

УДК 621.785.539.5

## *Формування дифузійних боридних шарів на сталях при застосуванні зовнішнього магнітного поля*

С. М. Чернега, доктор технічних наук, професор

І. А. Поляков

М. О. Красовський\*, кандидат хімічних наук

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

\*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

*Проведено дослідження структури, фазового складу, мікротвердості, тріщиностійкості, шорсткості та зносостійкості боридних покриттів отриманих на вуглецевих сталях при комплексному насиченні бором і міддю із застосуванням зовнішнього магнітного поля.*

Одним з методів хіміко-термічної обробки (ХТО), який використовують для підвищення триботехнічних характеристик деталей, а саме: підвищення зносостійкості (в умовах сухого тертя, ковзання з мастилом і без мастила), гідроабразивного зношування, корозійної стійкості, кавітаційної стійкості, окалиностійкості є процес борування. Проте борування є досить енергозатратним процесом, тому для зменшення енергозатратності доцільно застосовувати методи інтенсифікації процесу насичення. Одним з таких методів є застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП) [1].

Метою даної роботи було дослідження структури, товщини покриття, фазового складу, мікротвердості, тріщиностійкості, шорсткості та зносостійкості комплексних дифузійних боридних покриттів на вуглецевих сталях, отриманих в порошкових сумішах за участю бору та міді в різних фізико-хімічних умовах, а також встановлення впливу насичуючого порошкового середовища на експлуатаційні характеристики покриттів.

Комплексне борування та бороміднення без застосування ЗМП здійснювали порошковим методом у спеціальному контейнері при температурі 975 °С протягом 1, 2, 4, 6 годин з використанням плавких затворів.

Насичення сталей бором і міддю проводили в сумішах, що містять технічний карбід бору  $B_4C$ , а також порошки  $Cu_2O$  або  $Cu_3P$ , як джерело міді. В якості активуючої добавки використовували фторопласт.

Для створення магнітного поля застосовували соленоїд, який складався із 635 витків шини алюмінієвого сплаву, розміром 10 x 20 мм; сила струму 60 А; магнітна індукція 35 мТл. Для хіміко-термічної обробки в магнітному полі в соленоїд поміщали високотемпературну піч з тиглями

із запакованою в них насичуючою борувальною сумішшю та деталями. Дослідження проводилося на зразках із сталей 20, 45, У8.

Дослідження структури боридних покриттів проводили на шліфах підданих високотемпературному травленню за температури 400 °С при витримці 30 хв в печі СНОЛ-1,6.2,5.1/9 з наступним охолодженням до кімнатної температури на повітрі. Теплове травлення зумовило появу кольорового забарвлення фаз, і дозволило визначити їх розташування в структурі покриттів. Слід зазначити, що чутливість теплового травлення до осередків зародження фаз значно вища, ніж при звичайному хімічному травленні [2].

Мікроструктурні дослідження покриттів та вимірювання товщини дифузійних шарів проводили на металографічному мікроскопі Axio Observer A1m, Zeiss в інтервалі збільшення 100 – 1000 разів. Визначення мікротвердості здійснювали на приладі ПМТ-3 не менше, ніж у 15 – 20 полях зору при навантаженні 0,49 – 0,98 Н. 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, компанії Rigaku (Японія), в мідному  $K_\alpha$  монохроматичному випромінюванні. Для виміру в'язкості руйнування боридних фаз застосовували метод Еванса-Чарльза [3].

При нагріванні тиглів до 975 °С в борувальній суміші на поверхні деталей утворюється плівка з  $B_2O_3$  у розплавленому стані. Ця плівка слугує джерелом дво- та тривалентних іонів бору, які мають свої магнітні моменти.

Дифузійне масоперенесення іонів бору до основного фронту реакції на сталевій матриці призводить до утворення осередків фази  $Fe_2B$  при досягненні концентрації бору 33 ат. % в залізі, якими поступово заростає вся сталева поверхня. При зростанні концентрації В до 49 ат. % утворюються осередки фази  $FeB$ , які поступово поширюються по поверхні фази  $Fe_2B$  [4]. Наступне вrostання фази  $Fe_2B$  в сталеву матрицю пов'язане з дифузією іонів бору через фазу  $FeB$ .

