

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА
ім. І.М.ФРАНЦЕВИЧА

На правах рукопису
УДК 621.793.7:621.891

К І Н Д Р А Ч У К
Мирослав Васильович

РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРИНЦИПІВ ФОРМУВАННЯ ЕВТЕКТИЧНИХ
ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА З
ВИСОКИМИ ТРИБОТЕХНІЧНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ

Спеціальності: 05.16.01 - Металознавство та термічна
обробка металів
05.02.04 - Тертя та зношування в машинах

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1995

669.017 +
221.891



Дисертація є рукописом

Робота виконана в Національному технічному університеті України
"Київський політехнічний інститут".

Науковий консультант - доктор технічних наук *ГЛАДЧЕНКО О.М.*

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук *Єршов Г.С.*

доктор технічних наук, професор *Білоцький О.В.*

доктор технічних наук, професор *Шевеля В.В.*

Провідна організація - Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона
НАН України

Захист відбудеться "15" січня 1996 р. о 10 год.
на засіданні спеціалізованої Ради Д.01.88.04 при Інституті проблем
матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України за адресою :
252680, Київ-142, МСП, вул. Кржижанівського, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем
матеріалознавства НАН України.

Відгук на автореферат в двох примірниках, завірений гербовою
печаткою установи, просим надсилати за вказаною адресою вченому
секретарю.

Автореферат розіслано "11" грудня 1995 р.

*Вчений секретар
Спеціалізованої ради,
доктор технічних наук*

Р.В.Мінакова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Сучасний рівень розвитку техніки ставить підвищені вимоги до якості, надійності та довговічності деталей машин та устаткування. При експлуатації нової техніки ряд вузлів тертя працюють в умовах одночасного впливу високих температур, великих питомих навантажень, в широкому діапазоні швидкостей ковзання при дії різних хімічно активних газових середовищ. Матеріали, які широко використовуються, методи їх обробки та змащування часто виявляються малоприсадибними для роботи машин і механізмів в таких складних умовах. Гостро стоїть проблема підвищення триботехнічних характеристик існуючих матеріалів покриттів або створення нових з необхідними властивостями, які б поєднували високу зносостійкість з низьким коефіцієнтом тертя, жароміцністю, жаростійкістю, корозійною стійкістю. Проте існуючі теоретичні уявлення про механізми тертя та зношування не дозволяють всебічно сформулювати комплекс вимог, необхідних для розробки таких матеріалів, особливо для експлуатації при підвищених температурах.

Аналіз використання захисних покриттів у різних галузях промисловості вказує на те, що найбільшого розповсюдження для формування зносостійких покриттів одержали самофлюсуючі сплави на нікелевій основі, зокрема системи Ni-Cr-B-Si-C . Однак в більшості випадків покриття працюють при невисоких температурах і їх комплекс високих властивостей використовується невичерпно, тобто не в повній мірі. Разом з тим ці сплави не відрізняються високою зносостійкістю і являються порівняно дорогими. Експертні оцінки, проведені рядом ведучих організацій країни, вказують, що більш ніж для 40% всіх зміцнюваних та відновлюваних деталей економічно не вигідне використання таких дорогих матеріалів. В зв'язку з цим розробка композиційних сплавів і покриттів на основі заліза являється актуальною.

Одним із ефективних шляхів отримання матеріалів з одночасно високою жароміцністю та зносостійкістю є створення композицій на металевій основі, зміцненій тугоплавкими боридами і карбідами із використанням евтектичної реакції між ними. Основою для такого твердження слугують дослідження фазових рівноваг, виконані спільно з інститутом металофізики АН України. Було встановлено, що такі фази проникнення, як TiB_2 , CrB_2 , VC характеризуються хімічною сумісністю, міцним зв'язком і знаходяться в стійкій рівновазі при підвищених температурах /до 0,9 Тпл./ з металеву основою близькою за складом до сталі 12Х18Н9Т. Особливістю евтектичної реакції являється формування в процесі кристалізації із рідкого стану тонких, сильно розгалужених кристалів зміцнюючих фаз, створюючих каркас, який армує

металеву матрицю. Таке структурне утворення, в межах евтектичної колонії, на відміну від дисперсійно-твердіючих і дисперсно-зміцнених матеріалів, дозволяє поєднувати в сплавах різні властивості вихідних компонентів при забезпеченні високої жароміцності, змінювати форму і розміри включень, співвідношення механічних властивостей основи і фаз проникнення і, цим самим, суттєво впливати на триботехнічні характеристики.

Оскільки евтектична структура формується шляхом кристалізації із рідкого стану, то найбільш доцільно для отримання евтектичних покриттів /ЕП/ використовувати методи, в яких матеріал, що наноситься, проходить через рідку фазу. Проте використання ЕП на практиці гальмується, в значній мірі, в зв'язку з тим, що недостатньо вивчені механізми їх формування, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. Практично відсутні дані про триботехнічні властивості, зокрема при підвищених температурах. Обмежені відомості про вплив висококонцентрованих джерел енергії /лазер, плазма, струм високої частоти/ на їхню структуру і зносостійкість. Немає чітких шляхів регулювання співвідношення долі твердих включень і металевої основи, природи і форми зміцнюючих фаз. Це суттєво обмежує можливість цілеспрямованого керування їхньою структурою і властивостями в складних умовах нанесення ЕП та наступного їхнього раціонального використання. Розробка і застосування економнолегованих порошкових сплавів на залізній основі потребують створення науково-технічних критеріїв їх структуроутворення та вивчення механізму зношування з позицій структурної механіки руйнування. Вказані питання складають важливу і актуальну як наукову, так і прикладну проблему. Робота виконана згідно з постановами Комітету з питань науки і технології, планами наукових досліджень, затвердженими Міністерством освіти України.

Мета і задачі дослідження. Основною метою роботи являється розробка наукових і технологічних принципів створення композиційних матеріалів і покриттів евтектичного типу на основі заліза, а також технологій їх одержання із використанням концентрованих джерел енергії, призначених для застосування у вузлах тертя машин, що експлуатуються при підвищених температурах.

Згідно з цим в роботі необхідно вирішити наступні основні наукові і прикладні задачі:

І. Використовуючи дані експериментального дослідження багатофакторного впливу на закономірності розвитку процесів тертя та зношування сталі І2ХІ8Н9Т, обґрунтувати і створити теоретичні передумови розробки на її основі евтектичних сплавів з високими триботехнічними властивостями при підвищених температурах.

2. Із застосуванням розрахунково-експериментального методу дослідити на моделі композиційного матеріалу з безперервними високомодульними волокнами напружено-деформований стан, що виникає при терті в приповерхневих шарах евтектичних сплавів з направлено-орієнтованою структурою.

3. Виявити за допомогою термодинамічного аналізу взаємодії з киснем основні закономірності окислення евтектичних сплавів на основі сталі І2ХІ8Н9Т з тугоплавкими фазами боридів титану $/\text{TiB}_2/$, хрому $/\text{CrB}_2/$ і карбіду ванадію $/\text{VC}/$.

4. Дослідити хімічний і фазовий склад, структуру і фізико-механічні властивості евтектичних сплавів і покриттів та встановити основні закономірності їх впливу на триботехнічні характеристики в умовах тертя ковзанням при підвищених температурах.

5. Вивчити особливості формування структурного і фазового стану одно- і двохшарових ЕП з використанням висококонцентрованих джерел енергії, а також їх цілеспрямованого впливу на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики покриттів.

6. Розробити технологічні аспекти керування триботехнічними властивостями плазмових покриттів із евтектичних порошкових сплавів шляхом регулювання рівня їх нерівноважного стану лазерною обробкою в режимі оплавлення та термоцикування.

7. На основі узагальнення результатів дослідження та проведених порівняльних випробувань встановити області практичного використання отриманих покриттів, провести дослідно-промислову перевірку натурних виробів з такими покриттями в різних умовах експлуатації.

Наукова новизна роботи. Розроблені теоретичні основи і експериментально обґрунтовано концептуальний підхід до створення композиційних сплавів і покриттів евтектичного типу з високими триботехнічними властивостями в умовах підвищених температур. Запропонований підхід полягає в оптимізації комплексу параметрів сплавів /хімічного і фазового складу, структури, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей/, а також технологічних прийомів нанесення покриттів на базі аналізу напружено-деформованого стану композиції при терті, термодинамічного аналізу та математичних моделей взаємозв'язку процесів тертя та зношування з зовнішніми параметрами навантаження.

Вперше детально вивчено та розкрито механізм зношування аустенітної сталі І2ХІ8Н9Т, як металевої основи розроблюваних сплавів, в діапазоні температур від 20 до 800°C з варіюванням швидкостей ковзання і нормальних навантажень.

Розроблено розрахунково-експериментальну методику дослідження напружено-деформованого стану, що виникає при терті в приповерхневих шарах евтектичних сплавів і покриттів з направлено-орієнтованою структурою. Встановлено взаємозв'язок між концентрацією напружень, співвідношенням механічних властивостей матриці і включень, щільністю розташування включень. В структурі такого матеріалу визначено області з підвищеним рівнем напружень, як найбільш схильні до зародження руйнуючих процесів. Отримана аналітична залежність напруження початку пластичного течіння поверхневих шарів від об'ємного співвідношення компонентів композиції і коефіцієнту тертя. Встановлено, що в результаті пластичної деформації поверхневих шарів при терті евтектична структура змінюється таким чином, що реалізується правило позитивного градієнту властивостей, має місце нормальне зовнішнє тертя. Це дає можливість впливати на параметри пари тертя, а також на властивості шарів, що наносяться, приймаючи як засіб керування механізмами зношування дані по градієнту механічних і міцнісних властивостей.

Обґрунтована принципіальна можливість вибору захисних оксидних плівок з оптимальними триботехнічними властивостями за допомогою термодинамічного аналізу окислення композиції та визначені температурні інтервали їх формування.

Розроблена серія нових евтектичних сплавів на основі сталі І2ХІ8Н9Т, що додатково легована різними елементами і містить оптимальну кількість зміцнюючих тугоплавких сполук. Встановлений якісний зв'язок між складом, структурою і властивостями сплавів і покриттів. Вибрані фази / TiB_2 , CrB_2 , VC / ефективно зміцнюють композицію, підвищуючи зносостійкість, твердість, міцність, корозійну стійкість і жаростійкість. Введення зміцнюючих фаз суттєво покращує демпфіруючі властивості сплавів, розширяючи інтервал питомих навантажень, при яких протікає $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення з утворенням мартенситу деформації.

Показана можливість легування металевої основи базових сплавів систем І2ХІ8Н9Т- TiB_2 , І2ХІ8Н9Т- TiB_2 - CrB_2 , І2ХІ8Н9Т- TiB_2 -VC більшістю елементів Періодичної системи /наприклад, Al, Si, Cu, Zn та ін./ в широкому діапазоні концентрації, що зумовлює підвищення жаростійкості та антифрикційності.

Теоретично і експериментально обґрунтовані технологічні аспекти покращення службових характеристик плазмових покриттів шляхом оплавлення, термоциклування і нанесення легованого бар'єрного прошарку за допомогою лазера. Показано, що термоциклічна обробка суттєво підвищує адгезійно-когезійну міцність з одночасним збереженням необхід-

ного рівня незрівноваженого стану покриттів. Керуючи величиною дисперсних кристалів фаз проникнення і станом металевої матриці, можна підібрати ТЦО, при яких покриття отримують оптимальні триботехнічні властивості.

Встановлено, що ступінь зміцнення і зносостійкість композиційних наплавов в найбільшій мірі визначається концентрацією тугоплавких фаз і швидкістю охолодження, що впливає на рівноважний стан структури, склад і дисперсність евтектики.

Отримані математичні моделі, які встановлюють взаємозв'язок між зносом, коефіцієнтом тертя і параметрами зовнішнього впливу /температура, швидкість ковзання, питоме навантаження/, що дозволяє прогнозувати триботехнічні характеристики покриттів в залежності від конкретних умов їхньої експлуатації.

Практична цінність і реалізація результатів роботи. На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень розроблені, захищені авторськими свідоцтвами і поставлені на серійне виробництво в НВО "Тулачормет" економно леговані порошкові матеріали /ТУ І4-І27-І6І-80/, що забезпечують економію нікелю і хрому до 650 кг на І т порошкового сплаву. Розроблені евтектичні сплави на основі заліза, порівняно з серійними на нікелевій основі, характеризуються комплексом практично цінних експлуатаційних характеристик, в тому числі технологічністю, недефіцитністю, жароміцністю, корозійною стійкістю, підвищеними триботехнічними властивостями в широкому діапазоні температур.

