

УДК 621.785.53

doi:10.20998/2413-4295.2016.42.09

ПОВЕРХНЕВЕ ДВОШАРОВЕ ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ НАСИЧЕННІ ВУГЛЕЦЕМ ТА БОРОМ В ПОРОШКОВИХ МАКРО- ТА НАНОДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

К. О. КОСТИК

Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА
email: eklitus@gmail.com

АНОТАЦІЯ Метою роботи є зміцнення поверхневих шарів сталей методами ХТО в порошкових макро- та нанодисперсних середовищах. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання: розробити методи ХТО у нових порошкових середовищах; встановити оптимальні режими; розрахувати ефективні коефіцієнти дифузії насичувальних елементів в сталях. В роботі використані оптична та електронна мікроскопія; вимірювання мікротвердості, обробка результатів статистичними методами. Поверхнє двошарове зміцнення сталі 38Х2МЮА при послідовну насиченні атомарним вуглецем (при цементації) та атомарним бором (при пічному боруванні) при різних температурах, дозволило сформувати боридний шар з перехідною зоною. Отримана перехідна зона дозволяє підвищити експлуатаційні властивості деталей машин та інструменту за рахунок зменшення мікротвердості дифузійного шару. Обрано оптимальний режим комплексної ХТО, який включає цементацію при 950 °С протягом 2 годин, борування при 950 °С протягом 2 годин для отримання найбільшої поверхневої твердості 22 ГПа з максимальним загальним дифузійним шаром 1,4 мм. Отримано математичні моделі формування дифузійних шарів та зміну коефіцієнту дифузії бору після комплексного насичення атомарним вуглецем та бором, які дозволяють прогнозувати необхідні властивості поверхневих шарів легваної сталі від температури ХТО.
Ключові слова: хіміко-термічна обробка; легвана сталь; глибина дифузійного шару; мікротвердість поверхні; дифузія

DOUBLE-LAYERED SURFACE HARDENING OF STEEL IN SUCCESSIVE SATURATION OF CARBON AND BORON IN POWDERED MACRO AND NANOSCALE ENVIRONMENTS

К. KOSTYK

Department of Foundry, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT This work is focused on two urgent tasks: to pick up saturating composition, which significantly accelerates the processes chemical heat treatment; to develop technology without using special equipment. Addressing these issues will provide the necessary product quality and significantly reduce the energy consumption of modern Ukraine. The aim is the strengthening of surface layers of steels by the methods of chemical heat treatment in the powder macro - and nanoscale environments. To achieve the goal it is necessary to solve following tasks: to develop methods chemical heat treatment new powder environments; to determine optimum modes; to calculate the effective diffusion coefficients saturating elements in steels. We used optical and electron microscopy, microhardness measurements, processing the results by statistical methods. Two-layer surface strengthening of steel 38Cr2MoAl the sequential saturation of the atomic carbon, and atomic boron at various temperatures, allowed to form boriding layer with a transition zone. Obtained transition zone allows to improve operational properties of machine parts and tools by reducing microdroplet diffusion layer. The selected optimal mode of the integrated, which includes carburizing at 950 °C for 2 hours, boriding at 950 °C for 2 hours to obtain the highest surface hardness of 22 GPa with a maximum total of the diffusion layer is 1.4 mm. the Obtained mathematical model of formation of diffusion layers and the change of the diffusion coefficient of boron after complete saturation of the atomic carbon and boron, in order to predict the required properties of the surface layers of alloy steels to the temperature.

Keywords: chemical heat treatment; alloy steel; depth of the diffusion layer; the microhardness of the surface diffusion

Введення

Для підвищення довговічності найбільш відповідальних деталей машин широко використовуються процеси цементації, нітроцементації та азотування. Деяко менше використовується поверхнєве насичення бором, кремнієм та металами. Прикладом можуть служити деталі автомобілів, тракторів, станків та інших машин,

що працюють в умовах зносу, кавітації, циклічних навантажень, корозії тощо.

