

УДК 621.785

С.М. Чернега, професор, д-р техн. наук,

І.Ю. Медова, аспірант,

І.А. Поляков

Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут»

пр. Перемоги, 37, корпус 9, м. Київ, Україна, 99053

E-mail: Ira.medova@gmail.com

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ БОРИДНИХ ПОКРИТТІВ ЛЕГОВАНИХ МІДЮ НА СТАЛІ 45

Представлено результати дослідження по нанесенню боромідненого покриття порошковим методом на сталі 45. Визначено товщину та мікротвердість отриманих покриттів та їх фазовий і хімічний склад. Встановлено, що боридні покриття леговані міддю є більш пластичними, мають в 1,5 разів вищу тріщиностійкість (K_{Ic}) та зносостійкість порівняно із нелегованими.

Ключові слова: *борування, бороміднення, зносостійкість, тріщиностійкість.*

Вступ

З постійним розвитком промислового виробництва підвищуються вимоги до експлуатаційних якостей деталей машин, обладнання та інструменту. Для забезпечення цих вимог створюються нові високолеговані сталі і сплави, які призводять до збільшення вартості виробів. У зв'язку з цим, значний інтерес представляють методи поверхневої обробки, застосування яких, може забезпечити високу експлуатаційну стійкість та надійність виробів при їх низькій собівартості. В результаті експериментальних досліджень було створено багато нових видів покриттів, але механізм утворення, їх склад та властивості вивчені не достатньо. Борування являється одним із найбільш відомих методів обробки поверхні, які можуть забезпечити високий комплекс фізико-механічних властивостей. Саме цей процес дозволяє отримати покриття з високою твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю та жаростійкістю. Застосування комплексного покриття на основі бору та міді супроводжується значним економічним ефектом, як за рахунок підвищення довговічності, так і за рахунок використання більш дешевих сталей.

Ціль роботи – дослідження властивості боридних покриттів на сталі 45.

1. Методика дослідження

Борування з легуючими добавками здійснювали порошковим методом у спеціальному контейнері за умов зниженого тиску при температурі 970 °С протягом 4 годин. Дослідження проводилось на зразках сталі 45.

Зразки завантажували в контейнер і засипали насичуючою сумішшю. При цьому відстань між зразками і стінками контейнера складала не менше 5 мм. Насичення сталі бором та міддю проводили у суміші, яка містить технічний карбід бору B_4C та порошки Cu_2O , Cu та Cu_3P як джерело міді. В якості активуючої добавки використовували фторопласт.

Для відділення реакційного простору контейнера від пічної атмосфери і запобігання проникненню в нього повітря контейнер закривали листом азбесту і засипали натросилікатним склом завтовшки 10 мм. При нагріві до температури борування, натросилікатне скло розплавляється (750 – 800 °С) і герметизує контейнер. Нагрівання тиглів і наступну ізотермічну витримку проводили в лабораторній печі типу СНОЛ-1,6,2,5.1/11М.

По закінченню ізотермічної витримки контейнер з деталями діставали з печі і охолоджували до кімнатної температури на повітрі. Після охолодження контейнера, силікат розбивали, контейнер розпаковували і витягували деталі з чистою поверхнею, які не вимагають додаткового очищення.

Візуальне вивчення і фотографування мікрошліфів боридних покриттів проводили на металографічних мікроскопі Carl Zeiss в інтервалі збільшення 100...1000 разів. Для запобігання сколювання покриття в процесі виготовлення мікрошліфів зразки затискали в сталеві струбцини, поміщаючи між струбциною і зразком сталеві або мідні прокладки. Полірування шліфів проводили на полірувальних кругах алмазною пастою зернистістю від 28 до 1 мкм, що забезпечувало одержання високої якості поверхні дослідження.

2. Результати досліджень

Отримані бороміднені покриття були піддані мікроструктурному, мікрорентгеноспектральному та рентгеноструктурному аналізу.

Вимір товщини дифузійних шарів та їхньої мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3 не менш, ніж в 10-15 полях зору при навантаженні 0,49 – 0,98 Н. Точність вимірювання мікротвердості складала ± 500 МПа.

