

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ПОЛЯКОВ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 621.785.539:669.781:669.3

**ЗМІЦНЕННЯ СПЛАВІВ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ
НА ОСНОВІ БОРИДНИХ ФАЗ СФОРМОВАНИХ
В МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

Спеціальність 05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металознавства та термічної обробки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Чернега Світлана Михайлівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри металознавства та
термічної обробки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Іванченко Володимир Григорович,
Інститут металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
головний науковий співробітник лабораторії
евтектичних сплавів

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Шипицин Сергій Якович,
Фізико-технологічний інститут
металів та сплавів НАН України,
завідувач відділу високоміцних конструкційних
та спеціальних сталей

Захист відбудеться «27» грудня 2016 р. о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37, інженерно-фізичний факультет, корпус № 9, аудиторія 203.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «26» листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12
кандидат технічних наук, доцент



О. В. Степанов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Покращення експлуатаційних характеристик деталей машин, механізмів та інструментів, що працюють в умовах інтенсивного зношування, є можливим за умови використання відповідних захисних покриттів, які б оптимально поєднували високу твердість, пластичність та зносостійкість. Для здешевлення деталей застосовують вуглецеві сталі із захисними покриттями. Одними з таких захисних покриттів є покриття на основі бору, які також можна застосовувати для продовження терміну експлуатації деталей із високолегованих сталей та твердих сплавів. Змінювати структуру, фазовий склад та властивості боридних шарів можливо комплексним насиченням завдяки додаванню в реакційне середовище при хіміко-термічній обробці (ХТО), крім сполук, що слугують за джерело бору, різних хімічних елементів, таких як: Cu, Ni, Co, Ti та інших, які призводять до утворення твердих розчинів у боридних шарах та зміни характеристик, зокрема підвищення пластичності та зносостійкості шарів, як це досліджено у роботах Л. Г. Ворошніна, В. Б. Далісова, В. І. Похмурського та інших.

Проте недоліком процесу борування та комплексного борування є низька швидкість росту дифузійного шару, що призводить до 2–6 годинної тривалості дифузійного насичення. Одним із методів інтенсифікації процесу ХТО є застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП), що дозволяє пришвидшити процеси дифузії та утворення дифузійних шарів. Вивчення змін структури, фазового та хімічного складу, а також зносостійкості та інших фізико-механічних характеристик покриттів, сформованих на сталях та сплавах під дією магнітного поля, є одним із напрямків металознавства та термічної обробки металів, і тому можна стверджувати, що зазначені дослідження дозволять отримувати комплексні зносостійкі покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які матимуть значний інтерес для промисловості, зокрема для таких галузей, як машинобудування, суднобудування, інструментальне виробництво, у чому і полягає актуальність та перспективність цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі металознавства та термічної обробки (МТО) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» і є продовженням тематик держбюджетних НДР, що виконувались на кафедрі МТО: «Створення та оптимізація режимів нанесення наноструктурних покриттів на поверхні сплавів, що містять нікель, хром, алюміній, методом високоенергетичної та фрикційної обробки поверхні» (номер держреєстрації 0111U005880); «Поверхневі наноструктурні шари на виробках, що працюють при терті, отримані високоенергетичними методами та фрикційною обробкою» (номер держреєстрації 0112U006105).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методу ХТО сталей та сплавів боруванням чи боромідненням за рахунок одночасного застосування ЗМП, з'ясування процесів структуро- та фазоутворення дифузійних боридних шарів на сталях і сплавах, а також встановлення впливу ЗМП на експлуатаційні характеристики покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Дослідити вплив ЗМП на параметри процесу ХТО – борування та бороміднення.

2. Вдосконалити процеси поверхневого насичення сталей та сплавів В чи одночасно В і Сu при ХТО в порошкових сумішах шляхом застосування ЗМП.

3. Вивчити механізми структуроутворення дифузійних боридних покриттів в умовах дії ЗМП.

4. Дослідити вплив дії ЗМП на формування комплексних дифузійних боридних шарів на сталях та сплавах, їх товщини, фазового та хімічного складу, мікротвердості, тріщиностійкості, шорсткості та зносостійкості, отриманих у порошкових сумішах за участю бору та міді.

5. Оцінити ефективність застосування комплексних боридних покриттів, отриманих за дії ЗМП в умовах виробництва.

Об'єкт дослідження – дифузійні боридні шари, отримані в порошкових середовищах при комплексному насиченні поверхні сталей і сплавів бором чи бором та міддю в умовах дії ЗМП.

Предмет дослідження – структура, фазовий і хімічний склад, мікротвердість, тріщиностійкість, шорсткість та зносостійкість дифузійних боридних шарів на сталях та сплавах, отриманих при комплексному насиченні в борувальних порошкових середовищах в умовах дії ЗМП.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: металографічний, рентгеноструктурний та мікрорентгеноспектральний аналізи, растрова електронна мікроскопія, мікроіндентування, профілометричні дослідження шорсткості поверхні, гравіметричний аналіз, випробування на зносостійкість в умовах сухого ковзання.

Наукова новизна отриманих результатів. Розширено уявлення щодо формування фазового та хімічного складу, структури та фізико-механічних властивостей дифузійних боридних покриттів, отриманих на сталях та сплавах в умовах дії ЗМП.

1. Вперше розкрито закономірності впливу ЗМП на структурно-фазові зміни в дифузійному боридному шарі, отриманому на сталях та сплавах, які полягають у перерозподілі кількісного співвідношення боридних фаз у покритті, зміні періодів кристалічних ґраток, зменшенні об'єму елементарних ґраток боридних фаз та зростанні в 2 рази товщини боридних шарів за однакових умов ХТО.

2. Теоретично обґрунтовано термодинамічними розрахунками перебігу хімічних реакцій при дифузійному боруванні та боромідненні сплавів можливість формування боридних фаз на основі базових та легуючих елементів у сплавах та окремо фази міді в дифузійному шарі, що експериментально підтверджено рентгеноструктурними дослідженнями.

3. Вперше показано, що застосування ЗМП при дифузійному насиченні призводить до підвищення в 6 разів коефіцієнтів дифузії бору ($1,3 \cdot 10^{-6}$ см²/с) та в 5 разів міді ($4,1 \cdot 10^{-10}$ см²/с), порівняно із ХТО без дії ЗМП, та зменшення на 20 % енергії активації бору (72 кДж/моль) і на 14 % міді (155 кДж/моль), що суттєво впливає на швидкість утворення дифузійного боридного покриття та дає можливість зменшити тривалість дифузійного насичення сталей і сплавів в 2 рази.

4. Вперше встановлено, що поряд з класичними закономірностями утворення боридних фаз та твердих розчинів заміщення на основі боридних фаз (Fe,Me)₃B, (Fe,Me)₂B при введенні мідновмісних сполук у насичуюче середовище, фіксується формування на поверхні і приповерхневій фазі FeB окремих вкраплень фази Сu,

неправильної багатогранної форми витягнутої в напрямку дифузії, яка в умовах зношування виконує роль твердого мастила і сприяє зменшенню коефіцієнта тертя, що відкриває нові можливості для подальшого підвищення експлуатаційних характеристик дифузійних боридних покриттів.

5. Встановлено вплив ЗМП на фізико-механічні властивості боридних покриттів на сталях і сплавах при боруванні й боромідненні та доведено, що застосування ЗМП призводить до підвищення мікротвердості дифузійних шарів, сформованих на вуглецевих сталях на 1,5–2 ГПа (19–20 ГПа), хромомарганцевих сталях на 4–5 ГПа (19–19,5 ГПа), твердих сплавах на 2–3 ГПа (30–31 ГПа), що пов'язано зі зменшенням областей когерентного розсіювання; спостерігається зростання тріщиностійкості в 1,3 рази ($K_{Ic} = 2,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$) та напружень сколювання в 1,4 рази (345 МПа), зменшення характеристик шорсткості покриттів – R_a в 1,3 рази і R_z в 1,2 рази та підвищення зносостійкості боридних шарів у 1,5–1,7 рази.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами роботи запропоновано зносостійкі дифузійні боридні покриття, отримані при комплексному насиченні бором та міддю в умовах дії ЗМП, які можна використовувати для підвищення працездатності деталей машин та механізмів, що працюють в умовах зношування. Застосування ЗМП малої магнітної індукції (0,35–0,45 мТл) дозволяє підвищити фізико-механічні властивості (мікротвердість, тріщиностійкість, шорсткість, зносостійкість) боридних покриттів та зменшити тривалість насичення сталей і сплавів в 2 рази, що призводить до зменшення енерговитрат, трудових витрат та амортизації обладнання, яке використовується при ХТО.

Запропоновано способи борування та бороміднення сталевих виробів в умовах дії ЗМП (№ 108781 від 25.07.2016 р., Бюл. № 14 та № 109188 від 10.08.2016 р., Бюл. № 15) і склади порошкової суміші для бороміднення сталевих виробів (№ 83894 від 10.10.2013 р., Бюл. № 19 та № 109189 від 10.08.2016 р., Бюл. № 15).

Матеріали дисертації можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Матеріалознавство» та «Фізичні основи зношування».

Отримані в роботі комплексні дифузійні боридні покриття пройшли випробування на підприємстві ТОВ НВП «Навігатор Л» на деталях кулачкового диференціалу, а саме: внутрішній та зовнішній зірочці диференціалу, які експлуатуються в умовах тертя. Випробування показали, що нанесення розроблених дифузійних боридних покриттів дозволяє підвищити працездатність зірочок диференціалу в 1,5–2 рази порівняно з азотованими покриттями.

Особистий внесок здобувача. Пошук і критичний аналіз літературних даних, проведення процесів дифузійного насичення при одночасній дії ЗМП та без його впливу, дослідження структури, кінетики росту, мікротвердості, тріщиностійкості та зносостійкості отриманих покриттів на сталях та сплавах здобувачем проведено самостійно. Автор приймав безпосередню участь в обговоренні експериментальних результатів, написанні статей, патентів та підготовці доповідей на конференції.

Формулювання теми, постановка завдань, вибір об'єктів дослідження, аналіз та узагальнення отриманих результатів, написання проміжних та загальних висновків здійснено разом з науковим керівником д.т.н., проф. С. М. Чернегою; дослідження мікроструктури та розподілу елементів між фазовими складовими виконано в Центрі електронної мікроскопії НТУУ «КПІ» разом із провідним

інженером Ю. М. Романенко; рентгеноструктурний аналіз поверхні дифузійних боридних покриттів виконано в Центрі рентгеноструктурного аналізу «Rigaku» НТУУ «КПІ» разом із д.ф.-м.н., проф. М. В. Карпцем та к.т.н. А. П. Бурмаком; вимір шорсткості поверхні боридних покриттів та обговорення отриманих результатів здійснено в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України разом із науковим співробітником О. О. Бутенко.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дослідження апробовано на міжнародних наукових конференціях і семінарах: Международная научно-техническая конференция «Порошковая металлургия: современное состояние и будущее» (Украина, Киев, 22–25 апреля 2014 г.); IV-я международная Самсоновская конференция «Материаловедение тугоплавких соединений» (Украина, Киев, 21–23 мая 2014 г.); VIII-а конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» (Україна, Київ, 28–30 травня 2014 р.); XV-а міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Україна, Київ, 23–27 червня 2014 р.); V-а міжнародна конференція «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» (Україна, Львів, 24–27 червня 2014 р.); VIII International science conference for young researchers «Technical science and industrial management» (Bulgaria, Varna, 15–16 September 2014); XI International congress «Machines, technologies, materials» (Bulgaria, Varna, 17–20 September 2014); XII International Scientific Conference «Unitech 2014» (Bulgaria, Gabrovo, 21–22 November 2014); XII International congress «Machines, technologies, materials» (Bulgaria, Varna, 16–19 September 2015); Symposium – European Materials Research Society «E-MRS» (Poland, Warsaw, 15–18 September 2015); VIII-а міжнародна конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Україна, Київ, 23–24 квітня 2015 р.); VII-а міжнародна науково-технічна конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Україна, Київ, 21–22 травня 2015 р.); V-я международная конференция «HighMatTech» (Украина, Киев, 5–8 октября 2015 г.); IV-а міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (Україна, Київ, 7–10 жовтня 2015 р.); V International youth science forum «Litteris et artibus» (Ukraine, Lviv, 26–28 November 2015); V-а Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах-5» (Україна, Київ, 3–5 грудня 2015 р.); International Science and Methodological Conference «University Science-2016» (Ukraine, Mariupol, 19–20 May 2016); XVII-а міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Україна, Одеса, 21–24 червня 2016 р.); XIII International scientific congress «Machines, technologies, materials 2016» (Bulgaria, Borovets, 16–19 March 2016); IV International scientific congress «Agricultural machinery 2016» (Bulgaria, Varna, 22–25 June 2016).