Розроблені та впроваджені у виробництво нові промислові технології нанесення сплавів на деталі у вигляді одно- і двошарових покриттів з використанням концентрованих джерел енергії: струм високої частоти, плазма, лазер. При цьому можна отримувати покриття із заданим фазовим складом, структурою і службовими властивостями.

Розроблений спосіб підвищення зносостійкості плазових ЕП лазерною обробкою в режимі подвійного оплавлення та термоциклювання в діапазоні температур $1000 \pm 600^{\circ}\text{C}$, що охоплюють температури фазових перетворень.

Дані досліджень, а також розробок, виконаних на рівні І6 авторських свідоцтв на винаходи, пройшли дослідно-промислову перевірку, впроваджені або прийняті до впровадження на ряді підприємств тепло-енергетичного, верстатобудівного, комунального машинобудування і ряду інших галузей промисловості: НВО "Тулачормет", Київський ТЕЦ-5, Трипільський ДРЕС, Київському верстатобудівному ВО, галузевому концерні "Укркомунмаш", Нікопольському ливарно-механічному заводі, Луцькому заводі комунального обладнання, Акімовському заводі трубопровідної

арматури, Севастопільському заводу "Молот", АО НІІФермаш. Отримане підвищення ресурсу роботи деталей вузлів тертя /1,5-4 рази/, зниження працємисткості виготовлення деталей /2-3 рази/, заміна матеріалів на більш дешеві дозволили отримати економічний ефект понад 1,5 млн.крб. /в цінах до 1991 р./. Результати роботи використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету України "КПІ" для студентів металургійних і механічних спеціальностей з курсів "Термічна обробка металів", "Матеріалознавство" та ін., в практичній діяльності аспірантів, наукових співробітників в різноманітних установах.

На захист виносяться наступні наукові положення:

1. Теоретично і експериментально обґрунтований концептуальний підхід до створення сплавів і покриттів евтектичного типу на основі заліза з високими триботехнічними властивостями при підвищених температурах, що базується на аналітичному дослідженні напружено-деформованого стану композиції, навантаженої силами тертя, термодинамічному моделюванні і виявлених закономірностей формування структури, хімічного і фазового складу покриттів при їх одержанні із застосуванням концентрованих джерел енергії.

2. Розрахунково-експериментальну методику і отримані аналітичні залежності дослідження напружено-деформованого стану, що виникає під час тертя в приповерхневих шарах евтектичних сплавів і покриттів з направлено-орієнтованою структурою.

3. Закономірності впливу структурно-фазового складу і фізико-механічних характеристик на процеси тертя та зношування сплавів і ЕП в умовах багатофакторного зовнішнього навантаження.

4. Зв'язок технологічних параметрів обробки висококонцентрованими джерелами енергії і закономірностей зміни структури, хімічного і фазового складу та їх вплив на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики покриттів.

5. Експериментальні дані відпрацьованих режимів оплавлення та ТЦО лазером плазмових ЕП, що дозволяє отримувати литу структуру з композиційним зміцненням, підвищувати адгезію покриттів при одночасному збереженні необхідного рівня їх нерівноважного стану і цілеспрямовано керувати триботехнічними властивостями.

6. Технологічні аспекти створення двошарових покриттів для роботи при підвищених температурах в режимі теплосмін з використанням процесів лазерного легування та термоцикування.

7. Розроблені та впроваджені у виробництво склади нових економнолегованих сплавів на основі заліза і практичні рекомендації по технологіям їх нанесення у вигляді покриттів з покращеними експлуатаційними характеристиками в широкому діапазоні температур.

Особистий вклад автора. В дисертаційній роботі узагальнені результати досліджень, виконаних безпосередньо автором або групою співробітників під його керівництвом. В останньому випадку автор формулював мету, задачі і постановку роботи, аналізував і узагальнював отримані результати. Матеріал дисертаційної роботи не містить ідей або розробок, що належать співавторам, з якими були написані наукові статті.

Апробація роботи. Основні результати та положення дисертації доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях, семінарах, найважливіші з яких: Всесоюзні науково-технічні конференції – "Прикладні проблеми тертя, трибометрія та метрологічне забезпечення вимірювання", м. Москва, 1976р.; "Теоретичні і технологічні основи наплавки", м. Київ, 1976р.; "Проектування, виготовлення, експлуатація і діагностика вузлів тертя в машинобудуванні", м. Рибінськ, 1983р.; "Обробка матеріалів висококонцентрованими джерелами енергії", м. Пенза, 1988р.; "Сучасні технологічні процеси зміцнення і відновлення деталей", м. Новополицьк, 1991р.; "Конструкційна міцність, довговічність, зміцнення матеріалів і деталей машин", м. Волгоград, 1993р.; Республіканські науково-технічні конференції, семінари – XIV, м. Київ, 1975р.; XV, м. Калуш, 1976р.; XIX, м. Львів-Дрогобич, 1982р.; XX, м. Львів, 1984р.; XXI, м. Дніпропетровськ, 1986р.; XXII, Ів-Франківськ, 1990р.; XXIV, м. Київ, 1992р. семінари по дифузійному насиченню та покриттям; "Проблеми металознавства та обробки легованих сталей", м. Київ, 1994р.; "Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчовій та переробній промисловості", м. Київ, 1995р.; Міжнародні конференції – науково-технічна конференція ливарників КНР і СНД: м. Київ, 1991р.; м. Харбін, Китай, 1992р.; "Сучасні матеріали, обладнання та технологія зміцнення і відновлення деталей машин", м. Новополицьк, 1993р.; "Лазерні технології 95" "IILA '95", м. Шатура, 1995 р.

Дисертаційна робота в цілому обговорювалась на наукових семінарах НТУУ "Київський політехнічний інститут", ІПМ НАН України, інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 72 наукові праці, у тому числі 3 монографії, 2 брошури, 16 авторських свідоцтв на винаходи.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, бібліографічного списку та додатків, містить 296 сторінок машинописного тексту, 157 ілюстрацій /120 сторінок/, 32 таблиці /7 сторінок/, бібліографію із 374 найменувань /36 сторінок/, додатки /62 сторінки/ з документами, що підтверджують впровадження та економічну ефективність розробок.

У вступі обґрунтована наукова та практична актуальність проблеми створення евтектичних сплавів і покриттів на основі заліза для деталей вузлів тертя, що експлуатуються при підвищених температурах. Сформульована мета і задачі, які необхідно вирішити в процесі досліджень, наведені нові наукові і практичні результати, основні положення, які виносяться на захист.

Перший розділ присвячений аналізу стану проблеми, формулювці мети і визначенню задач, вирішення яких необхідно для їх досягнення.

Відзначається, що в загальній проблемі підвищення надійності і довговічності об'єктів машинобудування, ресурс роботи яких в переважній більшості випадків визначається опором поверхневого шару деталі різним видам контактної взаємодії, центральне місце займають трибологічні аспекти поверхневого зміцнення конструкційних матеріалів. Фундаментальним проблемам триботехніки присвячені роботи О.Ф.Аксенова, В.А.Белого, Л.І.Бершадського, М.О.Буше, Д.М.Гаркунова, М.Л.Голего, Л.Б.Заболотного, В.В.Запорожця, Б.І.Костецького, І.Б.Крагельського, Є.А.Марковського, П.В.Назаренко, І.Г.Носовського, О.П.Семенова, І.М.Седорченко, М.М.Хруцова, О.В.Чічінадзе, В.В.Шевелі та ін. Цей напрям зберігає актуальність. Необхідне подальше нагромадження і узагальнення результатів стосовно до створення зносостійких матеріалів для експлуатації при підвищених температурах.

Головною задачею проблеми тертя та зношування при високих температурах являється досягнення нормального режиму тертя, який визначається, в основному, протіканням процесів пластичної деформації поверхневих шарів та їх окислення з утворенням вторинних структур. Дія оксидних плівок неоднозначна, але частіше всього вони понижують коефіцієнт тертя та знос. Основними вимогами, яким в першому наближенні повинні відповідати покриття для роботи при підвищених температурах являються стабільність їх фізико-механічних властивостей в заданому інтервалі температур, стійкість проти газових середовищ при різних температурах, висока зносостійкість і добрі антифрикційні характеристики /низький і стабільний коефіцієнт тертя при роботі без мастила, висока несуча здатність, добра приробляваність/.

Більшість поставлених вище вимог можна досягнути шляхом нанесення покриттів евтектичного типу, в яких реалізується спільне композиційне і дисперсійне зміцнення тонкодіфференційованими кристалами. Важливу роль при цьому відіграють властивості металевої матриці та зміцнюючої фази. В якості основи композиційних евтектичних матеріалів перспективним є використання аустенітної сталі І2ХІ8Н9Т, що обумовлено характеристиками, які вигідно відрізняють її від інших

матеріалів, і в першу чергу високою корозійною стійкістю, жароміцністю в температурному інтервалі до 600°C і низькою енергією дефектів упаковки, а значить зменшенням трибоактивування при пластичній деформації в процесі тертя. Важливою являється також можливість заміни дорогих нікелевих сплавів економно легированими сплавами на основі заліза. В якості зміцнюючих фаз найбільш доцільно використовувати дибориди металів IVA групи, що характеризуються високими значеннями твердості, жаростійкості, корозійної стійкості, зносостійкості. Зміцнення аустенітної сталі диборидами досить ефективно, так як вони знаходяться в стійкій термодинамічній рівновазі до високих температур, що визначає стабільність багатьох фізико-механічних і хімічних властивостей системи. Використання евтектичної реакції між сталлю і тугоплавкими борідами з утворенням зміцнюючого каркасу з боридної фази дозволяє реалізувати механізм композиційного зміцнення, що забезпечує формування високих експлуатаційних властивостей.

Теоретичні основи формування евтектичних сплавів розроблені А.А.Бочваром, К.П.Буніним, Я.М.Тараном, В.І.Мазуром та ін. Найбільший вклад в дослідження питань практичного використання евтектичних сплавів і покриттів внесли В.І.Андрюлечкін, В.М.Голубець, А.К.Щурін, М.І.Патечко, В.Є.Панарін, В.В.Поздняков, А.П.Семенов, І.М.Спірідонова та багато інших вчених.

Встановлено, що широке використання відомих і розроблюваних ЕП для зміцнення металів і сплавів стримується:

- відсутністю систематизованих даних про закономірності впливу хімічного і фазового складу, структури і фізико-механічних властивостей на триботехнічні характеристики покриттів в умовах тертя при підвищених температурах;
- відсутністю теоретичних і експериментальних даних про характер напружено-деформованого стану, зміну структури та механічних властивостей евтектичних композиційних матеріалів в результаті пластичної деформації поверхневих шарів при терті;
- відсутністю основних закономірностей окислення ЕП з тугоплавкими сполуками та його впливу на триботехнічні властивості;
- недостатнім вивченням шляхів регулювання співвідношення долі твердих включень і металевої основи, природи і форми зміцнюючих фаз;
- обмеженими даними про умови формування структури і фазового складу ЕП з використанням концентрованих джерел енергії;
- обмеженими рекомендаціями по освоєнню простих, надійних і продуктивних технологічних методів їх нанесення;
- обмеженою кількістю порошкових матеріалів для формування ЕП різного функціонального призначення.

У зв'язку з викладеним актуальною є розробка теоретичних і технологічних, з використанням концентрованих джерел енергії, основ формування ЕП на основі заліза із заданою по фазовому та хімічному складу структурою і властивостями для підвищення експлуатаційної стійкості деталей машин і обладнання в широкому діапазоні температур.

У другому розділі наведено результати триботехнічних досліджень сталі І2ХІ8Н9Т, які дозволили сформулювати механізм її тертя та зношування. Розглядаються методики експериментальних досліджень і вивчення структури, хімічного та фазового складу приповерхневих шарів при терті.

При дослідженні впливу зовнішніх факторів на закономірності тертя та зношування сталі І2ХІ8Н9Т проведено три серії експериментів при різному поєднанні навантажень, швидкостей ковзання і температур. Досліджувались як однойменні пари тертя І2ХІ8Н9Т-І2ХІ8Н9Т, так і пари тертя І2ХІ8Н9Т-ЖС6К.

