

УДК 621.785, 669.017:669.15

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ В ЕЛЕКТРОЛІТНІЙ ПЛАЗМІ НА СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ БОРИДНОГО ШАРУ ЗА БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО НАСИЧЕННЯ СТАЛІ

Л. І. ФЕДОРЕНКОВА

Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара

Експериментально досліджено комплексний багатофазний дифузійний шар, сформований на поверхні попередньо обробленої сталі в електролітній плазмі та в умовах хіміко-термічної обробки (ХТО) в насичувальному середовищі, що містить бор, молібден, вольфрам. В результаті багатокомпонентного насичення на поверхні сталі отримано дифузійний шар зі структурними елементами різної твердості, до складу яких входять мікрокристалічні включення боридів молібдену і вольфраму, а також тверді розчини на основі заліза, які сприяють підвищенню зносостійкості боридного покриття в 1,5–2 рази. Встановлено, що попередня обробка сталі в електролітній плазмі прискорює дифузійні процеси під час формування багатофазного покриття за ХТО, сприяє утворенню і розподілу мікрокристалічних включень з тугоплавких сполук на велику глибину, впливає на морфологію та якісні характеристики поверхні.

Ключові слова: бориди, багатокомпонентний, попередня обробка, електролітна плазма, мікрокристалічні включення, мікротвердість.

Experimental studies of a complex multiphase diffusive layer formed on the surface of a pretreated steel in electrolyte plasma and under conditions of chemical-thermal treatment (CTT) in the saturating medium containing boron, molybdenum, and tungsten are carried out. The diffusive layer with structural elements of different hardness is formed on the steel surface as a result of multicomponent saturation. The diffusive layer composition contains microcrystalline inclusions of molybdenum and tungsten borides, as well as iron-based solid solutions, which increase wear resistance of boride coating in 1.5–2 times. It has been established that steel pretreatment in an electrolyte plasma leads to acceleration of diffusion processes during the formation of a multiphase coating in the CTT process, promotes the formation and distribution of microcrystalline inclusions made of refractory compounds to a greater depth, affects the morphology and qualitative characteristics of the surface.

Keywords: borides, multicomponent, pretreatment, electrolyte plasma, microcrystalline inclusions, microhardness.

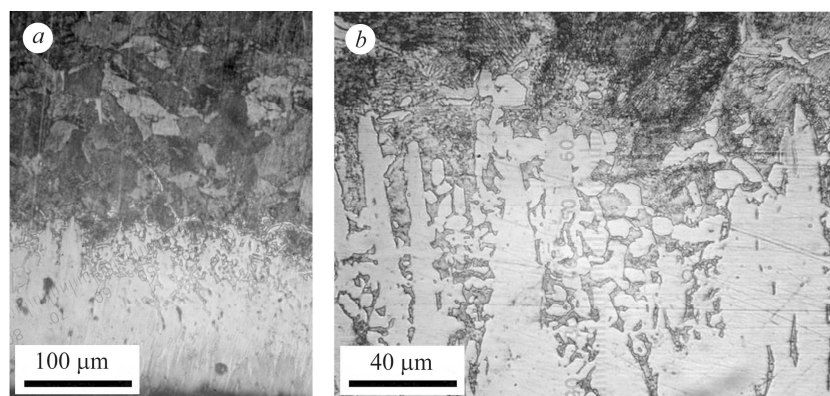
Вступ. Борування (одно- і двофазне) застосовують для поверхневого зміцнення деталей машин, інструменту і технологічного обладнання, які працюють в умовах тертя без змащення, абразивного зношування і в корозивних середовищах [1–3]. Для підвищення якості боридних шарів їх насичують (паралельно з бором) такими елементами: вуглець, азот, алюміній, кремній, нікель, титан, ванадій, хром, магній, молібден, вольфрам тощо [4]. В результаті цього формуються комплексні багатофазні покриття зі структурними елементами різних твердості і опору крихкому руйнуванню, що поліпшує мікромеханічні, корозійні, жаростійкі характеристики шару. Наприклад, присутність нікелю у боридному шарі підвищує опір крихкому руйнуванню в 1,5–2 рази [5]. Танталоборування заліза і сталі [6] виріз-