Публікації. Результати дисертації представлені у 34 друкованих наукових працях, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях, з них 3 у іноземних виданнях та 5 у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та РІНЦ; 21 робота в збірниках матеріалів доповідей міжнародних наукових конференцій; отримано 4 патента України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків до розділів та загального висновку, списку використаних джерел літератури (194 найменувань) та 6 додатків. Загальний обсяг роботи становить 176 сторінок, включаючи 73 рисунка та 41 таблицю. Акт виробничих випробовувань наведено в додатку на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано коротку характеристику дисертації; обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету і завдання дослідження; визначено методи, об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; наведено дані щодо публікації, апробації результатів дослідження, структури й обсягу дисертації; зазначено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проаналізовано літературні джерела щодо сучасного стану наукової проблеми створення захисних зносостійких покриттів на основі бору. Проведено порівняльний аналіз методу дифузійного насичення в умовах дії ЗМП із традиційними методами поверхневого зміцнення металів. Наведено методи нанесення на вироби боридних покриттів, кожен із них, маючи певні особливості, забезпечує отримання покриттів, які відрізняються за складом, структурою, щільністю і комплексом корисних властивостей. Варто зазначити, що дифузійні покриття на відміну від покриттів, отриманих іншими методами, характеризуються поєднанням стабільності властивостей у різних умовах експлуатації, високою адгезією з основою за рахунок значного проникнення насичуючих елементів в основу, а елементів основи в покриття. На підставі аналізу науково-технічної літератури, що стосується питання отримання боридних покриттів, обрано метод дифузійної хіміко-термічної обробки з одночасною дією ЗМП та сформульовано завдання дослідження.

У **другому розділі** описано використані матеріали, методику отримання захисних боро- та бороміднених покриттів із використання ЗМП та без його застосування, а також методи досліджень, використані під час виконання дисертаційної роботи.

Усі покриття, досліджені в роботі, отримано методом дифузійного насичення при одночасній дії ЗМП або без його впливу. Традиційний процес борування та бороміднення проводили в тиглях із нержавіючої сталі з плавким затвором при температурі 950...975 °С, а для проведення ХТО з одночасною дією ЗМП використовували спеціально розроблену установку.

Для збільшення оптичного контрасту між різними структурними складовими мікрошліфи піддавали хімічному та тепловому травленню.

Мікроструктурні дослідження покриттів та вимірювання товщини дифузійних шарів проводили на металографічному мікроскопі Axio Observer A1m, Zeiss в інтервалі збільшень 100...1000 разів.

Визначення мікротвердості проводили на приладі ПМТ – 3 не менше, ніж у 15–20 полях зору при навантаженні 0,20–0,98 Н з точністю ± 300 МПа та мікротвердомірі DuraScan відповідно до стандарту ГОСТ 9450 – 76.

Фазовий склад, кількісний аналіз фаз, періоди кристалічної ґратки, об'єм елементарних ґраток фаз, області когерентного розсіювання в боридних покриттях

аналізували на рентгенівському дифрактометрі Ultima-IV у монохроматичному Cu-K α випромінюванні ($\lambda=0,15418$ нм). Обробку рентгенівських дифрактограм виконували за допомогою програмного комплексу PDXL.

Дослідження хімічного складу дифузійних боридних покриттів проводили мікрорентгеноспектральним аналізом на растровому електронному мікроскопі – REM – 106I при збільшенні 500–2500 раз, з точністю 0.01 мас. %.

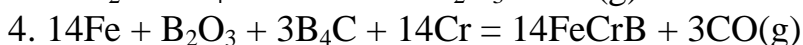
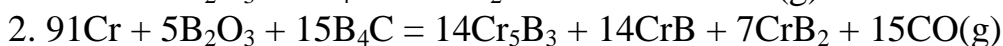
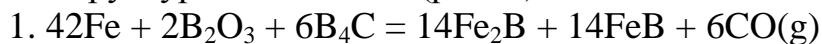
Дослідження топографії поверхні дифузійних боридних покриттів проводили на безконтактному інтерференційному 3D профілографі «Micron – alpha» («Micron – beta»), який дозволяє реєструвати топографію поверхні шляхом обробки послідовності інтерференційних даних (картин), що реєструються цифровою камерою при зміщенні опорного (еталонного) дзеркала та дозволяє будувати 2D і 3D профілі поверхні; кількісно оцінювати характеристики поверхні; обчислювати об'єм виступу (впадини); спостерігати інтерференційні картини.

Випробування покриттів на зносостійкість здійснювали на машині тертя в умовах сухого ковзання та за методом згідно з ГОСТ 26614 – 85 «Антифрикційні порошкові матеріали. Метод визначення триботехнічних властивостей».

У **третьому розділі** роботи наведено результати розрахунку коефіцієнтів дифузії (k_d) В і Сu та термодинамічного потенціалу протікання хімічних реакцій при боруванні та боромідненні в різних фізико-хімічних умовах.

Встановлено, що при дифузійному боруванні без дії ЗМП k_d бору змінюється від $2,4 \cdot 10^{-7}$ см²/с у поверхневих шарах (5–15 мкм) до $1,1 \cdot 10^{-8}$ см²/с у шарах, що межують із матрицею (50 мкм). Накладання магнітного поля призводить до збільшення k_d і при боруванні з одночасною дією ЗМП він відповідно змінюється від $1,3 \cdot 10^{-6}$ см²/с до $2,2 \cdot 10^{-7}$ см²/с. При боромідненні без дії ЗМП k_d міді змінюється від $7,8 \cdot 10^{-11}$ см²/с у поверхневих шарах (5–15 мкм) до $8,8 \cdot 10^{-12}$ см²/с у шарах, що межують із матрицею, а при накладанні магнітного поля спостерігається зростання k_d міді від $4,1 \cdot 10^{-10}$ см²/с до $2,8 \cdot 10^{-11}$ см²/с. Відповідно до теорії Дж. Маннінга пояснено ефект збільшення коефіцієнту дифузії В та Сu, що пов'язано із зменшенням енергії активації та збільшенням частоти перескоків атомів у напрямку дії магнітного поля. Описано механізм впливу електромагнітного поля на швидкість дифузії та частоту перескоків атомів.

Проведено розрахунки термодинамічного потенціалу протікання хімічних реакцій, за якими підтверджено ймовірність існування боридних фаз, виявлених рентгеноструктурним аналізом (рис. 1).



Термодинамічна ймовірність утворення боридних фаз FeB, Fe₂B, CrB, (Fe,Cr)B із підвищенням температури зростає, про що свідчить зменшення вільної енергії Гіббса (рис. 1).

Встановлено, що при насиченні сталі 40X15Г8САФ бором на поверхні формується покриття, яке складається з боридів FeB, FeCrB, CrB та Fe₂B, а при комплексному насиченні В та Сu також з'являється ймовірність присутності у дифузійному шарі скупчень Сu. Порошок Cu₂O, який використовується при боромідненні як джерело міді, може вступати в реакцію із Fe, Cr, Mn, B₄C

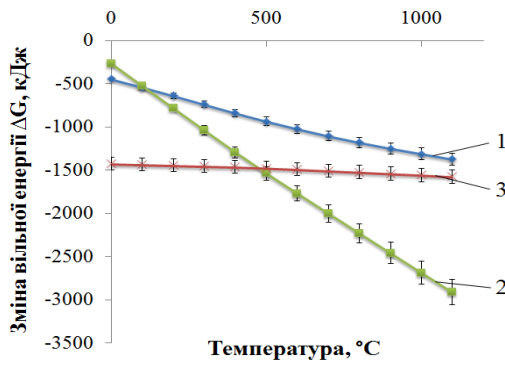


Рис. 1. Залежність зміни вільної енергії утворення боридних фаз від температури (1, 2, 3 – номер термохімічних реакцій)

порівняно з покриттями, отриманими без дії ЗМП при тривалості насичення 2 години. Так, за 2 години дифузійного насичення при накладанні ЗМП на середньовуглецевих сталях товщина покриття досягала до 200 мкм (рис. 2, в), порівняно з боридними шарами, отриманими без ЗМП – до 110 мкм (рис. 2, а). Показано, що застосування ЗМП дозволяє скоротити тривалість насичення сталей в 2 рази. Так, товщина дифузійного боридного шару на середньовуглецевих сталях без дії ЗМП виростає до 160 мкм за 4 години дифузійного насичення.

Така ж закономірність спостерігається і для боридних покриттів, отриманих при комплексному насиченні бором та міддю. Так, при боромідненні протягом 4 годин без ЗМП формуються покриття товщиною 165–200 мкм (рис. 2, г), відповідно при боромідненні в умовах дії ЗМП за 2 години дифузійного насичення виростають боридні шари товщиною 180–225 мкм (рис. 2, д).