В першій серії вивчався вплив питомих навантажень на закономірності зношування сталі. Встановлено, що із збільшенням навантаження знос підвищується. При цьому характерними являються більш високі значення величин зносу при терті сталі по сталі порівняно із тертям по ЖС6К. Збільшення питомого навантаження до 3 МПа інтенсифікує процеси схоплювання, які характеризуються суттєвим підвищенням коефіцієнта тертя, температури поверхневого шару до 400°C, зростанням глибини пластичної деформації до 65 мкм. Рентгенівським дифракційним аналізом зразків, випробуваних в м'яких умовах тертя $P < 1 \text{ МПа}$, $V_k \approx 0,5 \text{ м/с}$, при яких процеси схоплювання виражені в меншій мірі, а температура поверхні досягає 300°C, в шарі тертя виявлено мартенсит деформації. Деформація тертям сприяє утворенню високих напружень, які викликають у метастабільному аустеніті $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Вторинні структури при цьому характеризуються високим ступенем зміцнення, про що свідчать підвищена твердість і великі напруження II роду. В результаті багаторазового навантаження протікають процеси утворення і розвитку мікротріщин, руйнування вторинних структур і вилучення їх із зони тертя.

У другій серії експериментів досліджувався вплив швидкостей ковзання на процеси тертя та зношування. Виявлено, що аустенітні сталі мають мінімальний знос при високих швидкостях і низьких температурах. Величина зносу максимальна при температурі 20°C і швидкості ковзання 0,1 м/с. Зі збільшенням швидкості коефіцієнт тертя та зношування зменшуються. В діапазоні швидкостей від 0,1 до 0,6 м/с приповерхневі шари металу характеризуються значною пластичною деформацією і зміцненням, на окремих ділянках поверхні спостерігають-

ся слабо протравлені структури з високою мікротвердістю $H_M = 7500 - 9000$ МПа/, які мають різку границю розділу з основним металом. Зростання швидкості ковзання від 0,6 до 1 м/с призводить до підвищення поверхневої температури до 700°C , при цьому інтенсифікуються процеси окислення. Основними елементами, що утворюють вторинні структури на поверхні тертя, являються залізо і кисень до 30%. В продуктах зношування виявлено /рентгенографічно/ оксиди заліза та хрому $/\text{Fe}_3\text{O}_4, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3/$. Показано, що схильність до пластичної деформації /трибоактивація/ разом з температурним фактором являються основною причиною інтенсивного окислення сталі при терті, не дивлячись на її високі корозійні властивості.

При дослідженні впливу температури на закономірності зношування сталі встановлено, що діапазон температур з відносно малими значеннями зносу і коефіцієнта тертя становить $300-600^\circ\text{C}$. Експерименти показали, що оксидні плівки, які утворюються при цих температурах, знижуючи опір зсувові при терті, локалізують пластичну деформацію в тонких приповерхневих шарах. При температурі до 600°C оксидна плівка складається з оксидів $\text{Fe}_3\text{O}_4, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3$. Підвищення температури вище 570°C , згідно з літературними даними, призводить до перетворення частини оксиду Fe_3O_4 в закис заліза FeO , що, напевно, і являється однією з причин підвищення коефіцієнта тертя та зносу. Відомо, що оксид Fe_3O_4 знижує коефіцієнт тертя. В приповерхневих шарах зразків, випробуваних при температурах до 400°C , виявлено мартенсит деформації.

Слід відмітити, що нормальний окислювальний знос обмежений температурами 600°C , при яких сталь, являючись твердою підкладкою для вторинних структур, зберігає свої високі механічні властивості. Високотемпературне знеміцнення сталі при температурах вище 600°C призводить до продавлювання шару оксидів, його викризування, схоплювання ювенільних поверхонь, катастрофічного підвищення зносу. Таким чином, мінімальний знос сталі в діапазоні температур $300-600^\circ\text{C}$ обумовлений, окрім утворення оксидних плівок, процесами рекристалізації, $\gamma \rightarrow \alpha$ і поліморфними перетвореннями оксидів, які служать механізмами дисипації енергії тертя.

За допомогою повнофакторного планування експерименту отримані статистичні моделі, які адекватно встановлюють зв'язок між зносом $/U_1/$, коефіцієнтом тертя $/U_2/$ та параметрами тертя $/X_1$ - температура; X_2 - навантаження; X_3 - швидкість ковзання/, зокрема при терті сталі по контртілу із сплаву ЖС6К:

$$U_1 = 61 - 41X_1 + 44X_2 - 85X_3 - 6X_1X_2 + 11X_1X_3 - 13X_2X_3 + 43X_1^2 + 82X_2^2;$$

$$U_2 = 0,55 - 0,11X_1 - 0,05X_2 - 0,1X_3 + 0,08X_1X_2 + 0,06X_1^2 + 0,12X_2^2 + 0,1X_3^2.$$

Отримані експериментальні дані лягли в основу встановлення механізму тертя та зношування аустенітної сталі І2ХІ8Н9Т в широкому діапазоні температур. Знос сталі визначається трьома процесами: до температури 300°C домінуючим являється схоплювання, в інтервалі температур 300–600°C має місце окислювальний знос і вище 600°C спостерігається високотемпературне зменшення сталі та інтенсивне утворення оксидних плівок, які призводять до схоплювання і катастрофічного спрацювання.

Таким чином, однією з основних причин низької зносостійкості сталі І2ХІ8Н9Т являється її однофазна структура. Для підвищення триботехнічних властивостей необхідне введення в сталь другої фази, яка б знаходилась з нею в стійкій термодинамічній рівновазі. Проте на сьогоднішній день немає однозначних рекомендацій про природу, кількість та геометричні розміри зміцнюючих сполук при створенні композицій, особливо для роботи при підвищених температурах. Друга фаза повинна бути підібрана з таким розрахунком, щоб її природа і кількість могли забезпечити утворення оптимальних захисних оксидних плівок, які виникають при терті, забезпечити збереження міцності при підвищених температурах, локалізувати процеси деформації при терті. Цим питанням присвячений третій розділ.

В третьому розділі подано результати розрахунково-експериментального дослідження напружено-деформованого стану, що виникає під час тертя в приповерхневих шарах евтектичного матеріалу з направлено-орієнтованою структурою та термодинамічного аналізу їх взаємодії з киснем повітря.

Металева матриця евтектичних сплавів, вибраних для дослідження, відповідала складу сталі І2ХІ8Н9Т, а зміцнюючими фазами служили диборид титану та хрому. Матриця сплаву містить тонкодиференційовані, сильно витягнуті /з відношенням довжини до товщини більше 100/ кристали боридів /рис.Іа/. Матеріал композиції модельований безперервно-армованим середовищем зі структурою, утвореною випрямленими і орієнтованими перпендикулярно поверхні тертя циліндричними волокнами з однаковими поперечними перерізами. Простір між волокнами заповнено сполучним середовищем – матрицею, пружні характеристики якої відмінні від відповідних характеристик волокон /рис.Іб/. Для урахування ефекту взаємодії між вклученнями, досить суттєвого при високому об'ємному вмісті наповнювача, допускається, що вклучення розташовані згідно схеми /рис.Ів/, у вузлах тетрагональної ґратки.

На гетерогенний матеріал діють сили нормального тиску, які викликають в ньому стан повздовжнього стиску $\langle \epsilon \rangle$, і сили тертя,

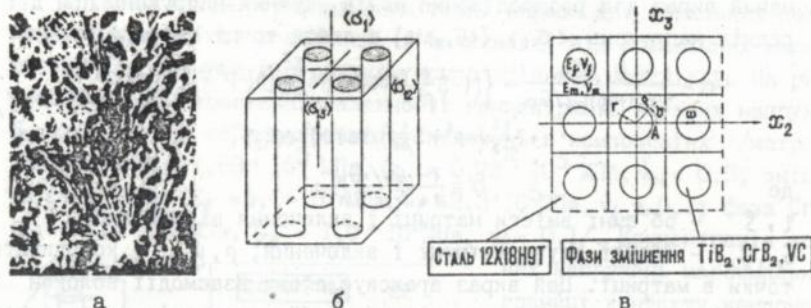


Рис.1. Мікроструктура евтектичного сплаву системи I2X18H9T-TiB₂ x x 900 /а/, модель матеріалу і схема навантаження /б/, структурна модель /в/.

що викликають стан повздовжнього зсуву $\langle G_{12} \rangle$, $\langle G_{13} \rangle$ /рис.1б/. В пружній області ці стани розділяються, що дозволяє вирішувати дві самостійні задачі. Так як контактна задача в даній постановці не розглядалась, локальні поля напружень в компонентах визначались на деякій відстані від поверхні, де кромочні ефекти згасають. При розгляді напруженого стану лінійно-армованого середовища, що знаходиться в умовах чистого зсуву при дії середніх повздовжніх дотичних напружень $\langle G_{12} \rangle$ і $\langle G_{13} \rangle$ поставлена задача зводиться до визначення двох роздільних функцій $\varphi_m(z)$ і $\varphi_f(z)$ в матриці і включенні відповідно. Ці функції зв'язані з повздовжніми переміщеннями U_i і дотичними напруженнями G_{12} , G_{13} співвідношеннями:

$U_1 = \varphi(z) + \overline{\varphi(z)}$; $G_{12} - iG_{13} = 2G\varphi'(z)$; $G_{13} = G[\varphi'(z)e^{i\vartheta} + \overline{\varphi'(z)}e^{-i\vartheta}]$, /1/ де G - модуль зсуву. /В співвідношеннях, справедливих для матриці і включень, індекси опускаються/.

Досконалий контакт на границі включення з матрицею досягається за умови

$$G_{1r}^+(\tau) = G_{1r}^-(\tau); \quad U_1^+(\tau) = U_1^-(\tau) \quad /2/$$

/знаками "+", "-" відмічені області відповідно зправа і зліва від границі контакту; τ - координати точки на границі/. Ці умови контакту зводяться до одного співвідношення:

$$(1 + G_f/G_m) \varphi_f(\tau) + (1 - G_f/G_m) \overline{\varphi_f(\tau)} = 2\varphi_m(\tau) \quad /3/$$

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

$$\langle \gamma_{12} \rangle = \frac{1}{G_{12}} \langle G_{12} \rangle; \quad \langle \gamma_{13} \rangle = \frac{1}{G_{12}} \langle G_{13} \rangle \quad /4/$$

де G_{12} - модуль повздовжнього зсуву матеріалу.

Розв'язання задачі проводилось методом послідовної регуляризації. З урахуванням /1/ - /4/, опускаючи громіздкі викладки, отри-

маний вираз для розподілення полів зсувних напружень при дії середніх напружень $\langle \sigma_{12} \rangle$ ($\langle \sigma_{13} \rangle = 0$) в будь-якій точці матриці:

$$\sigma_{13} = \frac{1 + G_f/G_m}{\eta + (1+\xi)G_f/G_m} - \left\{ (1 - S \frac{1}{\rho^2}) \cos \vartheta + 4S \frac{\xi^2}{\eta^2} [3(-\rho^2 + S \frac{1}{\rho^4}) \cos 3\vartheta + 7 \frac{\xi^2}{\eta^2} (-\rho^6 + S \frac{1}{\rho^8}) \cos 7\vartheta] \right\} \langle \sigma_{12} \rangle, \quad /5/$$

де

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

ξ, η - об'ємні вмісти матриці і включення відповідно;

G_m, G_f - модулі зсуву матриці і включення; ρ, ϑ - координати точки в матриці. Цей вираз враховує ефект взаємодії волокон і справедливий при достатньо високому об'ємному вмісту наповнювача. Аналіз отриманої залежності показує, що концентрація зсувних напружень максимальна в точці міжфазної границі з координатами $\rho = 1$; $\vartheta = 0$; η , де відстань між включеннями мінімальна /точка А на рис.1в/. Тоді максимальний коефіцієнт концентрації зсувних напружень

$$K_{1r} = \frac{G_r}{\langle \sigma_{12} \rangle} = \frac{2 G_f/G_m}{\eta + (1+\xi) G_f/G_m} [1 + 4S \frac{\xi^2}{\eta^2} (3 + 7 \frac{\xi^2}{\eta^2})]. \quad /6/$$

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

При розв'язуванні задачі про розтягання - стиск невзаємодіючих компонентів напруження визначаються як

$$G_1 = \frac{E_1}{E_1} \langle G_1 \rangle, \quad G_1 = \frac{E_m}{E_1} \langle G_1 \rangle \quad /7/$$

в наповнювачі і матриці відповідно,

$$\text{де} \quad E_1 = \xi E_f + \eta E_m + \frac{8 G_m \eta (\nu_f - \nu_m)^2}{2 - \xi + (\xi_f - 1) G_m/G_f}, \quad \chi = 3 - 4\nu$$

E - модуль Юнга; ν - коефіцієнт Пуассона.