Процес хіміко-термічної обробки є багатоступеневим, і включає в себе три послідовні стадії:

1. Утворення активних атомів в середовищі насичення біля поверхні або безпосередньо на поверхні металу. Потужність дифузійного потоку, тобто кількість активних атомів які виникають за одиницю часу.

2. Адсорбція поверхнею насичення активних атомів, що утворилися. Адсорбція є складним процесом, перебіг якого носить нестационарний характер. Розрізняють фізичну (оборотну) адсорбцію і хімічну адсорбцію (хемосорбцію). При хіміко-термічній обробці ці типи адсорбції накладаються одна на одну. Фізична адсорбція призводить до зчеплення адсорбованих атомів елемента насичення (адсорбату) з оброблюваною поверхнею (адсорбентом) завдяки притягальній дії сил Ван дер Вальса, і для неї характерна легка оборотність процесу адсорбції-десорбції. При хемосорбції відбувається взаємодія між атомами адсорбату і адсорбенту, яка за своїм характером і силою близька до хімічної.

3. Дифузія – переміщення адсорбованих атомів в решітці оброблюваного металу. Процес дифузії можливий тільки при наявності розчинності дифундуючого елемента в оброблюваному матеріалі і досить високої температурі, що забезпечує енергію необхідну для перебігу процесу.

Товщина дифузійного шару, а отже і товщина зміцненого шару поверхні виробу, є найважливішою характеристикою хіміко-термічної обробки. Товщина шару визначається рядом таких факторів, як: температура насичення; тривалість процесу насичення; склад металу, тобто вміст у ній тих чи інших легувальних елементів; градієнт концентрацій насичуючого елемента між поверхнею виробу і в глибині шару насичення [1, 2].

Аналіз літературних даних

Цементация – це хіміко-термічна обробка, яка полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглецем при нагріванні у відповідному середовищі – карбюризаторі. Цементацию проводять при температурах вище точки A_{C3} (930–950 °C), коли стійкий аустеніт, який розчиняє вуглець у великих кількостях.

Цементация широко застосовується для зміцнення середньо розмірних зубчастих коліс, валів коробки передач автомобілів, окремих деталей рульового керування, швидкохідних валів верстатів, шпинделів і багатьох інших деталей машин.

Газова цементация здійснюється в стаціонарних (безперервно-діючих) печах. Цементуючий газ готують окремо і подають в цементацийну реторту. При газовій цементации відбувається три процеси:

1. Дисоціація – розпад активних атомів дифузійного елемента.

2. Абсорбція відбувається на кордоні газ-метал і складається в поглинанні (розчиненні) поверхнею вільних атомів.

3. Дифузія – проникнення елемента, що насичує, вглиб металу.

Залежно від дифундуючого насичуючого поверхню елемента розрізняють наступні види ХТО: цементацию (вуглець); азотування (азот); нітроцементация (азот + вуглець); сульфоазотування

(сірка + азот); алітування (алюміній); хромування (хром) та ін.

Цементуючими газами є окис вуглецю і газоподібні вуглеводні. Розкладання цих сполук призводить до утворення активного атомарного вуглецю. Якщо поверхня сталі не поглинає весь виділяючийся вуглець (абсорбція відстає від дисоціації), то вільний вуглець, кристалізується з газової фази, відкладається у вигляді щільної плівки сажі на деталі, ускладнюючи процес цементации [3].

Тому для раціонального ведення процесу газової цементации потрібно мати газ певного складу і регламентувати його витрати.

Таким чином, при температурі цементации ми отримуємо аустеніт змінної від концентрації 1,2–1,3 % C (при температурі процесу 860 °C) до 0,1–0,15 % C. При охолодженні після цементации до нормальної температури відбудеться перетворення у відповідності з вмістом вуглецю в данному шарі.