няється отриманням покриття з вищою твердістю, зносо- і корозійною стійкістю, здатного працювати в умовах істотних динамічних навантажень. Велика кількість праць присвячена здебільшого двокомпонентному насиченню, наприклад, борохромованню, боронікелюванню, боромолібдуванню. Отримання покриттів за участю трьох і більше елементів одночасно вивчено менше. Двокомпонентне насичення сталей одночасно бором і вольфрамом, а також бором і молібденом з порошкових сумішей призводить до утворення дифузійного шару, що не відрізняється за фазовим складом від борованого, але містить у зоні монобориду 10...15% вольфраму або молібдену [4]. Спостерігають підвищену зносо- і корозійну стійкість боромолібдованого шару і меншу крихкість борвольфрамованого порівняно з борованим. Як показано раніше [4], за одночасного, а також за послідовного насичення бором і вольфрамом або бором і молібденом газовим контактним методом не вдається отримати дифузійний шар з боридами цих елементів. Це пояснюють тим, що вольфрам і молібден є слабкими утворювачами боридів. Вони мають низьку дифузійну рухливість у залізі. Інтенсифікації дифузії бору і легувальних елементів під час насичення досягають різними способами, які відрізняються активувальним чинником. Це може бути як хімічна речовина, так і випромінювання, розряд, вибух, удар, тертя тощо. Хімічні речовини сприяють зростанню концентрації насичувального компонента на поверхні металу, що прискорює дифузю, скорочуючи тривалість обробки. Дія перерахованих вище фізичних чинників забезпечує структурні зміни і створення метастабільних станів у поверхневих шарах металу. Через мікронапруження, які виникають під дією деформувальної сили, енергія активації дифузійного процесу знижується, збільшуючи швидкість насичення. Мета роботи – дослідити дифузійний шар, сформований на поверхні попередньо оброблених в електролітній плазмі зразків зі сталі та в умовах хіміко-термічної обробки (ХТО) у насичувальному середовищі, що містить бор, молібден та вольфрам.

Методика експерименту. Насичували у порошковому середовищі такого складу: карбід бору, оксиди молібдену та вольфраму, активуючи додатки за температури 1223 К впродовж 4 h. Попередньо зразки зі сталі 40 обробляли у водному розчині електроліту, який містить бор, за щільності струму 0,4...1,2 А/см² впродовж 15...20 min за заявленим способом [6, 7].

Мікроструктуру зразків встановлювали травленням в 0,2%-му спиртовому розчині HNO₃. Металографічний аналіз виконували на мікроскопі “Neophot-21” та мікротвердомірі ПМТ-3 за навантаження 50 g. Зношували зразки на установці для випробувань валкових та штампових матеріалів зі зусиллям притиску 200 kg/cm і швидкістю обертання 140...150 грм. Ідентифікували фазові складові методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН-2 у залізному випромінюванні.

Результати та їх обговорення. В результаті багатокомпонентного насичення сталі 40, попередньо обробленої в електролітній плазмі, на її поверхні сформувався дифузійний шар завглибшки 150±10 μm, мікроструктура якого показана на рисунку. Мікротвердість за глибиною дифузійного шару змінювалася від 17,4 до 14,85 МПа у зоні диборидів та від 33 до 20,65 МПа у зоні моноборидів. Моноборид заліза становить ~ 30% від загального шару боридів. Крім того, в зоні моноборидів є включення з мікротвердістю ~ 37 та 47,8 МПа. Результати випробувань на зносостійкість показали збільшення опору зносу в 1,5–2 рази. Морфологія боридного шару не має вираженої голчастої форми, як за звичайного борування цієї марки сталі (рисунок *a*) – простір між сильно розгалуженими голками заповнено окремими острівцями боридів (рисунок *b*).



Мікроструктура дифузійного шару за багатокомпонентного борування: *a* – $\times 250$; *b* – $\times 630$.

Microstructure of the diffusion layer during multicomponent boriding: *a* – $\times 250$; *b* – $\times 630$.

Згідно з працею [1], за боромолібдування та борвольфрамування бориди молібдену і вольфраму не утворюються. Однак результати рентгеноструктурного аналізу поверхневого шару зразків, оброблених у насичувальному середовищі з бором, молібденом, вольфрамом, показали, що поряд з боридами заліза FeB і Fe₂B присутні бориди Mo₂B, δ-MoB, W₂B₉, WB₄, β-WB, а також потрійні сполуки Fe₁₃Mo₂B₅, Fe₂MoB₄, FeW₃C, Fe₃W₃C, Mo₂BC. Причому тугоплавкі бориди високої твердості, а саме бориди вольфраму WB₄, β-WB з твердістю ~ 40 і 37 МПа відповідно [3], концентруються здебільшого в зоні монобориду FeB. Бориди вольфраму в умовах ХТО утворюються за схемами: WO₃ + V₄C + C → W₂B₅ + CO; W₂B₅ + 2B₂O₅ ↔ 2WO₂ + 9B; W₂B₅ + 3B ↔ 2WB₄.

Результати рентгеноструктурного аналізу дають змогу припустити, що молібден дифундує слідом за бором і утворює потрійні сполуки Fe₂MoB₄ і Mo₂BC у зоні Fe₂B, а бориди Mo₂B, δ-MoB утворюються здебільшого в зоні FeB ближче до поверхні, де концентрація бору досить велика. Згідно з працею [3], температура, за якої відбувається насичення, недостатня для отримання боридів вольфраму та молібдену. В праці [4] дифузія молібдену відбувається за температури ~ 1273 К, але при цьому бориди молібдену не утворюються, а лише сполуки типу (Fe, Mo)₃(C, B). Однак за ХТО попередньо оброблених зразків в електролітній плазмі бориди молібдену та вольфраму утворюються за температури 1223 К.