При повздовжньому стиску композиційного матеріалу внаслідок різниці коефіцієнтів Пуассона ν_f і ν_m включення і матриці реалізуються плоский деформований стан. Напруження в компонентах визначаються через дві роздільні функції $\Phi(z)$ і $\Psi(z)$

$$G_2 + G_3 = 2[\Phi(z) + \overline{\Phi(z)}]; \quad G_3 - G_2 + 2i G_{23} = 2[\bar{z} \Phi'(z) + \Psi(z)]; \quad /8/$$

$$(G_r - i G_r \nu) = \Phi(z) + \overline{\Phi(z)} - 2 e^{2i\vartheta} [\bar{z} \Phi'(z) + \Psi(z)].$$

Вирішення задачі про плоску деформацію описаними методами дозволило отримати в уточненому вигляді найбільший коефіцієнт концентрації напружень:

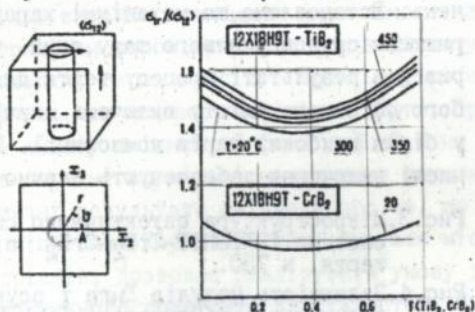
$$K_r = \frac{G_r}{\langle G_1 \rangle} = Q \left\{ 1 - \xi + 3 \frac{\chi_m + 1}{\chi_m + G_m/G_f} (3 + 10 \frac{\xi^2}{\eta^2}) \frac{\xi^2}{\eta^2} \right\}, \quad /9/$$

де

$$Q = \frac{1}{E_1} \frac{4 G_m (\nu_f - \nu_m)}{2 - \xi + \chi_m \xi + \eta G_m/G_f (\chi_f - 1)};$$

/інші параметри введені раніше/.

Таким чином, отримані аналітичні вирази для локальних полів напружень, що діють в матриці, в залежності від механічних характеристик компонентів і структури композиційного матеріалу. На рис.2 представлені характерні залежності концентрації зсувних напружень $G_{12} / \langle G_{12} \rangle$ від об'ємного вмісту включень в композиціях /матриця 12Х18Н9Т: $E_m = 1,83 \cdot 10^5$ МПа, $G_m = 0,72 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0,3$; зміцнююча фаза TiB_2 : $E_f = 5,1 \cdot 10^5$ МПа, $G_f = 2,3 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_f = 0,1$; фаза CrB_2 : $E_f = 2,2 \cdot 10^5$ МПа, $G_f = 1,0 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_f = 0,1$ /. Концентрація зсув-



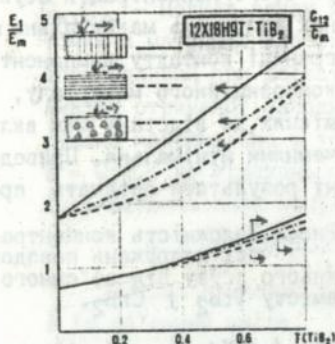
них напружень максимальна на границі контакту компонентів композиційного матеріалу, в місцях, де відстань між включеннями мінімальна. Приведені результати свідчать про

Рис.2. Залежність концентрації напружень повздовжнього зсуву від об'ємного вмісту TiB_2 і CrB_2 .

те, що існує такий об'ємний вміст включень $\approx 40\%$, при яких фіксується мінімум інтенсивностей локальних дотичних напружень в матриці. При цьому в композиційних матеріалах, в яких механічні характеристики наповнювача і матриці близькі, наприклад для системи 12Х18Н9Т- CrB_2 /рис.2/, концентрація напружень знижується при збереженні характеру її зміни від вмісту зміцнюючої фази. На основі аналізу отриманих залежностей, підтверджених експериментально, встановлено, що в умовах тертя слід віддавати перевагу композиціям, що містять 30-40% /об./ високомодульних волокон.

Досліджено напружений стан і розраховані ефективні параметри композиційного матеріалу, що містить на границі контакту включення - матриця мікротріщини, в залежності від механічних характеристик компонентів $\langle G_f, G_m, \nu_f, \nu_m \rangle$, об'ємного вмісту стовпчастої зміцнюючої фази ζ , величини і орієнтації міжфазної мікротріщини $\langle \nu, \theta \rangle$. Встановлено, що мікротріщини практично не впливають на нормальний модуль E_1 і суттєво понижують всі інші механічні характеристики.

Із застосуванням аналітично-експериментального методу розглянуто задачу про еволюцію структури та механічних властивостей евтектичних матеріалів в результаті пластичної деформації поверхневих шарів при терті. Так як приповерхневий шар складається з дрібних ламаних частинок TiB_2 в матриці з 12Х18Н9Т /рис.3/, матеріал змодельований у вигляді композиційного середовища з матриці,



в яку поміщені кулясті або короткі циліндричні вклучення, орієнтовані паралельно поверхні тертя. Більш глибокий шар має вихідну структуру, що моделюється циліндричними вклученнями, які орієнтовані нормально до поверхні тертя. На рис.4 представлені залежності модулів Юнга і модулів зсуву від об'ємного вмісту вклучень. Встановлено, що механічні характеристики приповерхнового шару, який утворився в результаті процесу тертя, для якого об'ємного вмісту вклучень нижчі, ніж у більш глибоких шарів композиції. Волокнисті вклучення забезпечують значно вищі

Рис.3. Мікροструктура евтектичного сплаву системи 12X18H9T-TiB₂-CrB₂ після тертя, х 750.

Рис.4. Залежність модулів Юнга і зсуву від структури і об'ємного вмісту TiB₂ в сплаві системи 12X18H9T-TiB₂.

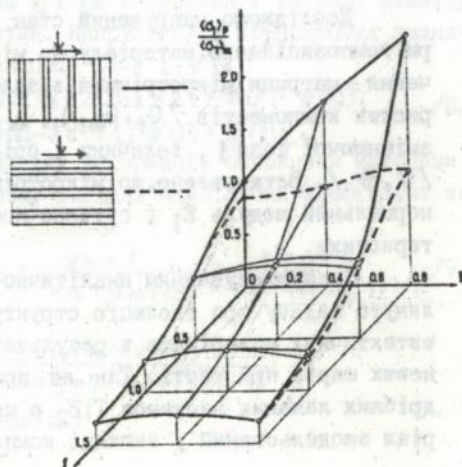
механічні характеристики матеріалу порівняно зі сферичними. При цьому форма вклучень більше впливає на нормальні модулі, ніж на модулі зсуву і цей вплив зростає зі збільшення різниці між характеристиками компонентів.

Отримана аналітична залежність мінімального середнього напруження $\langle G_1 \rangle_p$, при якому в матриці композиційного матеріалу починаються пластичні деформації, від механічних характеристик та об'ємного вмісту компонентів і коефіцієнта перетворення при терті нормальних зусиль в тангенціальні, який з деякими допущеннями можна вважати коефіцієнтом тертя:

$$\langle G_1 \rangle_p = \frac{\sqrt{2} (G_1)_m}{\sqrt{A i + f^2 B}}, \quad /10/$$

де $i = 1; 2$ - відповідно для композиційних середовищ з вклученнями, нормально

Рис.5. Залежність середнього нормального напруження початку пластичних деформацій в матриці сплаву від об'ємного вмісту TiB₂ і коефіцієнта тертя.



орієнтованими до поверхні тертя /глибинний шар/ і з циліндричними включеннями, орієнтованими паралельно поверхні тертя /приповерхневий шар/; $(6\tau)_m$ - границя текучості матеріалу матриці; коефіцієнти A_1, A_2, B залежать від механічних характеристик і об'ємного вмісту компонентів.

Встановлено, що при будь-якому об'ємному вмісті зміцнюючої фази і всіх значеннях коефіцієнта f пластичні деформації в глибинному шарі з включеннями, нормальними поверхням тертя, настають при більш високих значеннях нормального навантаження порівняно з приповерхневим шаром, який містить зміцнюючу фазу, орієнтовану паралельно поверхні тертя /рис.5/. При цьому різниця в його значеннях тим більша, чим менший коефіцієнт тертя. При $f > 0,3$ збільшення об'ємного вмісту зміцнюючої фази до $f > 0,4$ не ефективне, так як не впливає на середні нормальні напруження початку пластичної деформації. Отримані результати свідчать про те, що зміна структури, механічних і міцнісних характеристик, яка має місце при терті евтектичних матеріалів, дозволяє реалізувати умову зовнішнього тертя - правило позитивного градієнта властивостей. Показано, що трибологія матеріалів може бути визначена структурними характеристиками і міцнісними властивостями пари тертя. При цьому можна впливати на її параметри, змінювати властивості інградієнтів матеріалів, приймаючи в якості засобів керування механізмом зношування відомі дані по визначенню механічних і міцнісних властивостей.

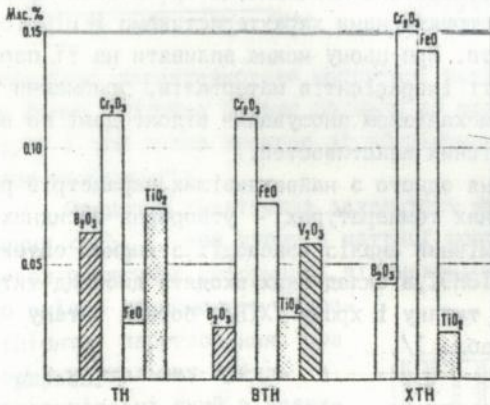
З метою прогнозування одного з найважливіших параметрів роботи матеріалів при підвищених температурах - утворення оксидних плівок виконано термодинамічний аналіз взаємодії з киснем евтектичних сплавів на основі I2X18H9T, в склад яких входять диборид титану /сплави марки TH/, бориди титану і хрому /ХТН/, бориди титану і карбиду ванадію /ВТН/ /табл. I/.

Таблиця I

Хімічний і фазовий склад евтектичних сплавів

Маркування сплавів	Вміст компонентів, % по масі							Газовий склад		Твердість, HB	Температура плавлення, °C
	Cr	Ni	Ti	V	B	C	Fe	Матриця	Зміцнюючі сполуки		
Т Н	15,7	7,8	8,9	-	4,0	-	63,6	18Cr-9Ni	TiB ₂	380	I200
ВТН	15,4	7,7	3,2	8,1	1,4	1,9	62,3		TiB ₂ +VC	470	I165
ХТН	20,5	8,6	2,5	-	2,6	-	65,8		/Ti, Cr/B ₂	370	I220

Термодинамічний аналіз багатофазної системи виконано за допомогою комп'ютерної програми АСТРА при температурах 600–1000°C. Встановлено, що окислення сплавів призводить до утворення оксидів B_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 , FeO , концентрація яких залежить від фазового складу вихідних сплавів та вмісту зміцнюючих сполук /рис.6/. На основі співставлення фазового складу сплавів, концентрацій зміцнюючих фаз і продуктів їх окислення встановлено, що оксид бору – B_2O_3 утворюється переважно за рахунок розкладання боридів. Показано, що сумарна кількість боридів титану і хрому в сплавах лінійно корелює з вмістом оксида бору. Так вміст TiB_2 в сплаві ВТН нижчий ніж в сплаві ТН і відповідно, менше утворюється B_2O_3 . В сплаві ХТН вміст TiB_2 ще нижчий, але кількість B_2O_3 вища за рахунок окислення CrB_2 . Кількість утворюваних Cr_2O_3 і TiO_2 також лінійно корелює з вмістом хрому та титану в сплавах /рис.6/. Допускається, що оксиди зміцнюючих фаз, зокрема B_2O_3 , локалізуючись на поверхні, створюють бар'єр для дифузії кисню, що запобігає сплави від подальшого окислення. Припущення підтверджено експериментальними дослідженнями жорсткості сплавів.



Результати термодинамічного аналізу покладені в основу обґрунтування принципіальної можливості прогнозування утворення оптимальних за складом і товщиною захисних оксидних плівок шляхом підбору певних легуючих елементів. Крім того, отримано

Рис.6. Концентрація твердих оксидів в продуктах окислення сплавів при 800°C.

мані дані дають можливість обирати температурні режими використання матеріалів, що має не тільки теоретичний, але й практичний інтерес.

Четвертий розділ присвячено дослідженню структури, визначенню експлуатаційних характеристик, а також розробці нових литих евтектичних сплавів.