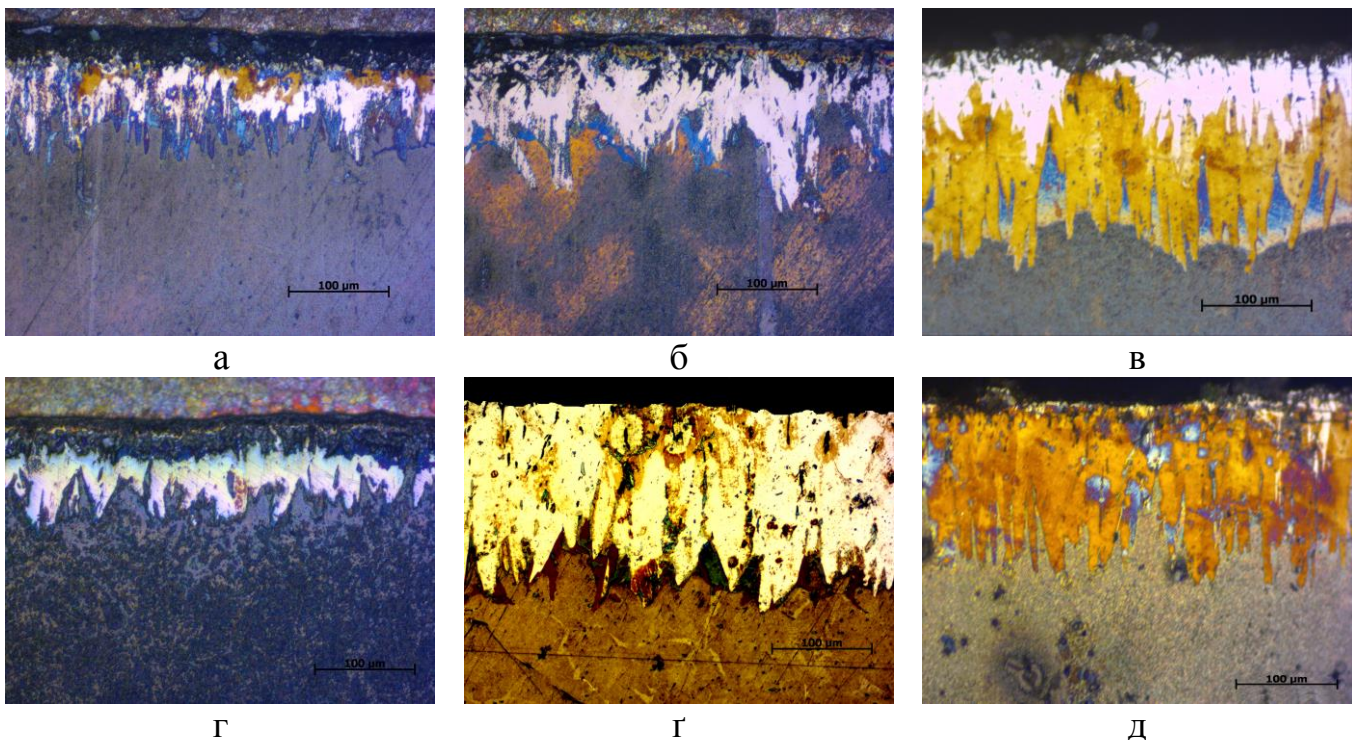


Рис. 2. Мікроструктури комплексних боридних покриттів на сталі 45, отриманих після борування без ЗМП, тривалість насичення 2 год (а), 4 год (б) та при одночасній дії ЗМП, тривалість насичення 2 год (в); бороміднення без дії ЗМП, тривалість насичення 2 год (г), 4 год (г) та в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 2 год (д), $\times 200$ (теплове травлення при 400 °C)

з утворенням атомарної міді, яка і дифундує в поверхневі шари боридного покриття.

У четвертому розділі представлено результати дослідження впливу ЗМП на структуру, фазовий та хімічний склад, мікротвердість, кінетику росту, шорсткість, тріщиностійкість та зносостійкість боридних покриттів, отриманих при комплексному насиченні бором чи бором та міддю.

Встановлено, що застосування ЗМП при дифузійному насиченні протягом 2 годин дозволяє збільшити товщину дифузійного боридного шару в 1,5–2 рази,

Дослідження мікротвердості боридних фаз після борування при одночасній дії ЗМП показало, що мікротвердість фази FeB – 19–20 ГПа, а фази Fe₂B – 17–18 ГПа, без дії магнітного поля – FeB – 17–18 ГПа, Fe₂B – 15–16 ГПа. При комплексному насиченні бором та міддю із застосуванням ЗМП отримуємо боридні шари з мікротвердістю – для фази (Fe,Cu)B – 17–18 ГПа, а для фази (Fe,Cu)₂B – 15–16 ГПа, без дії магнітного поля (Fe,Cu)B – 15,5–16,5 ГПа, а для фази (Fe,Cu)₂B – 13,5–14,5 ГПа. Таким чином, спостерігається зростання мікротвердості фаз FeB, Fe₂B та (Fe,Cu)B, (Fe,Cu)₂B на 1,5–2 ГПа, отриманих в умовах дії магнітного поля, що, ймовірно, пов'язано із подрібненням блочної структури боридних зерен до 38,3 нм порівняно із 66,1 нм для фази FeB, отриманої без дії ЗМП. При комплексному насиченні бором та міддю, спостерігаємо зменшення мікротвердості боридних шарів порівняно із боруванням.

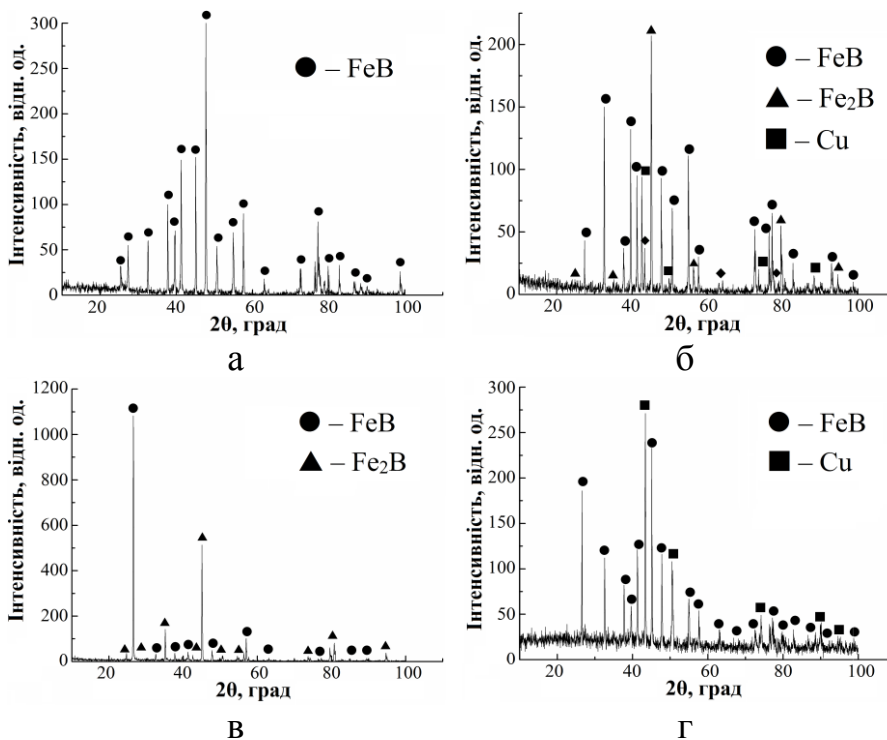


Рис. 3. Дифрактограми, зняті з поверхні сталі 45 з боридними покриттями, отриманими після борування (а), бороміднення (б) без дії ЗМП та борування (в), бороміднення (г) в умовах дії ЗМП. Дифракційні максимуми Cu відповідають кристалграфічним площинам: (111), (200), (220), (311)

фіксується наявність фаз FeB та Fe₂B (рис. 3, в). Після комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП фіксуються фази FeB та Cu (рис. 3, г). Накладання ЗМП призводить до перерозподілу кількісного співвідношення боридних фаз у поверхневих шарах, зміни періодів кристалічної ґратки, зменшення об'єму елементарної ґратки фази FeB.

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено дискретний розподіл міді в поверхневому шарі фази FeB до 20 мкм покриття. Мідні вкраплення можуть накопичуватися в порах боридних покриттів і оточувати їх стінки (рис. 4, а, табл. 1). Накладання магнітного поля при комплексному насиченні бором та міддю призводить до збільшення коефіцієнту дифузії міді в поверхневих шарах боридних покриттів від $7,8 \cdot 10^{-11}$ см²/с до $4,1 \cdot 10^{-10}$ см²/с, що спричинює швидке проникнення міді в поверхневі шари фази FeB, тому мідь при такому способі

Проведено дослідження фазового складу боридних покриттів, отриманих у різних фізико-хімічних умовах. Встановлено, що при боруванні без ЗМП у поверхневому шарі боридного покриття до 15–20 мкм формується фаза FeB (рис. 3, а), а при комплексному насиченні бором і міддю без дії ЗМП – фази FeB, Fe₂B та Cu (рис. 3, б).

При накладанні ЗМП у боридних шарах спостерігається зменшення об'єму фази FeB і на дифрактограмах поверхневих шарів боридних покриттів, отриманих після борування,

насичення проникає на глибину до 30 мкм (рис. 4, б, табл. 2), порівняно з 20 мкм при традиційному боромідненні без ЗМП.

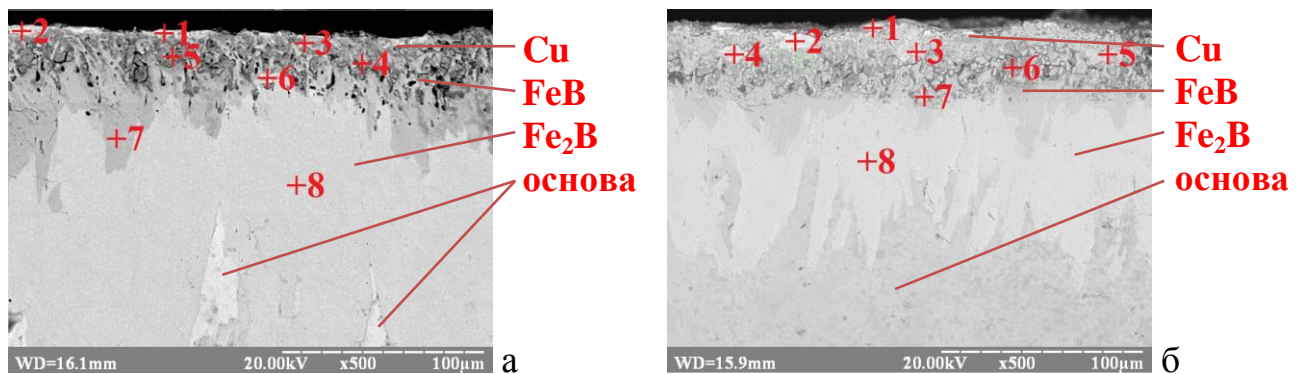


Рис. 4. Структури поперечного шліфа з дифузійним боридним покриттям, отриманого при комплексному насиченні бором та міддю без дії ЗМП (а) та в умовах дії ЗМП (б) на сталі 20 (хімічний аналіз визначався в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

Таблиця 1

Хімічний склад дифузійного шару, отриманого після комплексного насичення бором та міддю на сталі 20 без застосування ЗМП

Елементи	Позиція на структурі (рис. 4, а)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	мас. %							
Fe (К)	2,38±0,06	2,69±0,07	76,66±1,50	95,37±1,65	57,75±1,09	93,42±1,71	100±2,15	100±2,45
Cu (К)	97,62±1,50	97,31±1,80	23,34±0,70	4,63±0,31	42,25±1,01	6,58±0,29	0,00	0,00

Таблиця 2

Хімічний склад дифузійного шару, отриманого після комплексного насичення бором та міддю на сталі 20 при одночасній дії ЗМП

Елементи	Позиція на структурі (рис. 4, б)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	мас. %							
Fe (К)	1,33±0,05	22,09±0,74	1,40±0,05	66,29±2,59	77,44±2,32	82,76±2,59	83,28±2,08	100±2,60
Cu (К)	98,67±2,53	77,91±2,19	98,60±2,47	33,71±1,34	22,56±0,87	17,24±1,59	16,72±0,53	0,00

Досліджено шорсткість комплексних боридних шарів, отриманих у різних фізико-хімічних умовах, і встановлено, що найменший рівень шорсткості $R_a = 0,0553$ мкм досягається при комплексному насиченні бором та міддю із застосуванням ЗМП, порівняно з $R_a = 0,0650$ мкм при боромідненні без ЗМП, а при боруванні в ЗМП – $R_a = 0,0855$ мкм, порівняно з $0,0961$ мкм при боруванні без ЗМП.

Найвищий рівень тріщиностійкості $2,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ досягається в боридних фазах на сталі 20, отриманих у порошкових середовищах за участю міді при накладанні ЗМП, при цьому напруження сколювання складає 345 МПа . При боруванні без дії ЗМП тріщиностійкість на сталі 20 – $1,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, а напруження сколювання – 181 МПа . Підвищення величини напружень сколювання у комплексних бороміднених шарах зумовлено формуванням фаз більшої в'язкості, для яких тріщиностійкість K_{1C} в $1,4$ – $1,7$ разів вища за вихідні боридні фази (FeB , Fe_2B).