Мікроструктурним аналізом встановлено, що отримані за даною технологією бороміднені покриття мають голчасту структуру з чітко вираженою границею розділу покриття-основа. В системі Fe – В масоперенесення елементів здійснюється переважно шляхом дифузії бору через боридний шар до основного фронту реакції, розташованому на міжфазних границях залізо – борид Fe_2B і борид Fe_2B – борид FeB .

Мікроструктура боридного шару заліза представляє собою голки боридів, котрі орієнтовані перпендикулярно поверхні зразка і вклинюються в феритні зерна (рисунок 1).

При формуванні дифузійного шару на поверхні металу по досягненні граничного насичення бором твердого розчину (α чи γ) спочатку виникає зародок, а потім голки тетрагонального бориду Fe_2B ($a = 5,109 \text{ \AA}$, $c = 4,249 \text{ \AA}$ і $c/a = 0,832 \text{ \AA}$), що містить 8,84% В, густина якого складає $7,336 \text{ г/см}^3$ [6]. Ці голки ростуть поступово замикаючись в суцільний шар боридів Fe_2B .

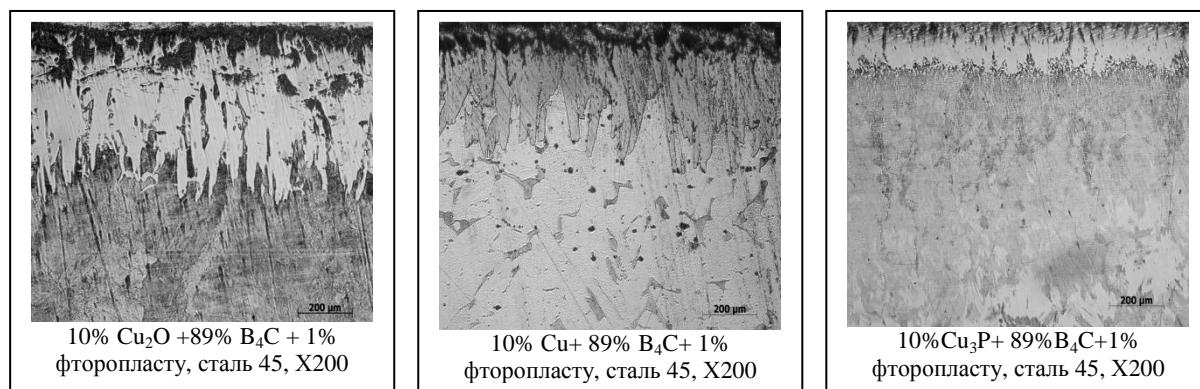


Рисунок 1 – Мікроструктура боридних покриттів легованих міддю на сталі 45 після 4 годин витримки при температурі 970 °С, $\times 200$

На поверхні цього боридного шару виникають відокремлені голки, а потім і другий шар ромбічного бориду FeB , котрий має густину $6,706 \text{ г/см}^3$ ($a = 5,506 \text{ \AA}$, $b = 4,061 \text{ \AA}$ і $c = 2,952 \text{ \AA}$), що містить 16,25 % В [6].

Зростання боридних фаз указує на те, що борид має області гомогенності, не відмічені на діаграмі стану Fe–В. Під шаром бориду розташовується перехідний шар з α -розчину бору в залізі.

Для виміру в'язкості руйнування монокристалів твердих кристалічних матеріалів застосовували метод Еванса – Чарльза. При цьому K_{1c} визначається по довжині радіальних тріщин, що утворюються навколо відбитка від індентора Вікерса, з напівемпіричного співвідношення:

$$K_{1c} = 0,015 \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

або графічної залежності між $(K_{1c} - \Phi/H) - (H/E - \Phi)$ і c/a , де Φ – постійна Маршу; H – твердість по Вікерсу; a – напівдіагональ відбитку; c – довжина радіальної тріщини; E – модуль Юнга.

Критичну напругу руйнування визначали за формулою:

$$\sigma = \frac{K_{1c}}{\alpha L^{0,5}}, \quad (2)$$

де σ – критична напруга руйнування; L – поперечний розмір боридного зерна; α – геометрична константа (π).

Розрахункові дані напружень сколювання, які можуть виникати в боридних фазах в залежності від параметру K_{1c} на сталі 45 представлено в таблиці 1.