Як відомо магнітне поле (МП) – складова електромагнітного поля, яка створюється змінним у часі електричним полем, рухомими електричними зарядами або спінами заряджених частинок [5]. Магнітне поле спричиняє силову дію на рухомі електричні заряди (сила Лоренца). В нашому випадку магнітне поле взаємодіє з власними магнітними моментами іонів бору, що і спричиняє направлений рух іонів бору до сталевій поверхні матеріалу, що насичується, та прискорює утворення боридних фаз  $FeB$  та  $Fe_2B$ . Ймовірно, магнітне поле спричиняє деяке зміщення в розташуванні спінів в атомах решітки аустеніту, а це впливає на ефективний радіус атома аустеніту і, як наслідок, може приводити до незначного розширення пор в кристалічній ґратці. Останнє в свою чергу зменшує енергію активації для дифузійного проникнення атомів бору в глибші шари сталевій матриці.

Металографічним аналізом встановлено, що при застосуванні ЗМП змінюється морфологія боридних шарів, голчатість зерен різко зменшується, зникають окремо пророслі в матрицю зерна боридів (рис. 1, рис. 2). Голчасті зерна боридних фаз щільно прилягають один до одного та формується

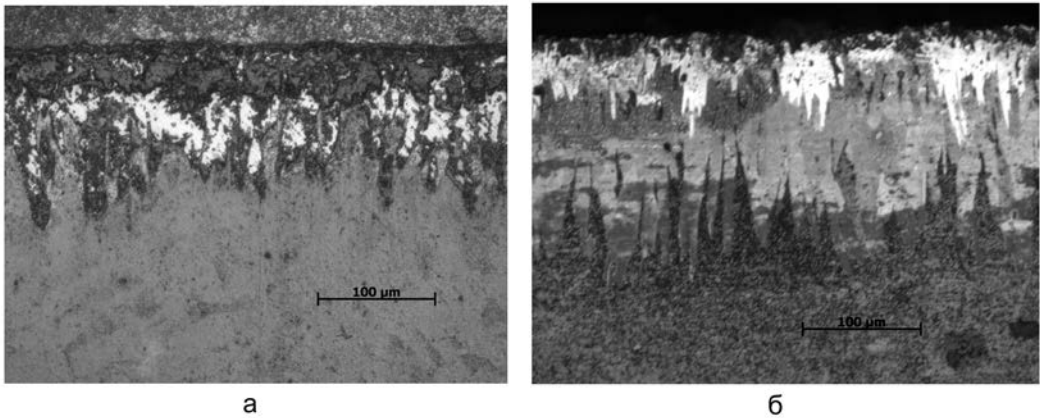


Рис. 1. Мікроструктури комплексних боридних покриттів на сталі 20, отриманих в різних фізико-хімічних умовах. а – борування, тривалість насичення 4 год, б – борування в ЗМП, тривалість насичення 2 год. Теплове травлення.  $\times 200$ .

суцільний, однорідний боридний шар, товщина якого в 1,5 – 2,0 рази вища, ніж при боруванні без ЗМП за однакової тривалості насичення деталей.

Проведено дослідження кінетики росту боридних шарів в різних фізико-хімічних умовах. Встановлено, що після дифузійного насичення в борувальній суміші протягом 4 годин без ЗМП отримуємо покриття, товщина яких складала 125 – 160 мкм, тоді, як при накладанні ЗМП формуються покриття товщиною 160 – 200 мкм за 2 години; при боромідненні протягом 4 годин без ЗМП формуються покриття товщиною 165 – 190 мкм, тоді, як при боромідненні в умовах дії ЗМП за 2 години дифузійного насичення виростають боридні фази товщиною 180 – 225 мкм (рис. 1, рис. 2).