Досліджено зносостійкість боридних покриттів, отриманих у різних фізико-хімічних умовах. Встановлено, що дифузійні боридні покриття, сформовані при застосуванні ЗМП, мають більш високі триботехнічні характеристики. Так, середнє лінійне зношування боридних покриттів, отриманих в умовах дії ЗМП, зменшується в $1,5$ рази, порівняно з покриттями, отриманими без дії ЗМП. Коефіцієнт тертя

при цьому зменшується до 0,63, порівняно із 0,66 для дифузійних боридних покриттів, отриманих без дії ЗМП. При спрацюванні бороміднених покриттів, отриманих в умовах дії ЗМП, середнє лінійне зношування зменшується в 1,7 рази, а коефіцієнт тертя зменшується до 0,60, порівняно із 0,64 для бороміднених покриттів, отриманих без дії ЗМП.

У п'ятому розділі роботи представлено результати досліджень фазового та хімічного складу, товщини, мікротвердості та зносостійкості дифузійних боридних шарів, сформованих на сталі 40X15Г8САФ при дії ЗМП та без його впливу.

Мікроструктурним аналізом встановлено, що після дифузійного насичення сталі 40X15Г8САФ у боруючій суміші протягом 5 годин формуються дифузійні шари товщиною до 50 мкм (рис. 5, а), а при комплексному насиченні бором та міддю за 5 годин дифузійного насичення – до 75 мкм (рис. 5, в). Накладання ЗМП при боруванні протягом 2 годин приводить до збільшення дифузійного боридного шару в 1,8 рази (до 90 мкм) (рис. 5, б) та в 1,3 раза при комплексному насиченні бором та міддю (до 100 мкм) (рис. 5, г).

Мікроструктура боридного шару, представлена на рис. 5 (а) та рис. 5 (б), має шарувату будову та неоднорідний розподіл фаз по перерізу окремого шару через наявність вкраплень іншої фази, які виявляються локальними темними зонами в структурі шару. Покриття складається із різних фаз з розмірами зерен 1–2 мкм, багатогранної чи краплеподібної форми дещо витягнутих у напрямку фронту дифузії насичуючих елементів.

Характерним для боридного покриття є наявність дифузійних мікропор, орієнтованих вздовж підповерхневого шару (рис. 5, б). Структура боридного шару, сформованого при комплексному насиченні бором та міддю в умовах дії ЗМП, має більш виражений шаруватий характер із більшою однорідністю у межах окремого прошарку та меншою кількістю мікропор (рис. 5, г).

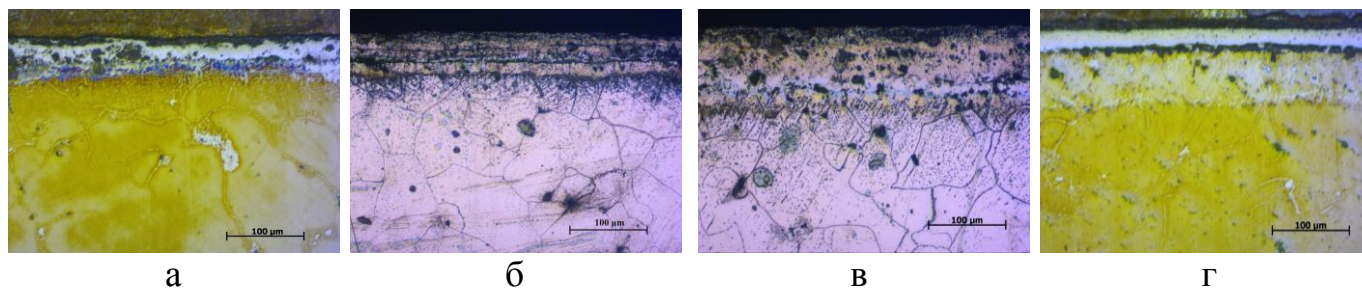


Рис. 5. Мікроструктури комплексних боридних покриттів на сталі 40X15Г8САФ, отриманих після борування без дії ЗМП (а), тривалість насичення 5 год та в умовах дії ЗМП (б), тривалість насичення 2 год; бороміднення без дії ЗМП (в), тривалість насичення 5 години та при одночасні дії ЗМП (г), тривалість насичення 2 години, $\times 200$, (теплове травлення при 400 °С)

Формування боридного покриття на хромомарганцевій сталі 40X15Г8САФ при насиченні бором за одночасної дії ЗМП призводить до підвищення мікротвердості дифузійних шарів на 4–5 ГПа, а бороміднення при дії ЗМП – на 3–4 ГПа, порівняно з боридними покриттями, отриманими без дії ЗМП (рис. 6), що пов'язано зі зменшенням параметрів блочної структури, а саме зменшенням областей когерентного розсіювання, що призводить до зростання протяжності границь блоків, які блокують рух дислокацій.

Точковим рентгеноспектральним аналізом боридного покриття виявлено, що хром, який є основним легуючим елементом у сталі 40X15Г8САФ із вмістом

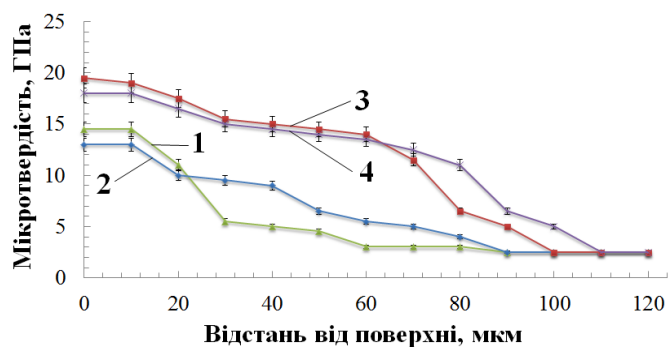


Рис. 6. Зміна мікротвердості по товщині дифузійного боридного покриття на сталі 40X15Г8САФ: 1 – борування без дії ЗМП; 2 – комплексне насичення бором та міддю без дії ЗМП; 3 – борування при одночасній дії ЗМП; 4 – комплексне насичення бором та міддю при одночасній дії ЗМП

до 15 мас. %, нерівномірно розподілений по перерізу дифузійного шару. Оскільки товщина боридних покриттів залежала від умов насичення та складу насичуючого середовища, то в боруваних шарах при загальній товщині покриття 45–50 мкм максимальний вміст хрому 18–20 мас. % виявлено на глибині 15–30 мкм. За межами боридного шару вміст хрому різко зменшується до 6 мас. % (рис. 7, а, табл. 3). Для боридних шарів товщиною 85–90 мкм, отриманих в умовах дії ЗМП, основна частина хрому із вмістом від 17 мас. % до 24 мас. % зосереджується на глибині 30–65 мкм боридного шару (рис. 7, б, табл. 4).

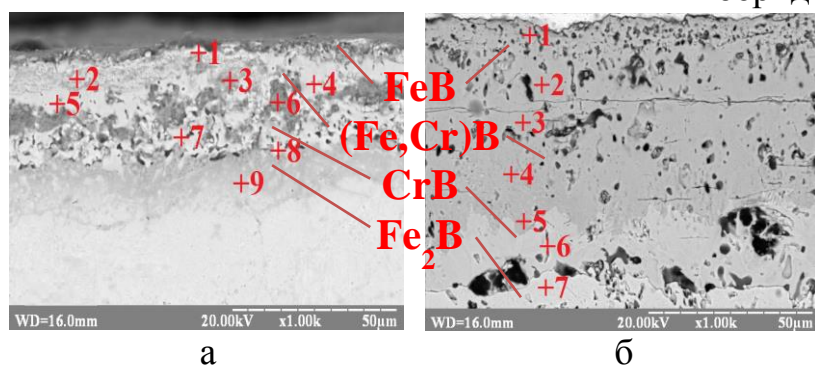


Рис. 7. Структура поперечного шліфа з боруваними шарами на сталі 40X15Г8САФ: а – борування без ЗМП, тривалість насичення 5 год; б – борування при одночасній дії ЗМП, тривалість насичення 2 год (хімічний аналіз визначався в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9)

Таблиця 3

Хімічний склад дифузійного шару на сталі 40X15Г8САФ, отриманого після борування без застосування ЗМП

Елементи	Позиція на структурі (рис. 7, а)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
мас. %									
Si (K)	0,00	0,14±0,03	0,66±0,07	0,00	0,00	1,91±0,09	0,00	0,07±0,06	0,20±0,04
V (K)	0,00	0,08±0,03	0,37±0,07	0,00	0,08±0,06	0,67±0,11	0,00	0,00	0,00
Cr (K)	0,70±0,05	0,68±0,05	7,82±0,25	17,63±0,43	18,70±0,49	19,25±0,43	19,80±0,49	14,65±0,37	5,91±0,20
Mn (K)	0,12±0,04	0,12±0,04	1,25±0,31	1,61±0,07	1,78±0,36	2,30±0,38	1,69±0,34	1,73±0,29	1,85±0,28
Fe (K)	99,18±3,25	98,98±0,07	89,90±1,63	80,76±1,25	79,44±1,40	75,87±1,64	78,51±1,32	83,55±1,23	92,04±1,29

Таблиця 4

Хімічний склад дифузійного шару на сталі 40X15Г8САФ, отриманого після борування при накладанні ЗМП

Елементи	Позиція аналізу на структурі (рис. 7, б)						
	1	2	3	4	5	6	7
мас. %							
Si (K)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04±0,02	0,02±0,01	0,89±0,06
V (K)	0,23±0,04	0,18±0,03	0,43±0,08	0,47±0,08	0,28±0,05	0,39±0,07	0,08±0,03
Cr (K)	9,87±0,36	6,23±0,22	16,91±0,42	17,80±0,43	18,91±0,39	23,78±0,63	1,71±0,35
Mn (K)	8,88±0,34	7,84±0,21	4,02±0,18	6,65±0,20	7,00±0,24	7,70±0,32	4,34±0,19
Fe (K)	81,02±1,23	85,75±1,29	78,64±1,63	75,08±1,24	73,77±1,38	68,11±1,30	92,98±1,29

Рентгеноспектральним аналізом встановлено дискретний розподіл міді по перерізу боридного покриття та зосередження окремих вкраплень міді

в приповерхневих ділянках боридних фаз (рис. 8, табл. 5 та табл. 6). Концентрація міді в окремих зонах поверхневого підшарку товщиною до 15 мкм досягає 96 мас. %, тому на рентгенограмах фіксується фаза міді. Переважно мідь знаходиться в поверхневій фазі FeV. За межами вкраплень міді виявлено плавне зменшення її концентрації по перерізу боридного шару від 1,64 мас. % у приповерхневій зоні до 0,18 мас. % на границі з основою, а в самій основі мідь не виявлено.