Поверхнева зона, в якій вуглецю 0,8–0,9 % має структуру перліт + цементит, потім зона з вмістом вуглецю близько 0,8 %, після зона з вмістом вуглецю менш 0,7 % плавно переходить в структуру серцевини.

Вміст вуглецю у зовнішньому шарі не повинен перевищувати 1,1–1,2 % тому, що великий вміст вуглецю призводить до утворення вторинного цементиту, який підвищує крихкість.

Завдання цементации – забезпечити високу поверхневу твердість і зносостійкість при в'язкій серцевині – не вирішується однією цементацией. Остаточні формують властивості наступним гартуванням.

Тверда цементация виробляється в спеціальних сталевих ящиках, в яких деталі укладають поперемінно з карбюризатором. Ящики закривають кришками і замазують вогнетривкою глиною для запобігання витoku газів. Як твердий карбюризатор використовують дубове і березове деревне вугілля і активатори $BaCO_3$ або Na_2CO_3 . Найчастіше використовують суміш з 75–85 % березового вугілля і 20–30 % $BaCO_3$ або Na_2CO_3 . Застосовують також карбюризатори, що містять 10–20 % вуглекислих солей. При нагріві до температури 900–950 °C відбуваються реакції, при яких окис вуглецю в присутності заліза розкладається на двоокис вуглецю і вуглець. Атоми вуглецю, що утворились в результаті цих реакцій, потрапляють в решітку γ -заліза і через дифузію проникають на певну глибину в поверхневі шари деталей.

Ступінь насичення і глибина проникнення вуглецю залежить від тривалості процесу і якості карбюризатора [4].

Недоліками процесу цементации твердим карбюризатором є велика трудомісткість і низька продуктивність. Однак головною перевагою цього процесу є відсутність потреби у спеціальному устаткуванні.

Властивості поверхневих шарів деталей обумовлюються складом і структурою цементованого

шару. Встановлено, що кращі властивості мають сталі із вмістом вуглецю в поверхневому шарі в межах 0,8–1 %. Із збільшенням концентрації вуглецю зносостійкість сталі зменшується на 10–15 %, границя міцності при скручуванні – на 15–20 %. Знижується також ударна в'язкість.

Мікроструктура цементованого шару вуглецевої сталі після повільного охолодження складається з доевтектоїдної, евтектоїдної і заевтектоїдної сталей. Глибиною цементації є сумарна глибина заевтектоїдної, евтектоїдної і половини доевтектоїдної зони [5]. Структура заевтектоїдної зони складається з пластинчатого перліту з невеликою кількістю залишкового цементиту, а евтектоїдна зона має перлітну структуру. Після гартування структура цементованого шару складається з дрібногольчатого мартенситу.

Процес цементації проводять вище A_{c3} (зазвичай при 910–930 °С, рідше при 1000–1050 °С), коли сталь знаходиться в аустенітному стані з високою розчинністю вуглецю. Товщина цементованого шару залежно від складу сталі і призначення виробу може складати 0,5–2 мм [6].

Борування – хіміко-термічна обробка, що полягає в дифузійному насиченні поверхнього шару сталі бором.

Найбільш поширеним є рідинне електролізне борування: в тигель з розплавленої бури поміщають оброблювану деталь (катод) і графітовий стрижень (анод), через які пропускають постійний струм для створення процесу електролізу. Оптимальна температура борування 920–950 °С. Основним обладнанням є печі-ванни з електричним або газовим обігрівом. Підвищення щільності струму, температури і тривалості процесу незначно збільшує товщину шару при одночасному зростанні його крихкості. Крім того, підвищення температури призводить до зменшення терміну служби обладнання, збільшення витрати сировини і погіршує структуру основного металу. Зниження температури зменшує швидкість дифузії і уповільнює процес борування [7].

