-Ti by forming wear resistant combined diffusion, electrospray and composite electrolytic coatings of discrete and gradient type and establishing regularities of influence of their structural-phase composition, physical and mechanical properties and structural parameters on tribotechnical behavior.

Investigation of regularities of formation and mechanisms of wear of multi-component chromoaluminized coating in conditions of dry sliding friction, depending on the chemical and structural-phase composition have been done.

The results of experimental examinations of technological process of nitriding of selectively laser pre-treated steel 12C-18Cr-10Ni-Ti are presented and described. The regularities of wear on parameters of a discrete structure have been established.

The regularities of formation of tribotechnical properties of electrospray and composite electrolytic coatings with eutectic filler by high-temperature annealing on the degree of nonequilibrium of structural-phase states were studied.

The influence of the diffusion transition zone between the solid filler and the soft matrix on the stress-strain state and the wear resistance of composite electrolytic coatings was theoretically proved and experimentally confirmed.

Based on the energy model of triboprocess, an analytical study of conditions for the formation of wear particles in the process of frictional destruction of near-surface layers of composite coating was carried out.

Using the energy approach to evaluation of wear-resistance of surface layers in conditions of their fracture at friction, a technological process of forming gradient coating on the surface of 12C-18Cr-10Ni-Ti steel with high workability and wear resistance was developed. A statistical analysis was carried out. Regression models of dependencies of optimization criteria were constructed.

Key words: steel 12C-18Cr-10Ni-Ti, combined coatings, discrete coatings, gradient coatings, wear resistance, running-in, friction-induced structures, stress-strained state.