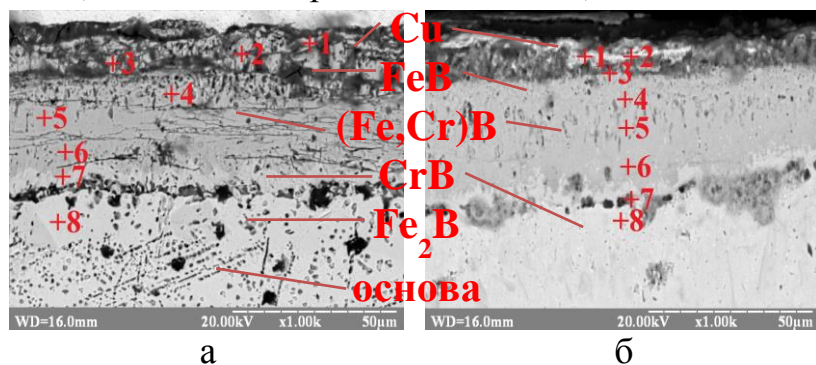


Рис. 8. Структура поперечного шліфа з боридними шарами на сталі 40X15Г8САФ: а – бороміднення без ЗМП, тривалість насичення 5 год; б – бороміднення при одночасній дії ЗМП, тривалість насичення 2 год (хімічний аналіз визначався в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

Таблиця 5

Хімічний склад дифузійного шару на сталі 40X15Г8САФ, отриманого після комплексного насичення бором та міддю без застосування ЗМП

Елементи	Позиція аналізу на структурі (рис. 8, а)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	мас. %							
Si (K)	0,04±0,02	0,06±0,02	0,03±0,01	0,08±0,03	0,00	0,03±0,01	0,00	0,70±0,06
V (K)	0,37±0,07	0,54±0,03	0,37±0,07	0,26±0,05	0,32±0,06	0,28±0,05	0,30±0,05	0,12±0,03
Cr (K)	14,99±0,45	12,68±0,44	11,49±0,37	11,58±0,37	11,96±0,37	19,41±0,39	20,09±0,42	1,61±0,16
Mn (K)	1,38±0,15	3,86±0,19	3,32±0,18	1,16±0,14	5,34±0,21	5,35±0,22	5,43±0,22	3,38±0,18
Fe (K)	81,58±1,41	81,90±1,55	83,25±1,29	86,64±1,31	81,80±1,24	74,55±1,22	74,00±1,22	94,19±1,34
Cu (K)	1,64±0,34	0,96±0,05	1,54±0,31	0,28±0,04	0,58±0,06	0,38±0,05	0,18±0,02	0,00

Таблиця 6

Хімічний склад дифузійного шару на сталі 40X15Г8САФ, отриманого після комплексного насичення бором та міддю при одночасній дії ЗМП

Елементи	Позиція аналізу на структурі (рис. 8, б)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	мас. %							
Si (K)	0,03±0,01	0,64±0,05	0,43±0,07	0,08±0,05	0,03±0,01	0,00	2,53±0,13	0,21±0,06
V (K)	0,00	0,00	0,16±0,05	0,18±0,05	0,22±0,08	0,25±0,09	0,39±0,10	0,67±0,13
Cr (K)	0,54±0,06	0,39±0,05	3,28±0,15	12,92±0,29	13,10±0,94	25,77±0,52	26,57±0,50	50,62±0,84
Mn (K)	0,84±0,07	0,84±0,06	3,32±0,18	13,53±0,44	6,46±0,42	5,44±0,40	13,42±0,49	4,40±0,45
Fe (K)	2,70±0,09	2,17±0,08	56,82±0,91	70,70±0,94	79,79±1,24	68,09±1,12	54,86±0,93	44,10±1,03
Cu (K)	95,89±1,70	95,96±1,83	35,99±1,59	2,59±0,24	0,40±0,19	0,45±0,25	2,23±0,30	0,00

Отримані результати розподілу хрому по перерізу покриття корелюють із товщиною прошарків різного фазового складу, який визначено рентгеноструктурними дослідженнями. Таким чином, виявлено незначну кількість хрому в поверхневому шарі, який відповідає фазі FeV. Формування боридних покриттів в умовах дії ЗМП сприяє росту товщини окремих фазових прошарків і загалом усього покриття.

Рентгенофазовим аналізом сталі 40X15Г8САФ з дифузійним боридним покриттям встановлено, що при боруванні без застосування ЗМП у поверхневому шарі до 10–15 мкм формуються фази FeV, (Fe,Cr)V, CrV та Fe₂V (рис. 9, а). Пошаровий аналіз дифузійних боридних покриттів, отриманих без дії ЗМП, показав такий фазовий склад: після зішліфувування 15 мкм покриття виявлено фази FeV, (Fe,Cr)V, CrV та Fe₂V (рис. 9, б); після зішліфувування 35 мкм – (Fe,Cr)V, CrV та Fe₂V (рис. 9, в).

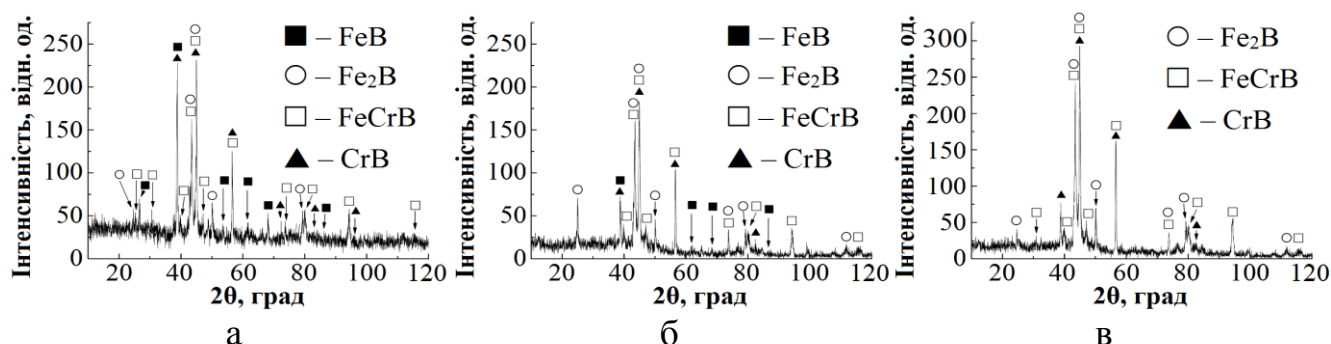


Рис. 9. Дифрактограми, зняті з поверхні сталі 40X15Г8САФ з боридними покриттями, отриманими після борування, тривалість насичення 5 год: а – вихідний стан покриттів (після насичення); б – після зішліфовування 15 мкм покриття; в – після зішліфовування 35 мкм покриття

При накладанні ЗМП спостерігається збільшення товщини боридного покриття і зокрема прошарку фази FeB. Унаслідок цього на дифрактограмах поверхневих шарів боридних покриттів, отриманих після борування в умовах дії ЗМП, фіксується наявність фаз FeB, (Fe,Cr)V та CrB (рис. 10, а). Після зішліфовування 12 мкм покриття було встановлено такий фазовий склад: FeB, (Fe,Cr)V, CrB та Fe₂B (рис. 10, б). Зішліфовування ще 15 мкм не показало зміни фазового складу (FeB, (Fe,Cr)V, CrB та Fe₂B) (рис. 10, в).

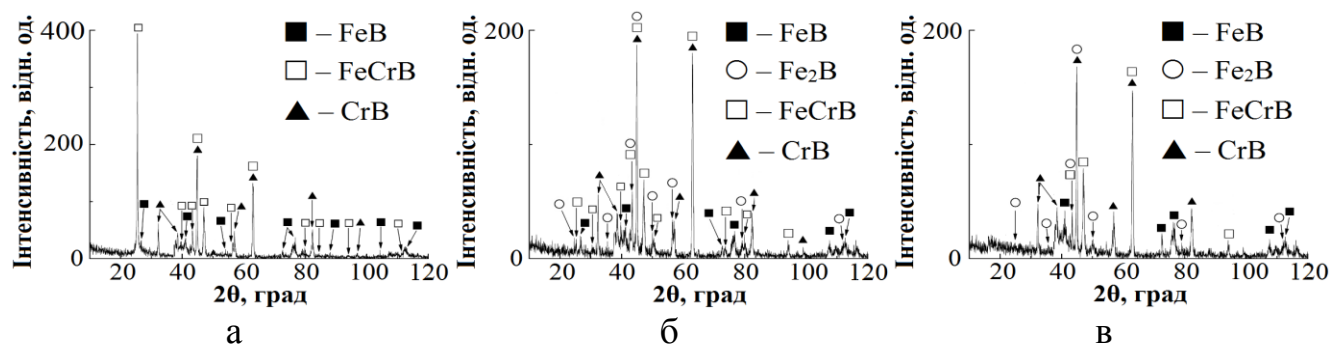


Рис. 10. Дифрактограми, зняті з поверхні сталі 40X15Г8САФ з боридними покриттями, отриманими після борування в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 2 год: а – вихідний стан покриттів (після насичення); б – після зішліфовування 12 мкм покриття; в – після зішліфовування 27 мкм покриття

При дослідженні бороміднених покриттів, отриманих без дії ЗМП, було встановлено такий фазовий склад: у поверхневому шарі до 10–15 мкм – FeB, (Fe,Cr)V та Cu (рис. 11, а); після зішліфовування 15 мкм – FeB, (Fe,Cr)V та CrB (рис. 11, б); після зішліфовування 30 мкм – FeB, (Fe,Cr)V, CrB та Fe₂B (рис. 11, в).

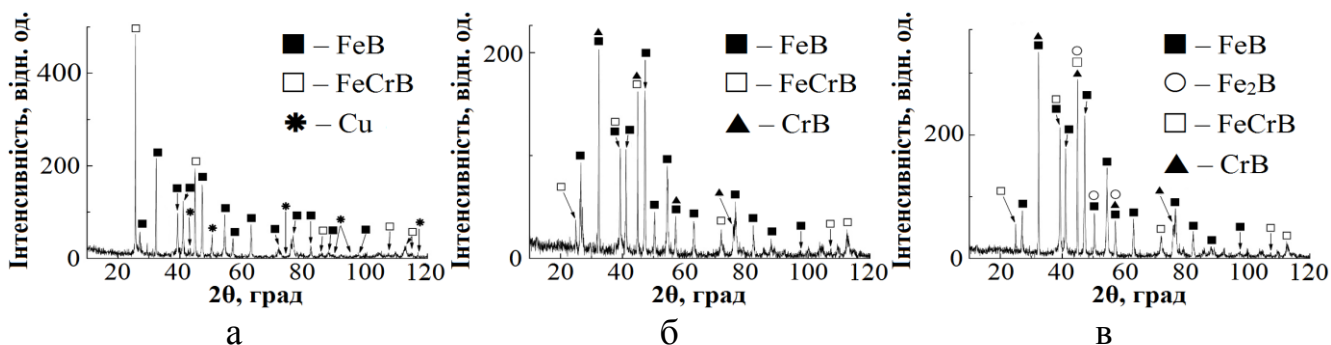


Рис. 11. Дифрактограми, зняті з поверхні сталі 40X15Г8САФ з боридними покриттями, отриманими після комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП, тривалість насичення 5 год: а – вихідний стан покриттів (після насичення); б – після зішліфовування 15 мкм покриття; в – після зішліфовування 30 мкм покриття. Дифракційні максимуми Cu відповідають кристалографічним площинам: (111), (200), (220), (311)

Після комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, оскільки формуються покриття більшої товщини, ніж при боруванні, на дифрактограмах фіксуються фази FeB та Cu (рис. 12, а). Після зішліфовування 10 мкм покриття було встановлено такий фазовий склад: FeB, (Fe, Cr)B та Cu (рис. 12, б), а після зішліфовування 25 мкм – FeB, (Fe,Cr)B, CrB та Cu (рис. 12, в).