Газове борування – більш досконалий метод насичення бором. Воно проводиться в активних газових середовищах і при більш низьких температурах. Але застосовувані газові суміші, токсичні та вибухонебезпечні, що й обмежує застосування газового борування. Газове борування проводять у спеціальних установках за рахунок розкладання газоподібних сполук бору: диборану (B_2H_6), трихлористогобору (BCl_3), трібромистого бора (BBr_3), триметил $[(CH_3)_3B]$ та інших речовин. У технологічному плані процес газового борування подібний процесів газової цементації або азотування.

Борування в обмазках (з паст) доцільно застосовувати при зміцненні великогабаритних виробів, а також при необхідності місцевого борування. Розвиток цього напрямку в боруванні стимулюється також можливістю поєднання борування з вживаними на підприємствах режимами

термічної обробки зміцнення деталей [8]. Технологія процесу борування з паст передбачає виконання таких операцій: приготування обмазки, підготовка поверхні до насичення, нанесення і сушка обмазки, борування деталей за заданим режимом, охолодження і очищення деталей від паст. Основні компоненти пасті ретельно змішують у спеціальних змішувачах і розбавляють до необхідної консистенції. В якості в'язучих використовують гідролізний етил силікат, рідке скло, сульфитно-спиртову барду, декстриновий клей тощо. Консистенція пасті визначається в основному обраною технологією нанесення її на деталі: пульверизацією, зануренням, кистю. Після завершення режиму насичення деталі охолоджують на повітрі або піддають безпосередньому гартуванню.

Призначення борування – підвищити твердість, яка зберігається до 950 °С, опір абразивного зносу і корозії в агресивних середовищах, теплостійкість і жаростійкість сталевих деталей [9–10].

Матеріал і методика дослідження

Досліджувані матеріали для комплексної хіміко-термічної обробки


Матеріалом для дослідження в даній науково-дослідній роботі є сталь 38Х2МЮА. Зразки зміцнювали боруванням та комплексною хіміко-термічною обробкою за режимами, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Режими хіміко-термічної обробки

№ п/п	Цементация	Борування
1	800 °С, 2 год	800 °С, 2 год
2	850 °С, 2 год	850 °С, 2 год
3	900 °С, 2 год	900 °С, 2 год
4	950 °С, 2 год	950 °С, 2 год

Сталь 38Х2МЮА застосовується для виготовлення штоків, клапанів парових турбін, що працюють при температурі до +450 °С, гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання, голок форсунок, тарілок букс, розпилювачів, пальців, плунжерів, розподільних валиків, валів, втулок та інших деталей, деталей ракетних і авіаційних двигунів, деталей трубопроводів з загартуванням в маслі і відпуском у маслі або у воді, суцільнокатаних кілець різного призначення (табл. 2).

Таблиця 2 – Деталі зі сталі 38Х2МЮА після ХТО

Назва деталі	Сфера використання	Зображення деталі
Сопла	Частина труби, що служить для регулювання струменя газу, пари, рідини, що виходить із неї	

Шестерня	Використовуються парами з метою перетворення обертального моменту і числа обертів валів на вході і виході	
Пуансон	Надає безпосередній тиск на матеріал, що обробляється	
Шестерня	Передає обертальний рух між валами	

Застосовані матеріали й технологія ХТО

При цементації зразки поміщають у контейнер, заповнений карбюризатором, в якості якого служить деревне вугілля (дубовий або березовий) в зернах поперечником 3,5–10 мм або кам'яно-вугільний напівкокс і торф'яний кокс, до якого додають активатори: вуглекислий барій (BaCO_3) і кальциновану соду (Na_2CO_3) в кількості 10–40 % від маси вугілля.

Приготування карбюризатора зводиться до дроблення деревного вугілля і просіювання його через систему сит; роздроблене вугілля (3,5–10 мм) поливають водним розчином вуглекислих солей (температура розчину 50–80 °С), ретельно перемішують і просушують при 100–150 °С.