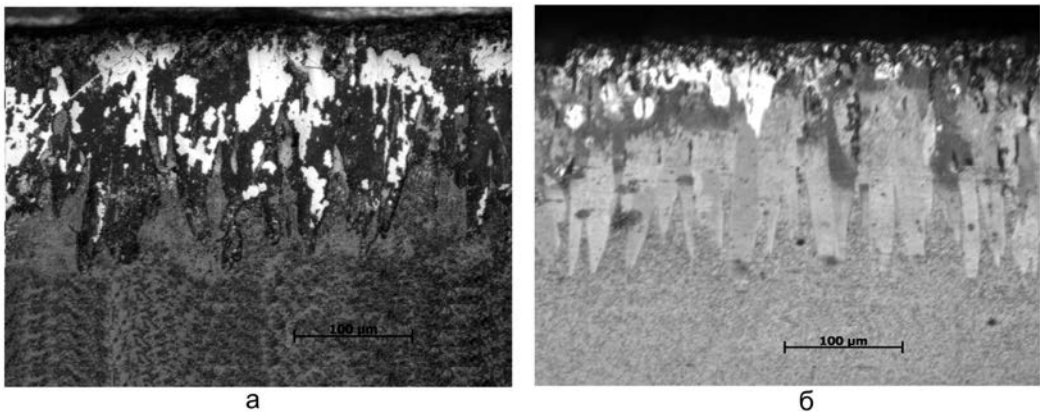


Рис. 2. Мікроструктури комплексних бороміднених покриттів на сталі 20, отриманих в різних фізико-хімічних умовах. а – бороміднення, тривалість насичення 4 год, б – бороміднення в ЗМП, тривалість насичення 2 год. Теплове травлення.  $\times 200$ .

Для встановлення взаємозв'язку між фазовим складом і структурою, дифузійних шарів після насичення бором та міддю, зразки були піддані рентгеноструктурному аналізу. Характерні ділянки дифрактограми, показані на рис. 3, рис. 4.

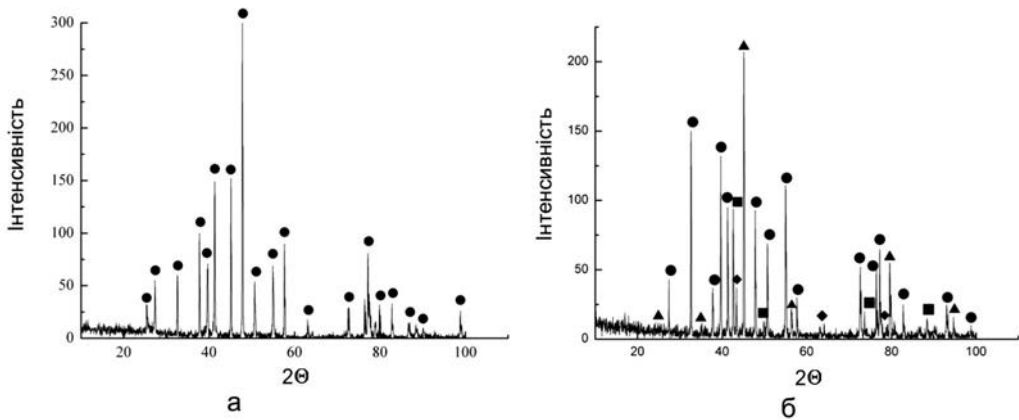


Рис. 3. Дифрактограми від поверхні сталі 45 з боридними покриттями. а – борування без ЗМП, б – комплексне насичення бором та міддю без ЗМП (дифракційні максимуми міді від площин (111), (200), (220)). ● – FeV, ▲ – Fe<sub>2</sub>B, ◆ – Fe, ■ – Cu.

Дифрактограми від поверхні боридних покриттів на сталі 45 після борування без ЗМП, показали, що в поверхневому шарі до 15 – 20 мкм формується фаза FeV (рис. 3 а), а при боромідненні без дії ЗМП – фази FeV, Fe<sub>2</sub>B, Fe-delta та мідь (рис. 3 б).

При накладанні ЗМП в боридних шарах спостерігається зменшення об'єму фази FeV і на дифрактограмах поверхневих шарів боридних покриттів, отриманих після борування фіксується наявність фаз FeV та Fe<sub>2</sub>B (рис. 4 а). Після комплексного насичення бором та міддю в умовах дії зовнішніх магнітних полів фіксуються фази FeV та мідь (рис. 4 б).