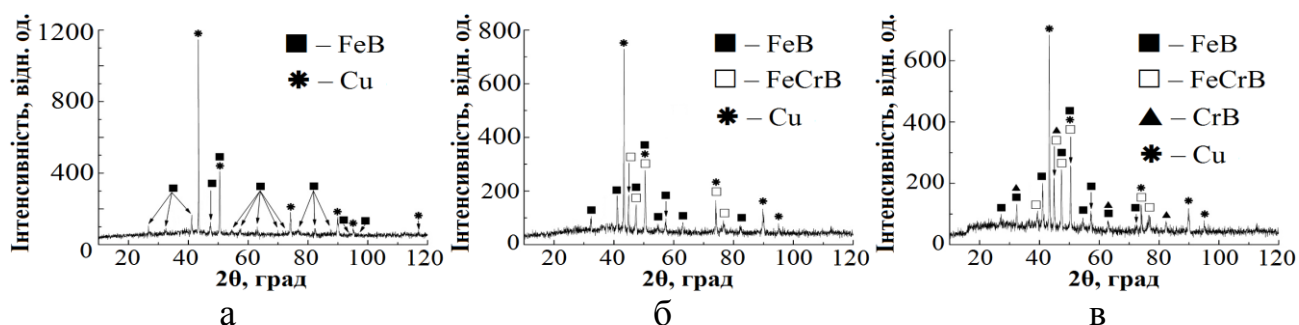


Рис. 12. Дифрактограми, зняті з поверхні сталі 40X15Г8САФ з боридними покриттями, отриманими після комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 2 год: а – вихідний стан покриттів (після насичення); б – після зішліфовування 10 мкм покриття; в – після зішліфовування 25 мкм покриття. Дифракційні максимуми Cu відповідають кристалографічним площинам: (111), (200), (220), (311), (222)

Пошаровим аналізом виявлено такий фазовий склад боромідненого покриття, починаючи від поверхні: FeB, Cu → (Fe,Cr)B → CrB → Fe₂B.

Накладання ЗМП призводить до зростання окремих прошарків боридних фаз і перерозподілу кількісного співвідношення фаз у поверхневих шарах та зміни періодів кристалічної ґратки (табл. 7). При комплексному насиченні бором і міддю об'ємна частка міді в поверхневому шарі, за результатами рентгеноструктурних досліджень, становила 2 %, а при ХТО із накладанням ЗМП кількість мідної складової в поверхневій фазі FeB збільшилась до 5 %.

Таблиця 7

Параметри кристалічних ґраток фаз та кількісний фазовий аналіз поверхні сталі 40X15Г8САФ після борування та бороміднення в різних фізико-хімічних умовах

Процес насичення	Фаза	Параметри кристалічної ґратки, Å			Об'єм елементарної кристалічної ґратки, Å ³	Вміст фаз, %	Області когерентного розсіювання, Å
		a	b	c			
Борування без дії ЗМП	FeB	4,176	5,554	3,007	70	19	1214 ± 27
	Fe ₂ B	5,118	5,118	4,225	110	1	128 ± 23
	FeCrB	14,619	7,287	4,213	449	11	122 ± 10
	CrB	2,994	7,820	2,895	68	69	174 ± 35
Борування при дії ЗМП	FeB	4,106	5,558	2,947	67	24	554 ± 14
	FeCrB	14,537	7,316	4,211	448	20	37,3 ± 8
	CrB	2,959	7,664	2,951	67	56	113,5 ± 8
Бороміднення без дії ЗМП	FeB	4,105	5,540	2,950	67	76	1251 ± 41
	FeCrB	14,520	7,370	4,142	443	22	255 ± 9
	Cu	3,615	3,615	3,615	47	2	784 ± 35
Бороміднення при дії ЗМП	FeB	4,086	5,504	2,950	66	95	197 ± 15
	Cu	3,614	3,614	3,614	47	5	572 ± 81

Борування та бороміднення дозволяє підвищити зносостійкість хромомарганцевої сталі 40X15Г8САФ як при дії ЗМП, так і без його впливу. Встановлено, що на етапі зношування 5 годин швидкість спрацювання сталі 40X15Г8САФ без покриття – $1,47 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, борування без дії ЗМП –

$0,92 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, бороміднення без дії ЗМП – $0,67 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, борування при дії ЗМП – $0,61 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, бороміднення при дії ЗМП – $0,51 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с. Продовження випробування на зносостійкість до 10 годин показало, що швидкість спрацювання дифузійних боридних шарів, отриманих на сталі 40X15Г8САФ без дії ЗМП – $0,72 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, бороміднення без дії ЗМП – $0,56 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, борування при дії ЗМП – $0,49 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с, бороміднення при дії ЗМП – $0,47 \cdot 10^{-6}$ кг/м² · с.

У шостому розділі досліджено структуру, фазовий і хімічний склад, товщину дифузійних боридних шарів, отриманих після борування та бороміднення із одночасною дією ЗМП на твердому сплаві Т5К10. Встановлено, що застосування ЗМП дозволяє інтенсифікувати процес дифузійного насичення твердих сплавів бором і за 2 години ХТО при одночасній дії ЗМП отримати таку товщину дифузійних боридних шарів, яка формується за 4 години ХТО без дії ЗМП.

Дослідження структури твердого сплаву Т5К10 з дифузійними боридними покриттями, отриманими після борування та бороміднення в різних фізико-хімічних умовах, показало, що після дифузійного борування протягом 4 годин на поверхні твердого сплаву Т5К10 формується дифузійний шар товщиною до 25 мкм, а протягом 6 годин – до 40 мкм. При застосуванні ЗМП на поверхні твердого сплаву Т5К10 формується дифузійний шар товщиною до 20 мкм за 2 години дифузійного насичення.

При комплексному насиченні бором та міддю за 4 години дифузійного насичення на поверхні твердого сплаву Т5К10 спостерігається формування боридного шару, товщина якого складає до 25 мкм, а за 6 годин – до 35 мкм, тоді як при боромідненні із одночасною дією ЗМП за 2 години формується дифузійний шар товщиною до 23 мкм.

Встановлено, що застосування ЗМП при боруванні твердого сплаву Т5К10 дозволяє підвищити мікротвердість дифузійного боридного шару до 30–31 ГПа, порівняно із мікротвердістю боридних покриттів, отриманих без застосування ЗМП (27–28 ГПа). Мікротвердість основи становила 12–13 ГПа.

При боромідненні твердого сплаву Т5К10 отримуємо в'язкіші шари, завдяки чому мікротвердість боридних шарів знижується до 25–26 ГПа, тоді як застосування ЗМП дозволяє підвищити мікротвердість бороміднених покриттів до 27–28 ГПа.

Таким чином, застосування ЗМП при боруванні дозволяє підвищити мікротвердість твердого сплаву Т5К10 в 2,4 рази, а бороміднення в 2,2 рази, порівняно із матеріалом основи (12–13 ГПа).

Рентгеноструктурними дослідженнями поверхні твердого сплаву Т5К10 з дифузійними боридними покриттями, сформованими при боруванні без застосування ЗМП, встановлено, що в поверхневому шарі до 10–15 мкм формуються фази: B_2CoW_2 , CoB, TiB, WB, TiC та WC. При накладанні ЗМП спостерігається зміна фазового складу і на дифрактограмах, знятих з поверхні твердого сплаву Т5К10 з дифузійними боридними покриттями, отриманими після борування в умовах дії ЗМП, фіксується наявність фаз CoB, Co_2B , TiB, WB, W_2B , TiC та WC.

При дослідженні дифузійних боридних покриттів, отриманих після комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП, було встановлено такий фазовий склад: B_2CoW_2 , CoB, WB, TiC, WC та Cu, а після комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, формуються дифузійні боридні покриття такого фазового складу: B_2CoW_2 , TiB, WB, WC та Cu.

Проведені випробування зносостійкості довели, що боридні шари, сформовані на твердому сплаві, дозволяють підвищити термін експлуатації віджимних роликів, які використовуються для прокатки алюмінієвого профілю в 2 рази, а бороміднені

в 2,2 рази. При роботі віджимних роликів із твердого сплаву без нанесених покриттів було виготовлено 10 тонн алюмінієвого профілю, а при застосуванні твердого сплаву із боромідненими покриттями – 21 тонна.

ВИСНОВКИ

У результаті досліджень вирішено науково-технічні завдання з підвищення рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей поверхні сталей і сплавів шляхом формування зміцнених шарів дифузійним боруванням та боромідненням у магнітному полі.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. Вперше встановлено, що в умовах дії ЗМП формування дифузійних боридних покриттів заданої товщини та більш однорідної структури на сталях і сплавах із високими значеннями експлуатаційних характеристик відбувається в 1,5–2 рази швидше порівняно з покриттями, отриманими без дії ЗМП.

Встановлено, що застосування ЗМП дозволяє інтенсифікувати процес дифузійного насичення твердих сплавів бором і за 2 години ХТО в умовах дії ЗМП отримати товщину дифузійних боридних шарів, яка формується за 4 години ХТО без дії магнітного поля.

2. Показано, що застосування ЗМП призводить до зростання в 6 разів коефіцієнтів дифузії бору і в 5 разів міді та зменшення енергії активації бору на 20 %, а міді на 14 % порівняно з боридними покриттями, отриманими без дії ЗМП.

3. Встановлено, що формування боридного покриття на вуглецевих сталях при насиченні бором за одночасної дії ЗМП призводить до підвищення мікротвердості дифузійних шарів на 1,5–2 ГПа: фази FeV до 19–20 ГПа, а фази Fe₂V до 17–18 ГПа, порівняно з боридними фазами, отриманими без дії ЗМП, так мікротвердість фази FeV – 17–18 ГПа, Fe₂V – 14–15 ГПа. При комплексному насиченні бором та міддю в умовах дії ЗМП спостерігається підвищення мікротвердості на 1–1,5 ГПа, порівняно із дифузійними шарами, отриманими без дії ЗМП. Так, мікротвердість фаз, сформованих при ХТО в умовах дії ЗМП, становить: фази (Fe,Cu)V – 17–18 ГПа, фази (Fe,Cu)₂V – 15–16 ГПа, а без дії ЗМП: (Fe,Cu)V – 15,5–16,5 ГПа, (Fe,Cu)₂V – 13,5–14,5 ГПа.

Борування із одночасною дією ЗМП хромомарганцевих сталей призводить до підвищення мікротвердості дифузійних боридних шарів на 4–5 ГПа (18,5–19,5 ГПа), а бороміднення при дії ЗМП – на 3–4 ГПа (17–18 ГПа), порівняно з боридними покриттями, сформованими без впливу ЗМП (13,5–14,5 ГПа); твердих сплавів на 2–3 ГПа (30–31 ГПа) при боруванні та на 1–2 ГПа (27–28 ГПа) при боромідненні в умовах дії ЗМП, порівняно з дифузійними боридними шарами, сформованими при боруванні (27–28 ГПа) та боромідненні (25–26 ГПа) без впливу ЗМП.

Підвищення мікротвердості фаз, сформованих при дії ЗМП, пов'язано із зменшенням розмірів блочної структури, а саме зменшенням областей когерентного розсіювання, що призводить до зростання протяжності границь блоків, які блокують рух дислокацій.

4. Пошаровим рентгеноструктурним методом встановлено фазовий склад боридних і бороміднених покриттів, отриманих на сталі 40X15Г8САФ без та в умовах дії ЗМП. Встановлено, що боридні покриття, отримані при боруванні, мають такий фазовий склад, починаючи від поверхні: FeV → (Fe,Cr)V → CrV → Fe₂V, а після бороміднення: FeV, Cu → (Fe,Cr)V → CrV → Fe₂V.

5. Встановлено, що найвищий рівень тріщиностійкості (K_{IC}) досягається в боридних фазах, отриманих у порошкових середовищах за участі порошку міді при накладанні ЗМП, і на вуглецевих сталях K_{IC} досягає рівня $2,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, при цьому напруження сколювання складає 345 МПа. Тоді, як при боруванні без дії ЗМП тріщиностійкість вуглецевих сталей становить – $1,2 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, а напруження сколювання – 181 МПа. Підвищення величини напружень сколювання у комплексних бороміднених шарах зумовлено формуванням фаз більшої в'язкості, для яких тріщиностійкість K_{IC} у 1,4–1,7 разів вища за вихідні боридні фази (FeB, Fe₂B).