Проведені нами дослідження показали, що величина напружень сколювання в боридних фазах є характеристикою, яка визначає рівень кавітаційної стійкості відповідних покриттів. З ростом напружень сколювання спостерігається ріст кавітаційної стійкості.

Для визначення хімічного складу покриттів був застосований мікрорентгеноспектральний аналіз, який проводили, використовуючи електронний растровий мікроскоп – РЕМ 106И при збільшенні

2000 раз, точністю 0.01 % мас. Визначення хімічного складу виконано методом EDS, розрахунок кількісного хімічного складу – по методу ZAF.

Таблиця 1 – Розрахункові дані напружень сколювання боридних покриттів (фаза FeB)

Джерело міді при насиченні	$K_{IC} \cdot 100$ МПа*м ^{0,5}	$\sigma_{\text{сколювання}}$	
		$l = 15$ мкм	$l = 20$ мкм
		МПа	МПа
Cu	197	237,18	299,27
Cu ₂ O	152	212,12	270,39
Cu ₃ P	194	229,93	289,07
Без легування	110	189,53	218,69

Розподіл елементів по перерізу дифузійного шару на зразках сталі 45 після борування з додаванням міді представлені на рисунку 2. Рентгеноспектральним аналізом встановлено дискретний розподіл міді (Cu) у поверхневих ділянках до 30 мкм боридних покриттів фази FeB. Про локальний розподіл міді (Cu) свідчить і хімічний аналіз поверхні боридного покриття (рисунок 3) та металографічний аналіз.

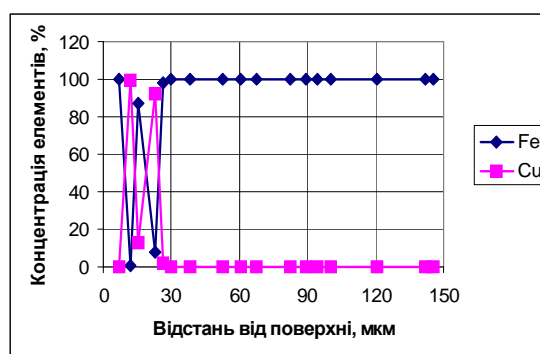
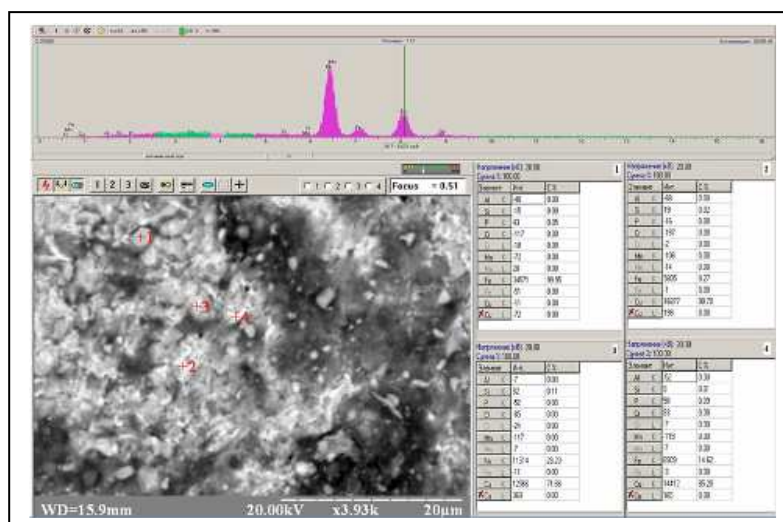


Рисунок 2 – Розподіл елементів по перерізу дифузійного шару на зразках сталі 45 після борування з додаванням міді



№ точки	1	2	3
Вміст міді, %мас	90,70	71,66	85,20

Рисунок 3 – Хімічний аналіз поверхні боридного покриття легуваного міддю

Мідні ділянки розміщуються у фазі FeB на поверхні і поширюються на глибину 10-15 мкм від поверхні шару. Окремі включення міді мають не правильну багатогранну витягнуту форму. Розміри мідних включень досягають в поперечному розрізі 1 - 1,5 мкм, а в повздовжньому розрізі, який співпадає з напрямком боридних голок, складає до 2 мкм. Мідні включення можуть скупчуватися біля пор у боридному покритті і оточувати їх стінки.