Показана можливість керування триботехнічними властивостями сплавів за допомогою зміцнюючої фази і легування металевої основи. Встановлено, що евтектичні кристали боридів і карбідів ефективно зміцнюють сталь І2ХІ8Н9Т, підвищуючи комплекс її високих механічних і хімічних властивостей, таких як зносостійкість, твердість,

міцність при кімнатних і високих температурах, корозійну стійкість, жаростійкість.

В процесі вивчення закономірностей процесів тертя та зношування при підвищених температурах виявлено, що найбільш оптимальною для аустенітних сталей, зміцнених тугоплавкими боридами, являється евтектична структура. Порушення регулярності чергування фаз в структурі до- і заевтектичних сплавів призводить до розвитку процесів захоплення або крихкого руйнування, що підвищує сумарний знос пари тертя. Висока зносостійкість сплавів евтектичного складу визначається дисперсністю і високим ступенем диференційованості складових евтектики, здатністю локалізації пластичної деформації в невеликих міжпластинчастих об'ємах евтектики. При цьому, чим більш м'якою і пластичною являється евтектика при однаковому вмісті зміцнюючої фази, тим більшу частину енергії вона сприймає і більш здатна релаксувати напруження. Отже, менша частка енергії при терті витрачається на вторинні процеси в надлишкових кристалах диборидів. Встановлено, що пластинчасті евтектичні кристали більш ефективно підвищують зносостійкість, ніж стержневі.

Проводились дослідження впливу форми фаз проникнення та механізму зміцнення на триботехнічні властивості композиційного матеріалу. Наявність в аустенітній сталі ІХІІІНТ евтектичних кристалів зміцнюючих фаз, що утворюються самочинно при кристалізації з рідкого стану /композиційне зміцнення/, більш суттєво підвищує її зносостійкість, ніж введення таких кристалів методами гарячого пресування /дисперсне зміцнення/ /рис.7/. При цьому ефект підвищення зносостійкості евтектичними кри-

сталами має місце при значно меншому вмісті цих кристалів в сплаві і меншому розмірі, ніж у випадку спечених сплавів.

Сукупність отриманих даних дозволяє стверджувати, що евтектичні сплави з направлено-орієнтованою структурою здатні до самоорганізації при терті з утворенням вторинних структур при інтенсивному зовнішньому впливі та масо-

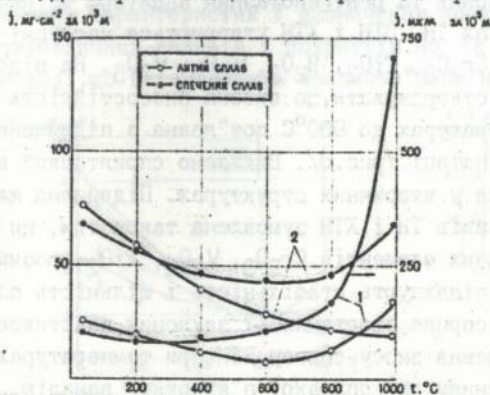


Рис. 7. Температурна залежність зносу литого евтектичного сплаву ТН і спеченого: 1 - лінійний знос; 2 - ваговий знос.

ренесенні кисню з робочого середовища. Саме така структура може розподіляти рівномірно навантаження в об'ємі пружнов'язкої матриці, чинити опір руйнуванню під дією тангенціально направлених сил тертя і служити міцною підкладкою для вторинних структур. Виявлена кореляція між триботехнічними властивостями при підвищених температурах і жароміцністю.

Вивчались особливості структурно-фазових перетворень в поверхневих шарах евтектичних сплавів при терті. Показано, що армування диборидами метастабільного аустеніту металевій складовій сплавів розширює інтервал навантажень, при яких протікає $\gamma \rightarrow \delta$ перетворення, в той час як у чистої сталі І2ХІ8Н9Т, схильної до скопчування, при високих навантаженнях мартенситу деформації не виявлено, так як процеси зношування превалюють над процесами зміцнення. Таким чином, в евтектичних сплавах на основі метастабільної хромонікелевої сталі одним з механізмів дисипації енергії тертя являється $\gamma \rightarrow \delta$ перетворення.

Вивчався вплив природи зміцнюючої фази на процеси тертя та зношування на прикладі складних евтектичних систем, зокрема таких як І2ХІ8Н9Т-ТіВ₂-УС, І2ХІ8Н9Т-ТіВ₂-СгВ₂. В досліджених системах знос визначається структурним фактором, жароміцністю і жаростійкістю. Значно менший вплив має склад фаз проникнення при умові, що їх зносостійкість, міцнісні та хімічні властивості відрізняються незначно. Спільна присутність декількох зміцнюючих сполук в металевій матриці не робить рішучого впливу на зносостійкість сплавів в цілому. За допомогою термодинамічного аналізу, підтвердженого дослідженнями кінетики окислення та рентгенофазним аналізом встановлено, що при терті в сплавах ТН, ВТН і ХТН утворюються наступні оксиди: Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO, Сг₂С₃, TiO₂, В₂O₃, V₂O₃, V₂O₅. На підставі отриманих даних можна стверджувати, що висока зносостійкість сплавів системи ХТН при температурах до 900°C пов'язана з підвищеним вмістом Сг₂O₃ в оксидній плівці /рис.8/. Виявлено сприятливий вплив оксиду бора, що утворюється у вторинних структурах. Підвищена жаростійкість евтектичних сплавів ТН і ХТН зумовлена також тим, що при їх окисленні оксиди легуючих елементів Сг₂O₃, V₂O₃, TiO₂, розчиняючись в борному ангидриді підвищують стабільність і щільність плівки В₂O₃, що в свою чергу сприяє зростанню її захисних властивостей. В той час як різке підвищення зносу сплаву ВТН при температурах вище 600°C зумовлено утворенням легкоплавкої п'ятиокисі ванадію, яка розчиняє оксиди інших металів і переходжає утворенню щільних захисних плівок. Встановлено, що мінімальним зносом до температури 500°C характеризується сплав ВТН, в інтервалі температур 500-700°C-

ТН і вище 700°C - ХТН.

Для розширення можливостей керування триботехнічними властивостями сплавів проводились дослідження процесів легування їх металевісної основи. Показано, що зниження коефіцієнта тертя евтектичних сплавів на основі сталі І2ХІ8Н9Т можна досягти шляхом легування матриці антифрикційними матеріалами Cu , Sn , Zn , Pb які розчиняються в ній і хімічно нейтральні до зміцнюючих фаз. Значно підвищуються антифрикційні властивості сплавів при введенні в них металургійним шляхом дисульфіда молибдену. Пониження коефіцієнта тертя при легуванні сплавів знижує необхідну ефективну кількість зміцнюючої фази.

Встановлено, що легування сплавів алюмінієм і кремнієм суттєво підвищує їх жаростійкість і зносостійкість в усьому інтервалі температур. Підвищення зносостійкості сплавів при кімнатних температурах зумовлено тим, що легування призводить до підвищення твердості і границі текучості металевісної матриці. Значна перевага в зносостійкості сплавів при високих температурах визначається складом, товщиною та швидкістю утворення оксидних плівок на поверхні тертя. Показано, що легований евтектичний сплав ХТН переважає по жаростійкості та зносостійкості сталь І2ХІ8Н9Т і кращі серійні сплави на нікелевій основі ПГ-ІОН-ОІ і ПГ-СРЗ. За ступенем зростання зносостійкості при 800°C сплави можна поставити в наступний ряд: І2ХІ8Н9Т - ПГ-СРЗ - ПГ-ІОН-ОІ - ХТН - ХТН легований Si - ХТН легований Al.

Для розробки технологічних процесів, прогнозування триботехнічних характеристик і визначення конкретних режимів експлуатації евтектичних сплавів і покриттів на їх основі отримані математичні моделі, що встановлюють взаємозв'язок між зносом $[\Delta]$, коефіцієнтом

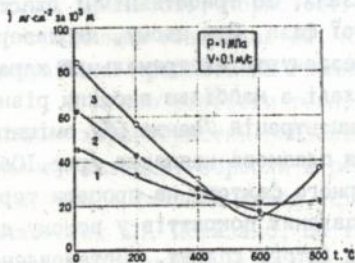


Рис.8. Температурна залежність зносу сплавів: 1 - ТН, 2 - ХТН, 3 - ВТН.

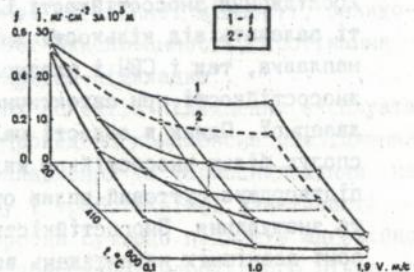


Рис.9. Залежність коефіцієнта тертя $[I]$ і зносу $[2]$ евтектичного сплаву ТН від температури і швидкості ковзання.

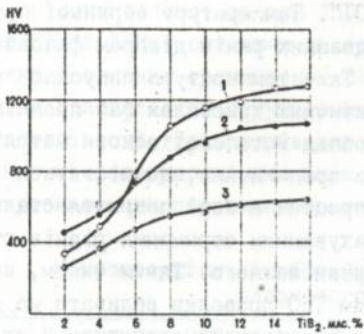
тертя $/U_2/$ та параметрами зовнішнього впливу $/X_1 - \text{температура}; X_2 - \text{навантаження}; X_3 - \text{швидкість ковзання}/$, зокрема для сплавів системи I2X18N9T-TiB_2 /рис.9/:

$$Y_1 = 1,84 - 0,61X_1 + 0,5X_2 - 0,7X_3 + 0,6X_3^2;$$

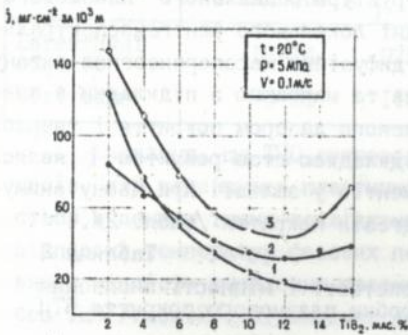
$$Y_2 = 0,3 - 0,075X_1 + 0,11X_2 - 0,16X_3 - 0,085X_1^2 + 0,1X_2^2 + 0,11X_3^2.$$

В п'ятому розділі виконано дослідження закономірностей формування структури та властивостей ЕП, а також обґрунтовані технологічні аспекти покращення їх триботехнічних характеристик за допомогою високоенергетичних способів нагрівання.

На основі результатів вивчення покриттів, наплавлених лазером, плазмою, СВЧ, показана можливість керування хімічним, фазовим складом і структурою покриттів на стадії їх нанесення. Результати свідчать про більш високий ступінь дисперсності структур після лазерної обробки, меншій частці евтектики і надлишкових зміцнюючих фаз проникнення в покриттях доевтектичного і заевтектичного складу відповідно, що зумовлено високою швидкістю кристалізації, перенасиченістю твердих розчинів і більшим градієнтом температур при наплавці лазером порівняно з плазмовою і наплавкою СВЧ. Встановлено, що твердість і зносостійкість покриттів залежать від кількості евтектики та її дисперсності, які в свою чергу визначаються концентрацією зміцнюючої фази та швидкістю охолодження. З підвищенням вмісту зміцнюючих фаз в евтектичних порошкових матеріалах твердість наплавлених покриттів зростає в широкому діапазоні від 200 до 1350 HV. Покриття наплавлені лазером мають більш високу твердість, ніж наплавлені СВЧ і плазмою, однак в області доевтектичних складів з низьким вмістом зміцнюючої фази /до 6%/ вони м'якчі плазових, що обумовлено меншою часткою евтектики і борідної фази в ній /рис.10а/. Дослідження зносостійкості ЕП показали, що триботехнічні властивості залежать від кількості зміцнюючої фази. При цьому, як лазерна наплавка, так і СВЧ і плазма забезпечують екстремальний характер зносостійкості при евтектичному складі з найбільш високим рівнем у лазерної. Однак в області малих концентрацій /менше 6%/ зміцнюючих сполук більш зносостійкою являється плазмова наплавка /рис.10б/, що підтверджує суттєвий вплив структурного фактору на процеси тертя та зношування. Зносостійкість наплавлених покриттів у всьому діапазоні зовнішніх навантажень вища від литого сплаву. Встановлено, що наплавлені покриття із розроблених поротків на основі заліза /а.с. № 1055179, а.с. № 1050179/ не поступаються, а в 3-5 раз перевершують по зносостійкості покриття сплаву ПГ-ІОН-ОІ. Досліджува-



а



б

лись особливості механізму зношування різних типів наплавлених покриттів. Виявлено, що високих триботехнічних властивостей можна досягнути створенням енергосмких покриттів з високою, на субмікрорівні диференційованістю направлено-орієнтованих структурних складових з гетерогенними і вибірконими по інтенсивності окислення властивостями.