6. Встановлено, що ЗМП покращує триботехнічні характеристики дифузійних боридних покриттів, що призводить до зростання їх зносостійкості. Так, застосування ЗМП при дифузійному боруванні та боромідненні вуглецевих сталей сприяє підвищенню зносостійкості боридних шарів у 1,5–1,7 рази, порівняно із покриттями, отриманими без застосування ЗМП, що пов'язано із різним фазовим складом поверхні боридних шарів (FeB та Si при застосуванні ЗМП), зростанням мікротвердості на 1,5–2 ГПа, більш високими тріщиностійкістю та напруженнями сколювання.

Показано, що кращу зносостійкість в умовах сухого ковзання мають боридні фази, сформовані при комплексному насиченні сталі 40X15Г8САФ бором та міддю за одночасної дії ЗМП, при цьому їх зносостійкість підвищується в 2,7 рази, порівняно із сталлю 40X15Г8САФ без покриття та в 1,6 рази, порівняно із сталлю 40X15Г8САФ з боромідненими покриттями нанесеними без дії ЗМП. Це пояснюється зміною кількісного співвідношення фазового складу, морфології, збільшенням мікротвердості дифузійного покриття та наявністю окремих вкраплень міді в поверхневих зонах боридних шарів, які виконують роль твердого мастила.

Встановлено, що борування та бороміднення твердого сплаву дозволяє підвищити його зносостійкість в 2 та 2,2 рази відповідно.

7. Розроблені комплексні дифузійні бороміднені покриття, сформовані в умовах дії ЗМП, дозволяють підвищити працездатність деталей кулачкового диференціалу, а саме: внутрішньої та зовнішньої зірочки диференціалу, які експлуатуються в умовах тертя в 1,5–2 рази порівняно з азотованими покриттями, що підтверджено актом виробничих випробувань на підприємстві ТОВ НВП «Навігатор Л».

СПИСОК ПРАЦЬ ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Іноземні видання:

1. Structure and characteristics coatings obtained after complex saturation boron and silicon on carbon steel / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy, I. Medova // Machines. Technologies. Materials. – Sofia, Bulgaria. – 2015. – No. 1. – P. 39–41. – ISSN 1313 – 0226. (*Особистий внесок здобувача: проведення випробувань на зносостійкість боридних та боросиліцидних покриттів.*)

2. Chernega S. Structure and properties of surface layers metals on the basis of high solid boride obtained in conditions of an external magnetic field / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy // Machines. Technologies. Materials. – Sofia, Bulgaria. – 2015. – No. 12. – P. 52–55. – ISSN 1313 – 0226. (*Особистий внесок здобувача: дослідження фазового і хімічного складу, мікроструктури, товщини, мікротвердості, кінетики росту дифузійних боридних та бороміднених покриттів, обробка експериментальних даних по зносостійкості.*)

3. Chernega S. Increasing wear resistance of machines details from carbon and Cr – Mn – N steels of the complex boride coatings / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy // Nonequilibrium phase transformations. – Sofia, Bulgaria. – 2016. – No. 3. – P. 31–34. – ISSN 2367 – 749X. *(Особистий внесок здобувача: дослідження мікроструктури та зносостійкості покриттів.)*

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

4. Чернега С. М. Підвищення зносостійкості вуглецевих сталей комплексними боридними покриттями за участю кремнію / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – Т. 67. – № 2. – С. 132–141. – ISSN 0370 – 2197. РІНЦ, EBSCO, WorldCat, Google Scholar. *(Особистий внесок здобувача: проведення випробувань на зносостійкість боридних покриттів, дослідження топографії та шорсткості поверхонь боридних покриттів після зношування.)*

5. Чернега С. М. Комплексне насичення вуглецевої сталі бором і міддю / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський // Наукові нотатки ЛНТУ. – 2015. – № 49. – С. 165–171. – ISSN 978 – 617 – 672 – 039 – 3. РІНЦ. *(Особистий внесок здобувача: проведення випробувань на зносостійкість боридних покриттів, дослідження топографії та шорсткості поверхонь боридних покриттів після зношування.)*

6. Структура та властивості комплексних боридних покриттів на вуглецевих сталях / С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. Ю. Медова, М. О. Красовський // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37. – № 6. – С. 751–761. – ISSN 1024 – 1809. Scopus. *(Особистий внесок здобувача: дослідження мікроструктури та проведення випробувань зносостійкості покриттів.)*

7. Чернега С. М. Комплексні дифузійні боридні покриття на сталі 40X15Г8САФ / С. М. Чернега, І. А. Поляков, О. О. Шульженко // Наукові нотатки ЛНТУ. – 2016. – № 54. – С. 345–350. – ISSN 24 – 15 – 39 – 66. РІНЦ. *(Особистий внесок здобувача: проведення пошарового аналізу покриттів та термодинамічного розрахунку перебігу хімічних реакцій при боруванні та боромідненні.)*

8. Чернега С. М. Підвищення зносостійкості твердого сплаву Т15К6 боруванням та боромідненням / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський // Сверхтвердые материалы. – 2016. – № 3. – С. 54–62. – ISSN 0203 – 3119. Scopus. *(Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового і хімічного складу, мікроструктури, товщини і мікротвердості дифузійних боридних та бороміднених покриттів.)*

Стаття у науковому фаховому виданні України:

9. Чернега С. М. Формування дифузійних боридних шарів на сталях при застосуванні зовнішнього магнітного поля / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський // Металознавство та обробка металів. – 2015. – Т. 76. – № 4. – С. 51–56. – ISSN 2073 – 9583. *(Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового складу, мікроструктури, товщини, мікротвердості, тріщиностійкості, шорсткості та зносостійкості дифузійних боридних та бороміднених покриттів.)*

Патенти України на корисну модель:

10. Пат. 83894 України, МПК С23С 8/00. Склад порошкової суміші для бороміднення сталевих виробів / С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. Ю. Медова; заявники і патентовласники С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. Ю. Медова. – № у 2012 15001 ; заявл. 27.12.2012 ; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19.

11. Пат. 108781 України, МПК С23С 8/68, В05D 5/00. Спосіб борування сталевих виробів / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, В. Д. Кузнецов.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – № у 2016 01924 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.

12. Пат. 109188 України, МПК С23С 8/70, В05D 5/00. Спосіб бороміднення сталевих виробів / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, В. Д. Кузнецов.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – № у 2016 03093 ; заявл. 25.03.2016 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

13. Пат. 109189 України, МПК С23С 8/70. Склад для бороміднення сталевих виробів / П. І. Лобода, С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – № у 2016 03094 ; заявл. 25.03.2016 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.

(Особистий внесок здобувача по пунктам 10–13: пошук аналогів, дослідження фазового складу, мікроструктури, мікротвердості, товщини та зносостійкості боридних покриттів.)

Роботи в збірниках матеріалів доповідей міжнародних наукових конференцій:

14. Чернега С. М. Структура и свойства поверхностных слоев сталей и сплавов на основе высокотвердых боридных покрытий / С. М. Чернега, И. А. Поляков, М. А. Красовский // Международная научно-техническая конференция «Порошковая металлургия: современное состояние и будущее» : тезисы конференции, 22–25 апреля 2014 г. – Киев, 2014. – С. 71. *(Особистий внесок здобувача: отримання та обробка експериментальних даних.)*

15. Поляков И. А. Повышение износостойкости поверхностных слоев сталей покрытиями на основе боридов железа / И. А. Поляков, С. М. Чернега // IV-я международная Самсоновская конференция «Материаловедение тугоплавких соединений» : труды конференции, 21–23 мая 2014 г. – Киев, 2014. – С. 118. *(Особистий внесок здобувача: дослідження мікротвердості, шорсткості та зносостійкості боридних покриттів.)*

16. Поляков І. А. Структура і характеристики комплексних бороміднених дифузійних шарів на сталях / І. А. Поляков // VIII-а конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» : тези доп., 28–30 травня 2014 р. – Київ, 2014. – С. 56–58. *(Особистий внесок здобувача: дослідження мікротвердості, топографії та шорсткості поверхонь боридних покриттів після зношування.)*

17. Формування дифузійних боридних покриттів при комплексному насиченні сталей / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, К. М. Гриненко // XV-а міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» : тези доп., 23–27 червня 2014 р. – Київ, 2014. – С. 194–196. *(Особистий внесок здобувача: дослідження зносостійкості та шорсткості поверхонь дифузійних боридних покриттів після зношування.)*

18. Зміна структури і характеристик дифузійних шарів при комплексному боруванні сталей / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовский, К. М. Гриненко // V-а міжнародна конференція «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» : збірник наукових праць, 24–27 червня 2014 р. – Львів, 2014. – С. 561–566. *(Особистий внесок здобувача: дослідження зносостійкості, топографії та шорсткості поверхонь боридних покриттів після зношування.)*

19. Chernega S. Wear resistant boride coatings on metals and alloys, roughnesws of the surface / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy // Symposium «European Materials Research Society (E-MRS 2014)» : 15–19 September 2014. – Poland, Warsaw University of Technology, 2014. – Section «Composite materials and structures». – S61. *(Особистий внесок здобувача: дослідження мікротвердості та шорсткості поверхонь дифузійних боридних покриттів після зношування.)*

20. Structure and characteristics coatings obtained after complex saturation boron and silicon on carbon steel / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy, I. Medova // VIII International science conference for young researchers «Technical science and industrial management» : 15–16 September 2014. – Bulgaria, Varna, 2014. – Vol.10/159. – P. 52–54. *(Особистий внесок здобувача: проведення випробувань на зносостійкість боридних покриттів в умовах сухого ковзання.)*

21. Structure and characteristics complex diffusion layers after saturation boron and copper on steel / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy, C. Grinenko // XI International congress «Machines, technologies, materials 2014» : 17–20 September 2014. – Bulgaria, Varna, 2014. – Vol.III: Section «Materials». – P. 31–34. – ISSN 1310 – 3946 *(Особистий внесок здобувача: дослідження зносостійкості, топографії та шорсткості поверхонь боридних покриттів після зношування.)*

22. Chernega S. Structure and properties of complex diffusion coatings on carbon steels after saturation of boron and silicon / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy, Y. Atanasova // International scientific conference «Unitech 2014» : 21–22 November 2014. – Bulgaria, Gabrovo, 2014. – Vol.III. – P. 121–125. *(Особистий внесок здобувача: отримання та обробка експериментальних даних.)*

23. Дифузійні боридні покриття отримані при застосуванні зовнішнього магнітного поля / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, О. А. Павлюк // VIII-а міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» : зб. тез доп., 23–24 квітня 2015 р. – Київ, 2015. – С. 69.