Зразки, що підлягають цементації, після попереднього очищення укладають у зварні сталеві контейнери. При упаковці виробів на дно контейнера насипають і утрамбовують шар карбюризатора товщиною 20–30 мм, на який укладають перший ряд зразків, витримуючи відстань між зразками і до бічних стінок контейнера 10–15 мм. Потім засипають і утрамбовують шар карбюризатора товщиною 10–15 мм, на нього укладають другий шар зразків і т. д. Останній (верхній) ряд зразків засипають шаром карбюризатора товщиною 35–40 мм з тим, щоб компенсувати можливу його усадку. Зразки зазвичай займають 15–20 % об'єму контейнера. Контейнер накривають кришкою обмазують вогнетривкою глиною або сумішшю глини і річкового піску. Після цього контейнер поміщають у піч. Нагрівання проводилося до температур: 800 °С, 850 °С, 900 °С, 950 °С і витримували протягом 2 год. Після цементації контейнер охолоджували на повітрі до 400–500 °С і потім розкривали [13].

Борування в обмазках доцільно застосовувати при необхідності зміцнення великогабаритних виробів або для місцевого борування окремих ділянок деталей. Перед боруванням поверхню зразків очищали від слідів окалини, іржі, змащення та інших забруднень. Незначні забруднення видалили 96 %-им спиртом.

Борування в порошкоподібних сумішах проводять на основі боровмістких речовин.

Наносився шар пасти два-три рази із просушуванням у шафі при температурі 140 °С протягом 30–40 хв до повного висихання пасти. Далі зразки, пересипані поліборидом магнію, містилися в тигель. Ставили в камерну піч на 120 хв при температурах 800 °С, 850 °С, 900 °С, 950 °С Зразки після борування піддавалися термічній обробці: гартуванню і відпуску. Гартування проводили з температур борування в олію.

Для борування в пастах застосовувалася суміш на основі боровмістких речовин з додаванням активаторів. Складові перемішували в сухому стані в спеціальному змішувачі, потім додавали сполучні компоненти до необхідної консистенції. Також, як сполучні елементи використовували 96 % спирту і розчин клею БФ-2 в ацетоні. Відпуск проводили в камерній печі при температурі 200 °С протягом 1,5 год з наступним охолодженням на спокійному повітрі [14].

Структурні дослідження

Дослідження мікроструктури зразків зі сталі 38Х2МЮА проводилися методом оптичної мікроскопії на МІМ-7 та ММР-4 при різних збільшеннях.

Вимірювання твердості зразків за Роквеллом було проведено за стандартною методикою. Вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3 при навантаженні 100 грамів і витримці 15 с згідно з ГОСТ 9450-76. Індентором була алмазна піраміда із квадратною підставою правильної чотиригранної форми з кутом при вершині між протилежними гранями рівним 136 ° [16].

Обговорення результатів

Для борованого шару характерно розташування кристалів бориду у вигляді голок, направлених углиб перпендикулярно поверхні, що свідчить про анізотропію дифузії бору. Переважає пересування бору в напрямі, перпендикулярному фронту дифузії, пояснюється анізотропією концентрації вакансій на площинах кристалічних решіток з різними кристалографічними індексами. Анізотропія дифузії більш властива кристалічним решіткам з низькою симетрією. Поява на поверхні сталі бориду, в початковий період процесу борування приводить до перекристалізації симетричних кубічних решіток α - або γ -фази в тетрагональну (Fe_2B) і потім ромбічну (FeB), що сприяє анізотропії дифузії.

Орієнтація бориду така, що створюються направлені перпендикулярно фронту дифузії, співпадаючі з площиною (001) і (100) кристалічних решіток «канали», по яким бор дифундує крізь решітки бориду. Такий спосіб проникнення бору прискорює процес насичення і створює умови для швидкої акумуляції атомів бору і зростання боридної фази в більш глибоких зонах. Концентрація домішок на

межах зерен збільшує горофільність бору, що сприяє просуванню бориду у вигляді клинів.