Вивчались особливості структури, фазового та хімічного складу і триботехнічні властивості плазмових ЕП. Мікроструктура напильних плазмових покриттів являється неоднорідною. Спостерігаються слабо протравлені області, названі білими шарами, нерозплавлені, або частково розплавлені порошин-

Рис. 10. Вплив вмісту дибориду титану та способу наплавки на твердість /а/ і зносостійкість /б/ покриттів: 1 – лазерна наплавка, 2 – плазмозна наплавка, 3 – наплавка СВЧ

ки, а також незначна кількість пор /біля 10%/. Встановлено, що стійкість проти спрацювання таких покриттів, особливо в умовах роботи при температурах у режимі тепловмін, невисока в результаті їхньої крихкості, пористості, низької адгезійної міцності, великого градієнта властивостей, підвищеної окислюваності, протікання дифузійних процесів на границі "покриття-підкладка".

З метою розробки технологічних аспектів підвищення експлуатаційних характеристик плазмових ЕП проведено комплексне дослідження впливу лазерної обробки в режимі оплавлення та термоциклівання на хімічний і фазовий склад, структуру і триботехнічні властивості плазмових ЕП. Показано, що така обробка суттєво підвищує адгезійно-когезійну міцність при одночасному збереженні необхідного рівня нерівноважного стану покриття. Керуючи величиною дисперсних кристалів фаз проникнення і станом металевої матриці, можна підібрати режими оплавлення і ТЦО, при яких покриття отримують оптимальні триботехнічні властивості. Оплавлення і ТЦО у діапазоні $900 \pm 500^\circ\text{C}$ прово-

Проведені дослідження мікроструктури оплавленого плазмового покриття на вуглецевих сталях і дані локального рентгеноспектрального аналізу свідчать про взаємне дифузійне масоперенесення титану, ванадію, хрому в підкладку і заліза та марганцю з підкладки в покриття внаслідок взаємодії розплавленого лазером покриття і твердої підкладки. Межа між покриттям і підкладкою стає розмитою і являє собою тверді розчини легуючих елементів у залізі. При цьому знижується пористість і підвищується адгезія покриття /табл. 2/.

Таблица 2

Залежність мікротвердості, пористості і міцності зчеплення з підкладкою I2X18H9T від обробки плазмового покриття БТН

Обробка	Мікротвердість, Н ₁₀₀ , МПа	Пористість, %	Міцність зчеплення, МПа
Плазмове напilenня	12400	10-12	16-20
Плазмове напilenня + оплавлення лазером	8250	0,5-1	400-450
Плазмове напilenня + 4ТЦО	10050	7-9	90-100

В результаті триботехнічних випробувань встановлено підвищення зносостійкості оплавлених покриттів порівняно з вихідними без обробки більш ніж в два рази при кімнатних температурах і в п'ять разів при високих. Найбільшою зносостійкістю характеризуються покриття з подвійним оплавленням, що пов'язане з особливостями їхніх структур, які забезпечують по товщині покриття позитивний градієнт властивостей. При цьому поверхневий шар із пружно-пластичною дрібнозернистою структурою сприяє самоорганізації вторинних структур, а розташовані нижче шари стовпчастої структури зміцнюючих фаз ефективно демпфують зовнішні нормальні та зсувні навантаження.

Встановлено, що при ТЦО в обох системах евтектичних покриттів ВТН і ХТН, починаючи з трьох термоциклів спостерігається помітне зменшення границь між білими шарами і їх розпад. Кінетика зміни властивостей структурних складових покриттів в залежності від кількості термоциклів наведена в табл.3. Спостерігається зменшення мікротвердості для всіх структурних складових, що пов'язане із розпаданням пересиченого твердого розчину основи.

Таблиця 3

Мікротвердість і об'ємний вміст структурних складових плазмового покриття ВТН

Структурна складова	Об'ємний вміст структурної складової, %	Мікротвердість H_{100} , МПа					
		До ТЦО	Кількість циклів ТЦО				
			2	4	6	8	10
Евтектичні області	12-14	9750	9100	8740	7800	7150	7175
Білі шари	70-80	11340	10250	9100	7750	6800	6780

Виявлено, що ТЦО супроводжується розвитком релаксацийних процесів, які підвищують пластичність напвлених покриттів, що узгоджується з даними інших досліджень. Встановлено, що термоциклювання в діапазоні температур фазових перетворень знижує пористість і підвищує міцність зчеплення плазмового покриття порівняно із вихідним без ТЦО /табл.2/. Підвищення адгезійно-когезійних властивостей зумовлене інтенсифікацією дифузійних процесів при ТЦО.

Проведено комплексне дослідження процесів, що протікають при лазерній обробці в перехідній зоні "покриття-підкладка". Металографічні дослідження проводились на мікроструктурах, отриманих в режимі "фазовий контраст". Для виявлення стану, в якому знаходяться хімічні елементи в цій зоні, були виконані дослідження по програмі "Digital-M". Для визначення кількісного складу хімічних елементів у системі "покриття-підкладка" проводився мікрорентгеноспектральний аналіз з використанням EOM.

Випробування на тертя та зношування плазмових покриттів після ТЦО показало підвищення їх зносостійкості. Це зумовлене тим, що термоциклювання дозволяє змінювати структурний стан і термодинамічну рівновагу білих шарів, підвищуючи при цьому кількість ділянок із більш пластичною евтектичною структурою. Така структура може сприяти значну долю енергії і в більшій мірі релаксувати напруження при терті. Зниження крихкості і підвищення пластичності покриття після ТЦО збільшує його здатність до утворення вторинних структур, що свідчить про його сприятливі реологічні властивості.

На поверхнях тертя покриттів, яким було надано ТЦО, утворюються суцільні оксидні плівки, в той час як на покриттях без ТЦО утворюються плівки у вигляді окремих ділянок. Передумовою цього може бути зниження корозійної стійкості білих шарів при їхньому розпаданні. Стійкість проти спрацювання покриття ХТН після ТЦО підвищується більше порівняно з ВТН, спостерігається зниження коефіцієнта тертя. Триботехнічні випробування при високих температурах показали, що стійкість проти спрацювання вихідних плазмових покриттів і після ТЦО приблизно однакова. Це пояснюється повним розпадом твердих метастабільних структур та інтенсивним окисленням покриттів через їхню пористість.

Отримані результати дозволяють рекомендувати для деталей вузлів тертя, що експлуатуються в умовах невисоких температур напilenі покриття з додатковою ТЦО або дворазово оплавлені, а при високих температурах – оплавлені плазмові покриття.

Шостий розділ присвячено розробці двошарових покриттів на основі легованого боридного і плазмового евтектичного покриттів для роботи при підвищених температурах в режимі теплостійкості.

Оскільки інтенсифікація дифузійних процесів ТЦО призводить, з одного боку, до підвищення адгезії, а при тривалому її впливі – до деградації вихідної структури та фазового складу, нами проведено дослідження властивостей двошарового покриття з бар'єрним боридним шаром, нанесеним лазерним легуванням з наступним термоцикуванням /рис. IIa/. Проведені дослідження показали, що бар'єрні прошарки являють собою структуру евтектичного типу на основі системи Fe-B-C /рис. IIб/.

Характер цієї структури і ступінь її нерівноважності залежать від режимів лазерної обробки. Виявлено, що використання в якості обмазки суміші B+B₄C призводить до збільшення товщини шару порівняно з легуванням одним аморфним бором. Результати рентгеноспектрального аналізу свідчать, що при легуванні аморфним бором основною зміцнюючою фазою являється монокристал FeB, тоді як при легуванні в суміші B+B₄C зміцнююча фаза представлена в однаковій мірі і FeB і Fe₂B. Для обох



Рис. II. Мікроструктура двошарового покриття, x 150 /а/ і легованого боридного шару, x 2000 /б/.

обмазок встановлена підвищена концентрація вуглецю /1,5% і бору /2,2% в приповерхневому шарі. При цьому бор знаходиться тільки в зоні легування, де мало місце повне розплавлення сталі. Мікротвердість легованих шарів в залежності від режимів лазерної обробки може змінюватися в межах 8000-12000 МПа.

Досліджено вплив термоциклічної обробки на структуру, фазовий і хімічний склад легованих шарів. Показано, що по мірі збільшення кратності термоциклювання товщина шару росте і відбувається перерозподіл вмісту бору і вуглецю в поверхневому шарі при зростанні однорідності структури. Змінюється фазовий склад, зникає фаза $Fe/C, B/6$ і з'являється борид Fe_2B . Аналіз отриманих даних дозволив сформулювати механізм перерозподілу легуючих елементів. Встановлено, що при легуванні сталь У8 більш схильна до утворення тріщин, ніж сталь І2ХІВНЭТ. При цьому вірогідність їх утворення вища при легуванні в суміші $B+B_4C$, що зумовлено складом зміцнюючих фаз, більшою товщиною і мікротвердістю шару. ТЦО суміщена з відпуском при температурі вище точки Ac_1 усуває основні причини виникнення холодних тріщин. Експериментально встановлено, що міцність зчеплення плазмового покриття із легованим шаром вища, ніж із сталлю підкладкою.

Виявлено, що двошарові покриття на основі евтектичних сплавів ВТН і ХТН переважають по жаростійкості в інтервалі температур від 20 до 800°C аналогічні без підшарка. Це зумовлене утворенням на поверхні покриття суцільної захисної оксидної плівки шпінельного типу, що містить B_2O_3 . Проведений рентгеноспектральний аналіз зразків з двошаровим покриттям, підданих тривалим високотемпературним випробуванням в режимі термоциклювання, не виявив взаємної дифузії елементів евтектичного покриття з бар'єрним шаром. Спостерігається лише дифузія бору в плазмове покриття, а також у підкладку із бар'єрного шару і заліза в цей шар. Обмеженість процесів масопереносу у працюючому покритті і сприяє збереженню його високих експлуатаційних властивостей.

Триботехнічні випробування при високих температурах показали, що стійкість проти спрацювання двошарових покриттів у всьому діапазоні температур вища ніж для одношарових. Це в першу чергу зумовлене підвищенням адгезійних властивостей, зниженням градієнту твердості по глибині покриття, підвищенням термостабільності покриття завдяки бар'єрним властивостям легованого боридного прошарку. Встановлено, що оксид B_2O_3 , що утворюється при окисленні боридного підшарка, знаходячись у рідкому стані при підвищених температурах /вище 500°C/, підживлює по порах плазмового покриття поверхню тертя і служить мастилом. Коефіцієнт тертя та знос при цьому понижуються.

Виявлена кореляція між високотемпературною зносостійкістю та жаростійкістю покриттів, що підтверджує раніш зроблене припущення про можливість прогнозування за допомогою термодинамічного аналізу температурного режиму працездатності евтектичних покриттів.

У цьому розділі подано результати дослідно-промислової апробації, техніко-економічної ефективності та впровадження результатів роботи. Розглянуті особливості технологічних процесів нанесення евтектичних покриттів методами центробіжної біметалізації СВЧ, газополуменової, плазмової і газопорошкової лазерної наплавки, електродугового легування.

Оцінка ефективності різних методів зміцнення деталей на базі даних підконтрольної експлуатації показала, що для підвищення ресурсу обладнання, що працює при температурах, а також зниження матеріальних і трудових витрат необхідне виконання ряду умов: 1/ використання покриттів з робочим шаром товщиною не менше конструктивного запасу на зношування; 2/ використання високоенергетичних універсальних процесів нанесення покриттів на основі порошкових матеріалів; 3/ використання зносостійких матеріалів, що характеризуються комплексом практично корисних експлуатаційних властивостей, таких як технологічність, недофіцитність, жаростійкість, жароміцність, підвищені триботехнічні характеристики в широкому діапазоні температур.

Наведено результати дослідно-промислової апробації ЕП при зміцненні ряду деталей енергетичного, термічного, металургійного обладнання, технологічної оснастки: валів, гільз, штоків, шиберів, засувки пароводяної арматури, штампів, форм лиття під тиском, ролюпооператорів, термічних агрегатів, деталей насосів і вентиляторів та ін. Дані рекомендації по визначенню методу отримання покриття та складу евтектичного сплаву у відповідності до умов експлуатації деталей /температура, навантаження, середовище/.