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

Фазовий і хімічний склад покриттів визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН 2.0 у мідному $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ монохроматичному випромінюванні і аналізаторі «Сameбах Sx50».

Дифрактограми, зняті з поверхні зразка після борування фіксують наявність дифракційного максимуму від FeB, а на зразку після бороміднення фіксуються фази FeB, Fe₂B та мідні включення.

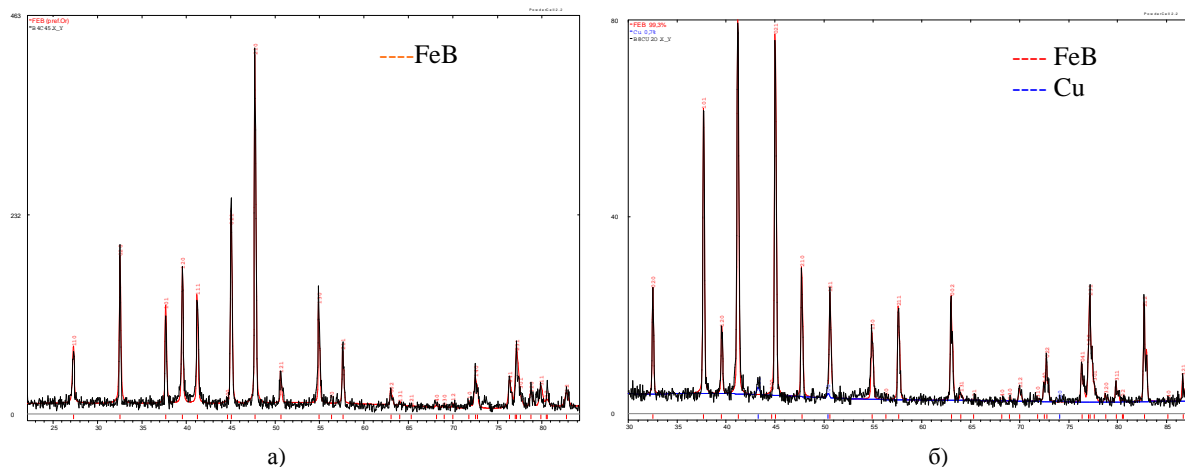


Рисунок 4 – Дифрактограми сталі 45 з боридними покриттями:
а) покриття після борування; б) покриття після борування з додаванням 10 % Cu_2O

Підготовка зразків до випробування на зносостійкість включала декілька етапів. Спочатку шляхом обробки за допомогою миючих засобів видаляли всі мастильні забруднення. Потім наждачним папером найменшої зернистості знімали всі інші забруднення. В кінці підготовки зразки знежирювали етиловим спиртом. Випробування зносостійкості проводили на машині тертя. Дослідження проводилось на зразках із сталі 45 розміром $10 \times 20 \times 5$ мм, а як матеріал контргіла була використана загартована та відпущена сталь У8.

Встановлено, що підвищення зносостійкості покриттів в умовах сухого тертя – ковзання відбувається при зміні джерела міді відповідно Cu_2O , Cu_3P , Cu. При цьому, покриття показали в 2 рази кращу зносостійкість порівняно з не легованими. Це пояснюється тим, що у структурі боридних шарів виявлені окремі вкраплення міді, які виконують роль твердого мастила (рисунок 5).