Вплив попередньої обробки полягає в тому, що структура поверхневого шару змінюється під дією розряду і компонентів, які є в електроліті, переходить у метастабільний стан, що сприяє активації дифузії за ХТО. Так, згідно з працею [8], коефіцієнти дифузії бору для попередньо обробленої в електролітній плазмі і необробленої поверхні зразка становлять відповідно $6,7 \cdot 10^{-9}$ та $0,1 \cdot 10^{-9}$ см²/с. Тобто на обробленій поверхні дифузійні процеси прискорюються в десятки разів. Електролітна плазма сприяє формуванню на поверхні катода неоднорідної структури завглибшки до 50...80 μm [8, 9], що характерно для процесів з високими локальними швидкостями нагрівання та охолодження.

За результатами мікрорентгеноструктурного аналізу оброблених в електролітній плазмі зразків [9] вища концентрація дифундуючих компонентів є на межах зерен, де під дією високих локальних температур здебільшого і утворюються нові нанорозмірні фази високої твердості. Деякі з боридних включень мають розміри співмірні з наноструктурами (~ 80 nm). При цьому відбувається відтік вуглецю від поверхні до середини зразка.

Стан структури поверхні після попередньої обробки в електролітній плазмі сприяв прискоренню дифузійних процесів за багатокомпонентної ХТО та утво-

ренню твердофазних тугоплавких структур у дифузійному шарі. В результаті це забезпечило формування, крім боридної зони дифузійного шару, мікротвердість якої завдяки включенням боридів молібдену і вольфраму в 1,5–2,2 рази більша, ніж за звичайного однокомпонентного борування, прошарку завглибшки від 250 до 600 мкм, мікротвердість якого вища, ніж матриці в 1,5–2,5 рази.

Таким чином, на дифузію та утворення боридів високої твердості впливає попередня обробка поверхні сталі в електролітній плазмі.

ВИСНОВКИ

В результаті багатокомпонентного насичення в суміші, яка містить бор, вольфрам, молібден, на поверхні сталі утворюється комплексне багатофазне покриття зі структурними елементами різної твердості, до складу яких входять мікрокристалічні включення боридів молібдену та вольфраму, а також тверді розчини на основі заліза, які сприяють підвищенню зносо- та жаростійкості. Встановлено, що попередня обробка сталі в електролітній плазмі за багатокомпонентного насичення прискорює дифузійні процеси, сприяє утворенню і розподілу мікрокристалічних включень з тугоплавких сполук на велику глибину, впливає на морфологію та якісні характеристики поверхні, збільшує зносостійкість боридного шару в 1,5–2 рази. Багатокомпонентне насичення поверхні металу різними елементами дає можливість створювати багатошарові композиційні матеріали з унікальними властивостями.

1. *Ляхович Л. С., Ворошнин Л. Г.* Многокомпонентные диффузионные покрытия. – Минск: Наука и техника, 1974. – 240 с.
2. *Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на железоуглеродистых сталях / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Б. Б. Хина, С. Д. Бацлак.* – Минск: БНТУ, 2007. – 470 с.
3. *Земсков Г. В., Коган Р. Л.* Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
4. *Fedorenkova L. I. and Mostovoy V. I.* Influence of molybdenum and nickel on plastic properties of boride layer // Вісник ДНУ. Сер.: Фізика. Радіоелектроніка. – 2014. – 22, № 1. – С. 129–133.
5. *А. с. № 535375, СССР, М. Кл. С 23С9/04.* Электролит для борирования / В. Д. Коротов, М. П. Буйнов, О. И. Скоморохов, М. В. Каплан. – Оpubл. 15.11.1976, Бюл. № 42.
6. *Патент № 99119, Україна, МПК С 23 С 8/70.* Спосіб обробки сталевих виробів / Л. І. Федоренкова, Н. Ю. Филоненко, І. М. Спиридонова. – Оpubл. 25.07.2012, Бюл. № 14.
7. *Федоренкова Л. И.* Влияние предварительной обработки в электролитной плазме стали 20 на скорость образования диффузионного слоя при ХТО // Междунар. конф. “Строительство, материаловедение, машиностроение”. – Днепропетровск, 2009. – Вып. 42, ч. 2. – С. 61–64.
8. *Федоренкова Л. И., Филоненко Н. Ю.* Вплив плазмового стану речовини на дифузію атомів при електролізі // Фізика і хімія твердого тіла. – 2017. – 18, № 1. – С. 64–68. DOI: 10.15330/psss.18.1.64-68. PACS: 82.45.
9. *Федоренкова Л. И.* Температурное воздействие электролитной плазмы на структуру поверхности металла // Физика и техника высоких давлений. – 2014. – 24, № 1. – С. 136–144. URI: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/69698>.

Одержано 21.09.2020