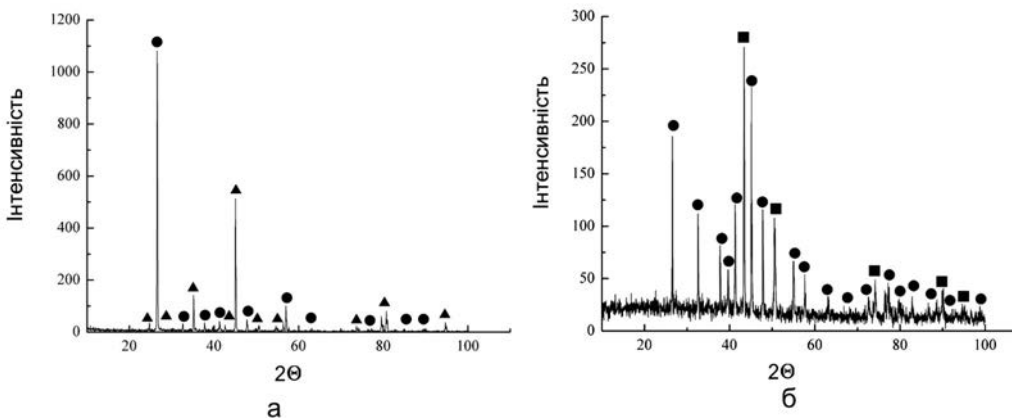


Рис. 4. Дифрактограми від поверхні сталі 45 з боридними покриттями. а – борування із застосуванням ЗМП, б – комплексне насичення бором та міддю із застосуванням ЗМП (дифракційні максимуми міді від площин (111), (200), (220)). ● – FeV, ▲ – Fe<sub>2</sub>B, ■ – Cu.

Накладання ЗМП призводить до перерозподілу кількісного співвідношення боридних фаз в поверхневих шарах, зміни періодів кристалічної ґратки, зменшення об'єму елементарної ґратки фази FeV (таблиця). При комплексному насиченні бором і міддю об'ємна частка міді в поверхневому шарі за результатами рентгеноструктурних досліджень

## Термічна і хіміко-термічна обробка

становила 4 %, а при ХТО із накладанням ЗМП кількість мідної складової в поверхневій фазі FeV збільшилась до 18,9 %. Області когерентного розсіювання у фазі FeV, отриманій при насиченні бором та міддю із накладання ЗМП, зменшилися до 38,3 нм порівняно із 66,1 нм у фазі FeV, отриманій без дії ЗМП.

Параметри кристалічних ґраток фаз та кількісний фазовий аналіз після борування та бороміднення за різних фізико-хімічних умов

Процес насичення	Фаза	Параметри кристалічної ґратки, Å			Об'єм, (Å) <sup>3</sup>	Вміст фаз, %
		a	b	c		
Борування без ЗМП	FeV	4,056	5,497	2,945	65,66	100,0
Борування + ЗМП	FeV	4,048	5,497	2,943	64,50	15,8
	Fe <sub>2</sub> V	5,105	5,105	4,243	110,55	84,2
Бороміднення без ЗМП	FeV	4,053	5,494	2,942	65,52	62,0
	Fe <sub>2</sub> V	5,096	5,096	4,247	110,29	30,5
	Fe	2,949	2,949	2,949	25,64	3,5
	Cu	3,669	3,669	3,669	49,40	4,0
Бороміднення + ЗМП	FeV	4,054	5,493	2,942	65,51	81,1
	Cu	3,607	3,607	3,607	46,91	18,9

Дослідження мікротвердості боридних фаз після борування при одночасній дії ЗМП, показало, що мікротвердість фази FeV складає 19 – 20 ГПа, а фази Fe<sub>2</sub>V 17 – 18 ГПа, без дії магнітного поля мікротвердість FeV 17 – 18 ГПа, Fe<sub>2</sub>V 15 – 16 ГПа. При комплексному насиченні бором та міддю із застосуванням ЗМП отримуємо боридні шари з мікротвердістю для фази (Fe,Cu)V – 17 – 18 ГПа, а для фази (Fe, Cu)<sub>2</sub>V – 15 – 16 ГПа, без дії магнітного поля (Fe,Cu)V 15,5 – 16,5 ГПа, а для фази (Fe, Cu)<sub>2</sub>V 13,5 – 14,5 ГПа. Таким чином, спостерігається зростання мікротвердості фаз FeV, Fe<sub>2</sub>V та (Fe,Cu)V, (Fe, Cu)<sub>2</sub>V на 1,5 – 2,0 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 FeV, отриманої без дії ЗМП. При комплексному насиченні бором та міддю, спостерігаємо зменшення мікротвердості боридних шарів порівняно із боруванням.