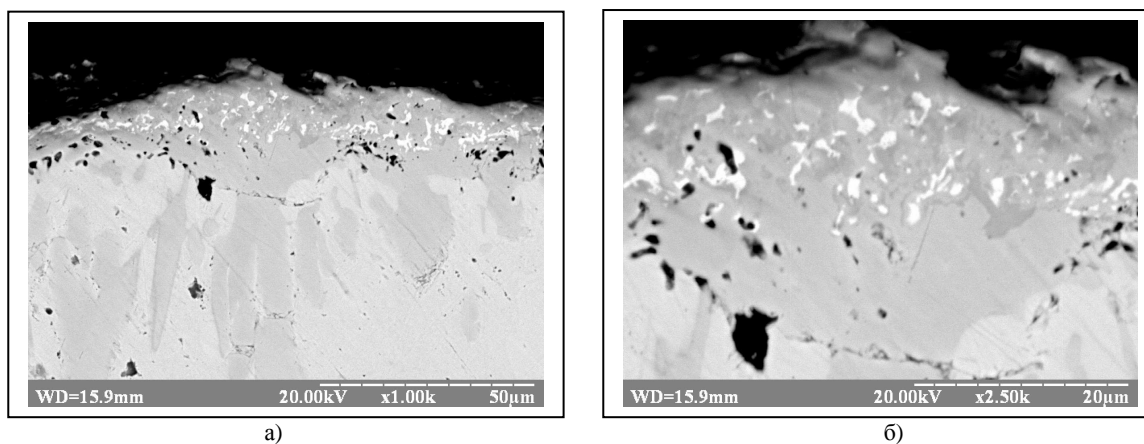


Рисунок 5 – Топографія поверхні боридного покриття легованого міддю на сталі 45
(світлі вклучення – Cu, а) $\times 500$; б) $\times 1000$)

Висновки

Бороміднення забезпечує оптимальний комплекс характеристик боридних фаз, а саме високу мікротвердість – 21 МПа, найменшу пористість, найбільше значення параметру K_{1C} , найбільше значення напружень. Порівняння зносостійкості боридних покриттів отриманих в середовищі з добавками Cu, Cu_2O , Cu_3P , показали, що найкраще зарекомендували себе боридні покриття отримані при введенні в насичуючу суміш Cu_2O . Отримані боридні покриття в середовищі з добавками Cu поступаються в

1,5 – 2 рази по зносостійкості покриттям отриманим при введенні в насичуючу суміш Cu_2O . Боридні шари отримані в середовищі з добавкою Cu_3P мають проміжні значення і поступаються покриттям отриманим в середовищі Cu_2O в 1,1 – 1,2 рази.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Ляхович Л.С. Состояние и перспективы развития процесса борирования / Л.С. Ляхович. — К.: Наукова думка, 1972. — 194 с.
2. Похмурский В.И. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий / В.И. Похмурский, В.Б. Далисов, В.М. Голубец. — Киев: Наукова думка, 1980. — 188 с.
3. Спиридонова І.М. Фазові перетворення в композиційних матеріалах з залізними зв'язками, що містять бор та вуглець / І.М. Спиридонова, О.В. Сухова, О.Г. Безрукава // Доповіді НАН України. — 2002. — № 10. — С. 93–97.
4. Баландин Ю.А. Комплексное насыщение поверхности инструментальных сталей бором, медью, хромом в псевдоожиге слое / Ю.А. Баландин // Изв. Вуз. Черная металлургия. — 2005. — № 5. — 50 с.
5. Чернега С.М. Комплексное насыщение углеродистых сталей бором и хромом в активированной среде / С.М. Чернега // Изв. Вуз. Черная металлургия. — 1999. — № 1. — 58 с.
6. Нарва В.К. Нанесение покрытий карбидосталей на стальную основу / В.К. Нарва, А.В. Полеченко // Изв. Вуз. Черная металлургия. — 1995. — № 1. — 47 с.

Надійшла до редакції 21.03.2013 р.

Чернега С.М., Медовая И.Ю., Поляков И.А. Структура и свойства боридных покрытий легированных медью на стали 45

Представлены результаты исследования по нанесению боромедных покрытий порошковым методом на стали 45. Определили толщину и микротвердость полученных покрытий, их фазовый и химический состав. Доказано, что боридные покрытия, легированные медью, более пластичны и имеют в 1,5 раза выше трещиностойкость (K_{1c}) и износостойкость, в сравнении с нелегированными.

Ключевые слова: борирование, боромеднение, износостойкость, трещиностойкость.

Chernega S.M., Medova I.U., Polyakov I.A. Structure and properties of boride coverages alloyed copper on steel 45

Research results are presented on lying of borocoppering coatings by powder-like method on steel 45. A thickness and microhardness of the received coatings, their phase and chemical composition are defined. It is well-proven that boride coatings, nieled with copper, are more plastic and have in 1,5 time higher crackresistant (K_{1c}) and wearproofness compared with unnieled.

Keywords: boriding, borocoppering, wearproofness.