24. Поляков І. А. Дифузійні боридні покриття, отримані при накладанні зовнішнього магнітного поля / І. А. Поляков, С. М. Чернега, Ю. О. Букар // Матеріали VII-ої міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» : 21–22 травня 2015 р. – Київ, 2015. – С. 117–118. *(Особистий внесок здобувача по пунктам 23 та 24: дослідження мікроструктури, фазового складу та кінетики росту дифузійних боридних покриттів.)*

25. Чернега С. М. Структура и свойства боридных покрытий, полученных на твердых сплавах Т15К6 / С. М. Чернега, И. А. Поляков // Материалы XVI-ой международной научно-технической конференции «Прогрессивная техника, технология и инженерное образование» : 22–25 июня 2015 г. – Одесса, 2015. – С. 174–176. *(Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового складу, товщини і мікротвердості дифузійних боридних та бороміднених покриттів.)*

26. Increase wear resistance hard alloys T15K6 boride coatings / S. Chernega, I. Poliakov, C. Grinenko, M. Krasovskiy // XII International congress «Machines, technologies, materials 2015» : 16–19 September 2015. – Bulgaria, Varna, 2015. – Vol.II. – P. 109–111. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового і хімічного складу, мікроструктури, товщини і мікротвердості боридних та бороміднених покриттів.*)

27. Chernega S. Diffusion boron coating obtained at applying an external magnetic field / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy // Symposium «European Materials Research Society (E-MRS 2015)» : 15–18 September 2015. – Poland, Warsaw University of Technology, 2015. – Section «Materials and coatings for extreme environments». – F20. (*Особистий внесок здобувача: дослідження фазового складу та кінетики росту дифузійних боридних покриттів.*)

28. Боридные покрытия, полученные в условиях действия внешнего магнитного поля / С. М. Чернега, И. А. Поляков, М. А. Красовский, Е. М. Гриненко // V-я Международная конференция «HighMatTech» : тезисы докладов, 5–8 октября 2015 г. – Киев, 2015. – С. 222. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового складу, товщини і мікротвердості дифузійних боридних та бороміднених покриттів.*)

29. Чернега С. М. Борування та бороміднення твердих сплавів T15K6 / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський // Праці IV-ої міжнародної конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану» (7–10 жовтня 2015 р., Київ). – Київ, 2015. – С. 129–130. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового та хімічного складу, мікроструктури, товщини і мікротвердості дифузійних боридних та бороміднених покриттів.*)

30. Structure and properties of diffusion boride layers on steels obtained at applying external magnetic field / S. Chernega, I. Poliakov, C. Grinenko, M. Krasovskiy // V International youth science forum «Litteris et artibus» : 26–28 November 2015. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 328–331. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового складу, мікроструктури, товщини, мікротвердості та зносостійкості дифузійних покриттів.*)

31. Формування дифузійних боридних шарів в різних фізико-хімічних умовах / І. А. Поляков, С. М. Чернега, К. М. Гриненко, М. О. Красовський, С. В. Коритченко // Матеріали V-ої міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 5» : 3–5 грудня 2015 р., ІФФ, НТУУ «КПІ». – Київ, 2015. – С. 171–176. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового складу, мікроструктури, товщини, мікротвердості, тріщиностійкості, шорсткості, кінетики росту та зносостійкості дифузійних боридних покриттів.*)

32. Chernega S. Increase of wear resistance of metastable austenite Cr-Mn-N steel diffusion boride coatings in conditions of action the external magnetic field / S. Chernega, I. Poliakov, M. Krasovskiy // XIII International scientific congress «Machines, technologies, materials 2016» : 16–19 march 2016. – Bulgaria, Borovets, 2016. – Vol.II. – Section «Materials». – P. 30–33. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового і хімічного складу, мікроструктури, проведення випробувань на зносостійкість.*)

33. Properties diffusion boride layers obtained in different physical-chemical environments / S. Chernega, I. Poliakov, E. Grinenko, M. Krasovskiy // International Science and Methodological Conference «University Science – 2016» : 19–20 May 2016. – Ukraine, Mariupol, 2016. – P. 145–148. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження фазового складу, мікроструктури, товщини, мікротвердості, тріщиностійкості, шорсткості, кінетики росту та зносостійкості дифузійних боридних покриттів.*)

34. Формування боридних шарів на твердих сплавах в умовах дії зовнішнього магнітного поля / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовский, К. М. Гриненко // Матеріали XVII-ої міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» : 21–24 червня 2016 р. – Одеса, 2016. – С. 262–263. (*Особистий внесок здобувача: виготовлення мікрошліфів, дослідження мікроструктури та товщини боридних покриттів.*)

АНОТАЦІЯ

Поляков І.А. Зміцнення сплавів зносостійкими покриттями на основі боридних фаз сформованих в магнітному полі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – металознавство та термічна обробка металів. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», МОН України, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічного завдання з підвищення рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей поверхні сталей та сплавів шляхом формування зміцнених шарів дифузійним боруванням та боромідненням у магнітному полі.

Уперше одержані нові дані про структурно-фазові зміни в дифузійному боридному шарі, отриманому на сталях та сплавах під дією ЗМП. Виявлено, що накладання ЗМП призводить до перерозподілу кількісного співвідношення боридних фаз у поверхневих шарах, зміни періодів кристалічної ґратки та зменшення об'єму елементарних ґраток боридних фаз. Встановлено, що застосування ЗМП при боруванні та боромідненні порівняно з традиційним, призводить до зростання в 1,5–2 рази товщини боридних шарів за однакові терміни дифузійного насичення.

Показано, що формування боридного покриття на вуглецевих сталях при насиченні бором за одночасної дії ЗМП призводить до підвищення мікротвердості боридних шарів, сформованих на вуглецевих сталях, на 1,5–2 ГПа (19–20 ГПа), хромомарганцевих сталях на 4–5 ГПа (19–19,5 ГПа), твердих сплавах на 2–3 ГПа (30–31 ГПа), що пов'язано зі зменшенням областей когерентного розсіювання; підвищення тріщиностійкості в 1,3 рази ($K_{1C} = 2,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$) та напруження сколювання в 1,4 рази (345 МПа), зменшення характеристик шорсткості покриттів – Ra в 1,3 рази та Rz в 1,2 рази і, як наслідок, підвищити працездатність деталей з боридними покриттями в 1,5–1,7 рази.

Ключові слова: дифузійне покриття, борування, бороміднення, боридний шар, фаза, магнітне поле, мікроструктура, мікротвердість, тріщиностійкість, шорсткість, зносостійкість

АННОТАЦИЯ

Поляков И.А. Упрочнение сплавов износостойкими покрытиями на основе боридных фаз сформированных в магнитном поле. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи по повышению уровня физико-механических и эксплуатационных свойств поверхности сталей и сплавов путем формирования упрочненных слоев диффузионным борированием и боромеднением в магнитном поле.

Впервые получены новые данные о структурно-фазовых изменениях в диффузионных боридных слоях полученных на сталях и сплавах под действием внешнего магнитного поля (ВМП). Показано, что наложение ВМП приводит к перераспределению количественного соотношения боридных фаз в поверхностных слоях, изменению периодов кристаллической решетки и уменьшению объема элементарных решеток боридных фаз. Установлено, что применение ВМП при борировании и боромеднении, по сравнению с традиционным, приводит к росту в 2 раза толщины боридных слоев за одинаковое время диффузионного насыщения. Так, за 2 часа диффузионного насыщения после боромеднения в условиях действия ВМП толщина покрытия на среднеуглеродистых сталях достигала до 220 мкм, а на хромомарганцевых сплавах – до 100 мкм, по сравнению с боридными слоями полученными без ВМП, толщина которых в соответствии составляла – на среднеуглеродистых сталях до 110 мкм, а на хромомарганцевых сплавах – до 50 мкм.

Проведено термодинамические расчеты протекания химических реакций при диффузионном борировании и боромеднении сталей по которым установлена возможность формирования боридных фаз и фазы меди в диффузионном слое, что подтверждается рентгенофазовыми исследованиями. Установлена корреляция между рентгеноструктурными исследованиями фазового состава боридных покрытий при боромеднении и термодинамическими расчетами.

Получены новые данные о закономерностях формирования боридных слоев, которые заключаются в образовании твердого раствора бора в γ -Fe \rightarrow зарождении центра кристаллизации, формировании и росте фазы низкого бориды Fe₂B \rightarrow зарождении высокобористой фазы FeB \rightarrow формировании фазы высшего бориды FeB \rightarrow растворении меди в решетке FeB с образованием твердых растворов замещения с железом (Fe,Cu)B и формировании отдельных вкраплений меди неправильной многогранной вытянутой в направлении диффузии формы сосредоточенных в поверхностной фазе FeB, размеры которых в поперечном сечении составляют 1,0 – 1,5 мкм, а в продольном – до 2 мкм.

Показано, что применение ВМП при борировании или боромеднении приводит к повышению микротвердости боридных слоев сформированных на углеродных сталях на 1,5–2 ГПа (19–20 ГПа), хромомарганцевых сталях на 4–5 ГПа (19–19,5 ГПа), твердых сплавах на 2–3 ГПа (30–31 ГПа) по сравнению с диффузионными боридными покрытиями полученными традиционным насыщением без ВМП. Увеличение микротвердости связано с уменьшением параметров блочной структуры, а именно уменьшением областей когерентного рассеяния, что приводит к росту протяженности границ блоков, которые блокируют движение дислокаций.

Согласно теории Дж. Маннинга рассмотрены процессы ХТО, а именно: борирование и боромеднение с одновременным действием ВМП. Объяснено ускоренное формирование диффузионных боридных слоев в условиях действия ВМП, что связано с уменьшением энергии активации В и Сu и увеличением частоты скачков атомов в направлении действия магнитного поля.

Проведено расчет коэффициента диффузии В и Сu в различных физико-химических условиях. Показано, что применение ВМП приводит к увеличению в 6 раз коэффициента диффузии В и в 5 раз Сu и уменьшению их энергии активации по сравнению с комплексными боридными покрытиями полученными без действия ВМП.

Полученные в работе покрытия были испытаны на предприятии ООО НПП «Навигатор Л» на деталях кулачкового дифференциала, а именно: внутренней и внешней звездочках дифференциала. Испытания показали, что нанесение защитных диффузионных боридных покрытий позволяет повысить работоспособность звездочек дифференциала в 1,5–2 раза по сравнению с азотированными покрытиями.

Ключевые слова: диффузионное покрытие, борирование, боромеднение, боридный слой, фаза, магнитное поле, микроструктура, микротвердость, трещиностойкость, шероховатость, износостойкость

ABSTRACT

Poliakov I.A. Strengthening alloys with wear resistant coatings based on boride phases formed in the magnetic field. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Candidate of Technical Sciences, in the specialty 05.16.01 – metal science and heat treatment of metals. – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

Dissertation is dedicated to the solution of scientific and technical problem of increasing the level of physical-mechanical and operational properties of steels and alloys surface by forming strengthened layers by diffusion boriding and complex boron and copper saturation in the magnetic field.

New data about structural and phase changes in the diffusion boride layer obtained on steels and alloys under the action of external magnetic field (EMF) is obtained for the first time. It is shown that the imposition of EMF leads to a redistribution of boride phase proportion in the surface layers, changes of crystal lattice periods and the decrease of volume of elementary boride phase lattices. It is established that the use of EMF during boriding and complex boron and copper saturation, compared with traditional one, leads to the increase of boride layers thickness in 1.5–2 times for the same periods of diffusion saturation.

It is shown that the formation of boride coating on carbon steels at boron saturation with simultaneous action of EMF leads to the increase of microhardness of boride layers formed on the carbon steels by 1.5–2 GPa (19–20 GPa), on the metastable austenite Cr-Mn-N steels by 4–5 GPa (19–19.5 GPa), and on the hard alloys by 2–3 GPa (30–31 GPa), that is associated with a decrease of coherent scattering regions; increase of crack resistance in 1.3 times ($K_{IC} = 2.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$) and tension of spallation in 1.4 times (345 MPa), as well as the decrease of coatings roughness characteristics – Ra in 1.3 and Rz in 1.2 times and as a consequence the increase of the operability of parts with boride coatings in 1.5–1.7 times.

Keywords: diffusion coating, boriding, complex boron and copper saturation, boride layer, phase, magnetic field, microstructure, microhardness, crack resistance, roughness, wear resistance