Впровадження розроблених сплавів і покриттів на основі заліза забезпечило збільшення терміну служби деталей обладнання в 1,5-4 рази, економію чорних і кольорових металів, дозволило рекомендувати їх для експлуатації при підвищених температурах замість сплавів на нікелевій основі і отримати економічний ефект понад 1,5 млн.крб. /в цінах до 1991 р./ Експлуатаційні випробування підтвердили, що розроблена концепція створення евтектичних сплавів і покриттів з покращеними триботехнічними властивостями при підвищених температурах має добрі перспективи і може використовуватися для створення композиційних матеріалів, в яких має місце евтектична реакція між зміцнюючою фазою і матрицею з реалізацією механізму композиційного зміцнення.

В додатку наведені результати термодинамічного та рентгено-спектрального аналізу, документи по впровадженню результатів роботи у виробництво.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу та систематизації можливих шляхів підвищення зносостійкості при високих температурах розроблені теоретичні основи і експериментально обґрунтовано новий концептуальний підхід до створення композиційних сплавів і покриттів з підвищеними триботехнічними властивостями. Запропонований підхід базується на аналітичному дослідженні напружено-деформованого стану матеріалу при навантаженні його тертям, термодинамічному моделюванні та виявленні закономірностей формування структури з різним рівнем нерівноважного стану, дослідженні фазового і хімічного складу, фізико-механічних властивостей покриттів, отриманих за допомогою висококонцентрованих джерел енергії. Проведений комплекс досліджень дозволив вирішити важливу науково-технічну проблему підвищення ресурсу деталей машин нанесенням економнолегованих ЕП на основі заліза із заданим складом, структурою та експлуатаційними властивостями.

2. З метою розробки композиційних сплавів і покриттів на основі сталі 12Х18Н9Т детально вивчено механізм її зношування в діапазоні температур від 20 до 600°C з варіюванням швидкості ковзання та нормальних навантажень. Встановлено, що низька зносостійкість сталі 12Х18Н9Т визначається її гомогенною структурою, зменшенням при високих температурах і схильністю до інтенсивного окислення в умовах трибоактивації, що являється суттєвим недоліком цих сталей, який може бути усунено створенням композицій на їх основі з використанням зміцнюючих фаз.

3. Із застосуванням розрахунково-експериментального методу досліджено напружений стан, що виникає під час тертя в приповерхневих шарах композиційного матеріалу на основі сталі 12Х18Н9Т зі зміцнюючими фазами. Обґрунтовано вибір моделі сплавів з направлено-орієнтованою структурою. Встановлено взаємозв'язок між концентрацією напружень, співвідношенням механічних властивостей матриці і вилучень. В структурі матеріалу визначено області з підвищеним рівнем напружень як найбільш схильні до зародження руйнуючих процесів. Показано, що можна впливати на параметри пари тертя, а також на властивості шарів, що наносяться, приймаючи як засіб керування механізмами зношування дані по градієнту механічних і міцнісних властивостей.

4. На основі термодинамічного аналізу взаємодії евтектичних

сплавів з киснем встановлено, що при температурах 600-1100°C зміцнюючі фази TiB_2 , CrB_2 , VC утворюють оксиди Ti_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_3 і B_2O_3 , а присутні в матриці хром і залізо - Cr_2O_3 і FeO . Показано, що сумарна кількість боридів титану і хрому в сплавах корелює з вмістом оксиду бора, а концентрація Cr_2O_3 і TiO_2 пропорційні вмісту хрому і титану. Експериментальними дослідженнями жаростійкості підтверджено, що оксиди, зокрема B_2O_3 , локалізуючись на поверхні, створюють бар'єр для дифузії кисню, що запобігає залізу основу сплаву від окислення.

5. Встановлено, що диборид титану $/TiB_2/$, диборид хрому $/CrB_2/$, монокарбід ванадію $/VC/$ ефективно зміцнюють композицію на основі сталі І2ХІ8Н9Т, підвищуючи зносостійкість, твердість, міцність, корозійну стійкість і жаростійкість. Висока зносостійкість сплавів евтектичного складу визначається дисперсністю і високим ступенем диференційованості складових евтектики, здатністю локалізації пластичної деформації в невеликих міжпластинчастих об'ємах евтектики. Показано, що структура з пластинчастими кристалами диборидів характеризується підвищеною зносостійкістю порівняно із стержневою формою, а наявність зміцнюючих фаз, що утворюються самочинно при кристалізації/композиційне зміцнення/, значно ефективніше підвищує зносостійкість сталі І2ХІ8Н9Т, ніж введення таких кристалів методами гарячого пресування /дисперсне зміцнення/.

6. Показано, що зносостійкість і низький коефіцієнт тертя в умовах високих температур визначаються здатністю сплавів утворювати на робочих поверхнях тонкі та щільні оксидні плівки. Утворення оптимальних оксидних плівок в сплавах визначається кількістю зміцнюючих фаз та їх природою. Виявлено сприятливий вплив на триботехнічні властивості при підвищених температурах оксиду бора, що утворюється у вторинних структурах. Визначені температурні інтервали працездатності евтектичних сплавів і покриттів на їх основі. Отримані математичні моделі, які встановлюють взаємозв'язок між зносом, коефіцієнтом тертя та параметрами зовнішнього впливу, що дозволяє прогнозувати триботехнічні характеристики матеріалів в залежності від конкретних умов їх використання.

7. Встановлено, що триботехнічними властивостями евтектичних сплавів можна керувати не тільки за рахунок зміцнюючих фаз, але й металевою матрицею, легуючи її елементами, які здатні розчинятись в ній і хімічно нейтральні до зміцнюючих сполук. При цьому суттєво покращується жаростійкість і антифрикційність сплавів, понижуються зсувні напруження, зменшується ефективна кількість зміцнюючої фази в порівнюваних умовах експлуатації. Леговані алюмінієм і кремнієм

сплави системи ХТН переважають по жаростійкості та зносостійкості сплави на нікелевій основі ПГ-ІОН-01 і ПГ-СРЗ. Розроблений спосіб отримання евтектичних сплавів дозволяє поширити номенклатуру легуючих елементів на більшість елементів Періодичної системи.

8. Розроблені технологічні прийоми отримання ЕП з порошкових матеріалів з використанням висококонцентрованих джерел енергії /лазер, плазма, СВЧ/, вивчені закономірності формування структури покриттів та їх властивості. Встановлено, що твердість та зносостійкість покриттів залежать від вмісту евтектики та її дисперсності, які в свою чергу визначаються концентрацією зміцнюючої фази і швидкістю охолодження. Показано, що варіюванням вмісту зміцнюючих фаз в евтектичних порошкових матеріалах /від 0 до 30 об. %/ і джерелом нагрівання можна задавати твердість наплавлених покриттів в широкому діапазоні значень – від 200 до 1350 НВ.

9. Триботехнічні характеристики напилених плазмових ЕП в залежності від навантаження і температури визначаються рівнем їх нерівноважного стану, пористістю та адгезійно-когезійними властивостями. Нормальний режим тертя плазмових покриттів знаходиться у вузькому інтервалі навантажень і температур. При навантаженнях $P > 3 \text{ МПа}$ /спостерігається інтенсифікація зносування в результаті крихкого руйнування покриття, що супроводжується викридуванням його елементів, яким властиві абразивні властивості. При підвищених температурах $t > 600^\circ\text{C}$ /низька зносостійкість зумовлена пониженням твердості покриття в результаті розпадання пересичених твердих розчинів, а зносування здійснюється шляхом вилучення із зони тертя оксидних плівок, що інтенсивно утворюються на пористій поверхні тертя.

10. Вперше запропоновані технологічні процеси підвищення експлуатаційних властивостей плазмових ЕП шляхом їх лазерної обробки в режимі термоциклювання і дворазового оплавлення. Показано, що за допомогою ТЦО в діапазоні температур фазових перетворень можна підвищувати адгезію плазмових покриттів, зберігаючи при цьому одночасно необхідний рівень нерівноважного стану, а значить цілеспрямовано керувати їх триботехнічними властивостями.

11. Розроблені двошарові ЕП для експлуатації при підвищених температурах в режимі теплових змін, досліджені особливості одержання бар'єрного боридного прошарку лазерним легуванням і термоциклюванням, його структура, фазовий і хімічний склад. Зносостійкість двошарових покриттів в широкому інтервалі температур вища одношарових, що зумовлено підвищенням адгезійних властивостей, термостабільності та жаростійкості, зниженням градієнту властивостей по глибині покриття, здатністю утворювати захисні оксидні плівки, що містять B_2O_3 .

12. Експлуатаційні випробування деталей машин з ЕП, одержаними з використанням технологічних процесів, розроблених на базі концентрованих джерел енергії, дозволили зменшити витрати дефіцитних високолегованих сталей і підвищити їх робочий ресурс більш, ніж в 1,5-4 рази. Розроблені матеріали, покриття і методи їх нанесення впроваджені на ряді машинобудівельних підприємств України.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИСЛАДЕНО У НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

1. Лабунец В.Ф., Ворошнін Л.Г., Киндрачук М.В. Износостойкие боридные покрытия. - К.: Техніка, 1989. - 159 с.
2. Износостойкие диффузионно легированные композиционные покрытия /М.В. Лучка, М.В. Киндрачук, П.И. Мельник и др. - К.: Техніка, 1993. 143 с.
3. Диффузионные карбидные покрытия /В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук - К.: Техніка, 1991. - 168 с.
4. Мудрук А.С., Киндрачук М.В., Денисенко Н.И. Повышение долговечности машин и оборудования, работающих в условиях интенсивного износа. - К.: УкрНИИТИ, 1990. - 44 с.
5. Лабунец В.Ф., Киндрачук М.В., Меркулов В.Н. Применение композиционных покрытий для повышения долговечности машин и инструмента. К.: УкрНИИТИ, 1986. - 44 с.
6. Киндрачук М.В. Применение математических методов планирования эксперимента при исследовании износостойкости многокомпонентных диффузионных покрытий // Материалы и изделия, получаемые методом порошковой металлургии. - Киев: ИПМ, 1975. - С. 46-50.
7. Киндрачук М.В. О механизме трения и контактного разрушения сплавов на основе аустенитной стали X18H9T // Исследования в области новых материалов. - Киев: ИПМ, 1977. - С. 21-25.
8. Киндрачук М.В., Лучка М.В. Износостойкость композиционных электролитических покрытий на основе диборида титана в зависимости от температуры. // Исследования в области новых материалов. - Киев: ИПМ, 1977. - С. 98-102.
9. Новый эвтектический наплавочный сплав /А.К. Щурин, В.Е. Панарин, М.В. Киндрачук и др. // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный метал. - Киев: Наук. думка, 1977. - С. 162-165.
10. Исследование износостойкости многокомпонентных диффузионных покрытий с применением математических методов планирования эксперимента /Н.Н. Голего, Л.Г. Ворошнін, В.Ф. Лабунец, М.В. Киндрачук // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1977. - Вып. II. - С. 53-55.
11. Голего Н.Н., Лабунец В.Ф., Киндрачук М.В. Исследование процессов трения и изнашивания композиционных покрытий, упрочненных диборидом титана, при высоких температурах // Диффузионное насыщение и

покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1977 - С. III-115.

12. Исследование условий получения никель-бор-хромовых композиционных покрытий на стали 45 /Г.В. Самсонов, Г.Л. Жунковский, М.В. Лучка, М.В. Киндрачук // Порошковая металлургия. - 1977. - № 1. - С. 7-9.

13. Шурин А.К., Панарин В.Е., Киндрачук М.В. Износостойкость нержавеющих эвтектических сплавов с фазами внедрения // Пробл. трения и изнашивания. - 1981. - Вып. 19. - С. 17-28.

14. Износостойкие наплавки эвтектическими сплавами на основе железа /А.К. Шурин, В.Е. Панарин, М.В. Киндрачук, Н.И. Голего // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1983. - Вып. 17. - С. 40-43.

15. Голубец В.М., Киндрачук М.В., Палечко М.И. Технологические основы нанесения и свойства эвтектических покрытий, получаемых из порошковых смесей методом центробежной биметаллизации // СХМ, 1984, № 3. - С. 95-98.

16. Панарин В.Е., Микуляк О.В., Киндрачук М.В. Возможности управления триботехническими свойствами эвтектических газотермических покрытий на основе железа с фазами внедрения // Трение и износ. - 1985 - 6, № 5. - С. 932-935.

17. Лабунец В.Ф., Киндрачук М.В., Лучка М.В. Спечка триботехнических свойств композиционных покрытий с участием бора // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1987. - Вып. 21. - С. 62-65.