Найвищий рівень тріщиностійкості досягається в боридних фазах, отриманих в порошкових середовищах за участю порошку міді при накладанні ЗМП на сталі 20, і відповідно становить 2,23 МПа · м<sup>0,5</sup>, при цьому напруження сколювання складає 345 МПа. Тоді, як при боруванні без дії ЗМП тріщиностійкість становить 1,24 МПа · м<sup>0,5</sup>, а напруження сколювання 180 МПа. Підвищення величини напружень сколювання в комплексних бороміднених шарах зумовлено формуванням фаз більшої в'язкості, для яких тріщиностійкість K<sub>1C</sub> в 1,2 – 1,7 разів вища за вихідні боридні фази (FeV, Fe<sub>2</sub>V).

Дослідження шорсткості комплексних боридних покриттів отриманих в різних фізико-хімічних умовах показало, що найменший рівень шорсткості

$R_a = 0,0553$  досягається при комплексному насиченні бором та міддю із застосуванням ЗМП, порівняно з  $R_a = 0,0650$  при боромідненні без ЗМП; при боруванні в ЗМП  $R_a = 0,0855$ , порівняно з  $R_a = 0,0961$  при боруванні без ЗМП.

Проведені дослідження на зносостійкість показали, що середнє лінійне зношування боридних покриттів, отриманих в ЗМП, зменшується в 1,2 – 1,4 рази, а коефіцієнт тертя становить 0,63 порівняно із 0,66 для покриттів без ЗМП.

Таким чином встановлено, що формування дифузійних боридних шарів в умовах дії зовнішнього магнітного поля призводить до перерозподілу кількісного співвідношення боридних фаз із зменшенням об'єму фази FeB, зміни періодів кристалічної ґратки і морфології боридних шарів, підвищення мікротвердості на 1,5 – 2,0 ГПа та дозволяє скоротити тривалість насичення деталей в 1,5 – 2,0 рази для отримання покриттів заданої товщини з підвищеними триботехнічними характеристиками і тріщиностійкістю.

## Література

1. Патент 78052 UA C23C 8/00, C23C 8/24, C22F 3/00, C21D 1/04.  
Багатофункціональна установка для магнітотермохімічної обробки металевих виробів в сильних магнітних полях. М.Ф. Дмитриченко, Г.В. Карандаков, Л.П. Бариллович. – Опубліковано 15.02.2007. – Бюл. № 2, 2007 р.
2. Справочник по металлографическому травлению / Под ред. И.Н. Фридляндера, Ф.И. Квасова, Г.Б. Строганова. – М.: Металлургия, 1979. – 338 с.
3. Evans A.G., Charles E.A. Fracture toughness determination by indentation // J. Amer. Ceram. Soc. – 1976. – 59, N 7 – 8. – P. 371 – 372.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справ. Т.1 / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
5. Плетнёв С.В. Магнитное поле: свойства, применение. – Санкт-Петербург: Гуманистика, 2004. – 624 с.

Одержано 16.12.15

**С. М. Чернега, И. А. Поляков, М. О. Красовский**  
**Формирование диффузионных боридных слоев на сталях**  
**при применении внешнего магнитного поля**

**Резюме**

Проведено исследование структуры, фазового состава, микротвердости, трещиностойкости, шероховатости и износостойкости боридных покрытий полученных на углеродистых сталях при комплексном насыщении бором и медью с применением внешнего магнитного поля.

**S. M. Chernega, I. A. Poliakov, M. A. Krasovskiy**  
**Formation of diffusion boride layers on steels at under**  
**the external magnetic field**

**Summary**

This paper investigates the structure, phase composition, microhardness, crack resistance, surface roughness and wear resistance boride coatings obtained on carbon steels at the complex saturation with boron and copper by using an external magnetic field.