18. Шурин А.К., Киндрачук М.В., Разумова Н.А. Исследование сплавов железа с дисульфидом молибдена // Металлофизика. - Киев: Наук. думка, 1978. - Вып. 71. - С. 61-63.

19. Киндрачук М.В. Об эффективности применения лазерной обработки для управления свойствами эвтектических покрытий // Прогрессивные технологии упрочнения деталей машин и инструмента с применением источников с высокой концентрацией энергии. - Пенза, 1986. - С. 57-58.

20. Бойко А.И., Денисенко Н.И., Киндрачук М.В. Повышение износостойкости молотков дробилок // Технология и организация производства. Киев: УкрНИИТИ, 1987. - № 4. - С. 14-16.

21. Бабич С.Ю., Киндрачук М.В., Глухов Ю.П. Об одной контактной задаче для предварительно напряженного слоя из сжимаемого материала // Прикладная механика. - Киев: Наук. думка, 1990 - 26, № 3. - С. 118-121.

22. Газотермические покрытия из эвтектических сплавов на основе железа с ультрадисперсной структурой /В.Е. Панарин, О.В. Микуляк, М.В. Киндрачук, А.И. Бондарь // Защитные покрытия на металлах. Киев: Наук. думка, 1988. - Вып. 22. - С. 26-30.

23. Повышение долговечности молотков установки УМК-Ф-2 /В.Г. Зацепин, М.В. Киндрачук, Н.И. Денисенко, А.С. Мудрук // Технология и организация производства. - 1988. - № 1. - С. 11-12.

24. Венедиктов В.А., Лабунец В.Ф., Киндрачук М.В. Анализ работы подшипников скольжения тяжело нагруженных узлов авиационной наземной техники // Вопросы совершенствования технологии ремонта воздушных судов. - Киев: КИИГА, 1988. - С.21-24.

25. Киндрачук М.В., Бобина М.Н., Лоскутов В.Ф. Влияние лазерной обработки на износостойкость боридных и карбидных покрытий на литых сталях: Материалы совместной советско-китайской научно-техн. конф. - Киев: КПИ - 1991. С.53-55.

26. Киндрачук М.В., Панарин В.Е., Микуляк О.В. Использование высококонцентрированных источников энергии для повышения триботехнических свойств эвтектических покрытий. // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1993. - Вып.27. - С.50-54.

27. Киндрачук М.В., Бобина М.Н., Лоскутов В.Ф. Структура и свойства борсодержащих покрытий, получаемых на литых сталях с применением высококонцентрированных источников энергии: Материалы научно-техн. конференции литейщиков КНР и СНГ. - Харбин, 1992. - С.28-30.

28. Опыт применения упрочняющих покрытий и наплавов для защиты рабочих органов кормоприготовительных машин / Н.И.Денисенко, А.С.Мудрук, М.В.Киндрачук и др. // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1992. - Вып.26. - С.68-71.

29. Киндрачук М.В. Влияние лазерной обработки и термоциклирования на износостойкость эвтектических плазменных покрытий в широком интервале температур. // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Материалы научно-техн. конф. - Новополоцк, 1993. - С.29.

30. Киндрачук М.В. Влияние лазерной обработки и термоциклирования на триботехнические характеристики эвтектических плазменных покрытий на основе железа. // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1994. - Вып.23. - С.45-50.

31. Киндрачук М.В. Применение лазерного легирования и термоциклирования для получения износостойких боридных покрытий // Защитные покрытия на металлах. - Киев: Наук. думка, 1994. - Вып.23. - С.37-40.

32. Киндрачук М.В. Зносо- і корозійна стійкість плазмових евтектичних покриттів з боридним і карбідним зміцненням після лазерної обробки і термоцикування // Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробні галузі АПК: Матеріали науково-техн. конф., - Київ: ЦДУХТ, 1993. - С.589-590.

33. Киндрачук М.В. Вплив структури евтектичних плазмових покриттів на їхні триботехнічні властивості в широкому діапазоні температур // ФХМ. - 1994. - № 4. - С.66-71.

34. Кіндрачук М.В. Термодинаміка окислення та трибологічна оцінка евтектичних покриттів //ХХІІІ.-1995, № 2.-С.117-120.

35. Кіндрачук М.В. Создание износостойких эвтектических покрытий на основе железа с применением высококонцентрированных источников энергии. //Сборник научных и методических трудов ИГиЛ к 50-летию инженерно-физического факультета.-Киев, ИГиЛ,1994.-С.39-41.

36. Кіндрачук М.В.,Гордиенко С.П.,Лучка М.В. Термодинамический анализ взаимодействия эвтектических сплавов на основе стали ІХХІВНТ с воздухом.//Порошковая металлургия.1994.№7-8.-С.93-96.

37. Кіндрачук М.В.,Душек Ю.Я.,Лучка М.В. Аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния композиционного материала,нагруженного силами трения. //Порошковая металлургия.-1994.- № 9-10.-С.56-61.

38. Кіндрачук М.В.,Душек Ю.Я.,Лучка М.В.,Гладченко А.Н. Эволюция структуры и свойств эвтектических покрытий при трении.//Порошковая металлургия.-1995, № 5-6.-С.104-110.

39. Кіндрачук М.В.,Панасюк О.В. Формування евтектичних покриттів різного функціонального призначення. //Проблеми металознавства та обробки легованих сталей: Матеріали науково-техн.семінару.-Київ, 1994.- С.9-10.

40. Кіндрачук М.В.,Панарін В.Е.,Москаленко Ю.Н. Вплив термоциклічної обробки на структуру і властивості плазмових покриттів із евтектичних сплавів на основі заліза //Металознавство та обробка металів.-1995, № 1.-С.38-45.

41. Кіндрачук М.В. Підвищення експлуатаційних властивостей сталей термоциклуванням в процесі лазерного легування бором //Металознавство та обробка металів.-1995, № 2.-С.51-53.

42. Кіндрачук М.В. Особливості формування багаточарових захисних покриттів та їх експлуатаційні характеристики при підвищених температурах //Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість: Матеріали науково-техн.конф.-Київ, УДУХТ, 1995.-С.491.

43. Головки Л.Ф.,Коваленко В.С.,Кіндрачук М.В. Лазерное термомоциклирование износостойких поверхностных слоев //Лазерные технологии 95 "ІІІА 95": Материалы Пятой международной конференции.- Елаугра, 1995.-С.17-18.

44. Кіндрачук М.В.,Панарин В.Е.,Лабунец В.Ф. Технологические аспекты повышения износостойкости эвтектических газотермических покрытий //Проблемы трения и изнашивания, 1995.-Вып.45 /в печ./.

45. А.с.І050179.Порошковый материал для износостойких покрытий/ М.В.Кіндрачук,Л.И.Корнев,И.В.Мелентьев и др. - №3411077/02; Заявл. 5.03.82.

46. А.с.1055179. Сплав для наплавки/ А.К.Шурин, В.Е.Панарин, М.В.Киндрачук и др. - № 3404286/02; Заявл. 5.03.82.

47. А.с.1144411. Состав порошковой смеси для комплексного насыщения стальных изделий/ В.М.Голубец, М.И.Пашечко, М.В.Киндрачук - № 3607380/02; Заявл. 16.06.83.

48. А.с.1152266. Порошковая смесь для комплексного насыщения стальных изделий/ В.М.Голубец, М.И.Пашечко, М.В.Киндрачук. - № 3610254/02; Заявл. 27.06.83.

49. А.с.1497271. Состав для борирования/ В.Ф.Лоскутов, О.В.Семенченко, М.В.Киндрачук и др. - № 1497271/02; Заявл. 15.07.87.

50. А.с.1626723. Способ подготовки поверхности металлических изделий в вакууме перед нанесением покрытия/ В.Е.Панарин, М.А.Васильев, М.В.Киндрачук и др. - № 4694714/21; Заявл. 16.03.89.

51. А.с.1627589. Способ обработки стальных изделий/ В.Г.Хижняк, В.Ф.Лоскутов, М.В.Киндрачук и др. - № 4644042/02; Заявл. 17.12.88.

52. А.с.1220378. Состав для комплексного насыщения стальных деталей/ В.Ф.Лоскутов, В.Г.Хижняк, М.В.Киндрачук и др. - № 3504161/02; Заявл. 25.04.83.

53. А.с.1479528. Способ закалки штампов/ М.В.Киндрачук, В.А.Лисовой, Н.И.Кобаско и др. - № 4176768/31-02; Заявл. 6.01.87.

54. А.с.1202283. Способ нанесения покрытий на основе карбидов ванадия на поверхность изделий из углеродистых сплавов и железа/ В.Ф.Лоскутов, В.Г.Хижняк, М.В.Киндрачук и др. - № 3615561/02; Заявл. 1.09.83.

55. А.с.1244937. Способ нанесения карбидных покрытий на изделия из железа и стали/ В.Ф.Лоскутов, В.Г.Хижняк, М.В.Киндрачук. - № 3616719/02; Заявл. 15.03.86.

56. А.с.1234174. Состав для импрегнирования абразивных кругов/ М.Э.Натансон, М.В.Киндрачук, Н.И.Середа - № 3769914/25-38; Заявл. 1.02.86.

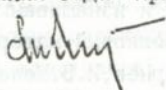
Наведений перелік наукових праць відображає основні теоретичні та експериментальні результати, які лягли в основу висновків і положень, що виносяться на захист.

В обговоренні окремих результатів роботи приймали участь: А.К.Шурін, В.Е.Панарін, О.М.Гладченко, М.М.Голего.

При вирішенні часткових задач приймали участь: У.Я.Душек, В.Ф.Лабунець, В.Ф.Лоскутов, П.І.Мельник, М.В.Лучка, В.Г.Хижняк.

В якості операторів обладнання для дослідження допомагали Є.І.Назаренко, Д.П.Новікова та ін.

При вирішенні технологічних задач приймали участь: Л.Ф.Головко, В.Є.Олійник та ін.



SUMMARY

Kindrachuk M.W. Development of theoretical and technological principles of formation eutectic coverings on the basis of iron with high tribotechnical properties at raised temperatures.

Thesis is competing the scientific degree of the doctor of technical sciences on speciality: 05.16.01 - metal science and heat treatment of metals and 05.02.04 - friction and attrition in machines, Institute of Problems Material Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

44 works and 12 copyright certificates are presented for adaption. These works contain theoretical and technological bases of the conceptual approach to creation new composite alloys and coverings with high tribotechnical properties at raised temperatures, based on optimisation of their structure, chemical structure and phase structure, thermodynamic modelling and stressed-strained condition on research, loaded by friction forces. On the basis of received mathematical models progressive technological processes of drawing wear resistance eutectic of coverings with application of concentrated sources of energy, but also improvement of their operational characteristics with help of melting and thermocycling are experimentally reasonable. A series of alloys and coverings tribotechnical of developed on the basis of iron, ensuring economies of deficitiel alloyed of elements is developed. The alloys are protected by the copyright certificates and are introduced into serial manufacture and industry.

А Н Н О Т А Ц И Я

Киндрачук М.В. Разработка теоретических и технологических принципов формирования эвтектических покрытий на основе железа с высокими триботехническими свойствами при повышенных температурах.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и 05.02.04 - Трение и износ в машинах, Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев, 1995.

Защита 44 работы и 12 авторских свидетельств, которые содержат теоретические и технологические основы концептуального подхода к созданию нового класса композиционных сплавов и покрытий с высокими триботехническими свойствами при повышенных температурах, базирующегося на оптимизации их структуры, химического и фазового состава, термодинамическом моделировании и исследовании напряженно - деформированного состояния материала, нагруженного силами трения. На основе полученных математических моделей экспериментально обоснованы прогрессивные технологические процессы нанесения износостойких эвтектических покрытий с применением концентрированных источников энергии, а также улучшения их эксплуатационных характеристик с помощью оплавления и термоциклирования. Разработана серия сплавов и покрытий триботехнического назначения на основе железа, обеспечивающих экономно дефицитных легирующих элементов. Сплавы защищены авторскими свидетельствами, внедрены в серийное производство и промышленность.

Ключові слова

Евтектика, покрытия, структура, легування, лазер, плазма, температура, термоциклирование, напружено-деформований стан, коефіцієнт тертя, триботехнічні властивості

453518

АВ 33.966

Підп. до друку 23.11.95. Формат 60х84/16. Папір офс.
Друк. офс. Умов. друк. л. 2. 32. Умов. фарб.-відб. 2,40
Обл.-вид. л. 1.8. Тираж 100 прим. Зам. 875.

Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.

Дільниця Оперативної поліграфії
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.