Результати дослідження сталі 38X2MЮА відображають дані в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати дослідження сталі після борування

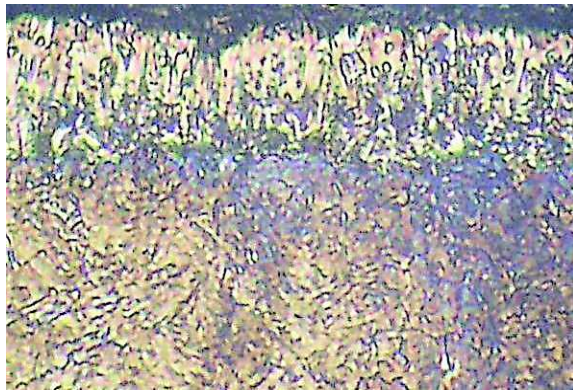
Марка сталі	Результати хіміко-термічної обробки		
	Твердість поверхні, ГПа	Твердість серцевини HRC ₃	Товщина слою, мкм
38X2MЮА	22	55	30–120

При насиченні сталі 38X2MЮА бором утворюються хімічні з'єднання бору із залізом FeB і Fe₂B. При утворенні борованого шару спочатку від поверхні углиб металу проростають окремі

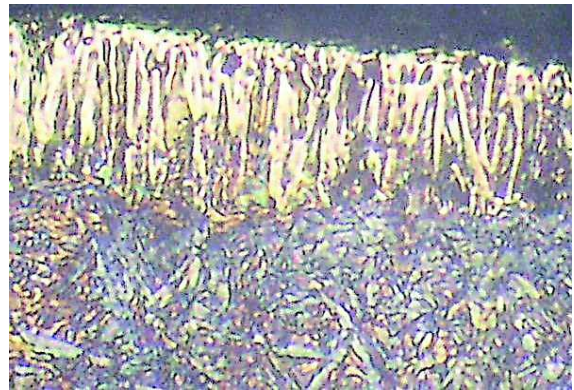
голкоподібні кристали бориду Fe₂B. Поступово ці кристали зливаються в суцільний шар. У міру подальшого насичення бором на поверхні утворюється ще один шар з бориду FeB.

На рис. 1 приведені мікроструктури борованої сталі 38X2MЮА при різних температурах. У цій сталі яскраво виражена голчата структура боридів у вигляді клинів, спрямованих в сталь. При підвищенні температури ХТО від 800 до 1000 °С в сталі борований шар значно збільшується.

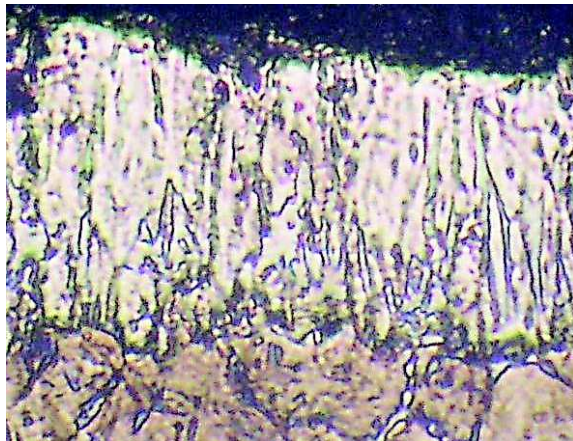
Дифузійний шар в борованих сталях складається із зони реактивної дифузії і примикаючої до її внутрішньої межі перехідної зони. Утворення перехідної зони обумовлено міграцією углиб вуглецю, що витісняється дифундуючим бором, звужуючим γ -область. Завдяки підвищеному вмісту вуглецю в цій зоні утворюється перлітна структура. Глибина такої зони у декілька разів перевищує глибину самого борованого шару.



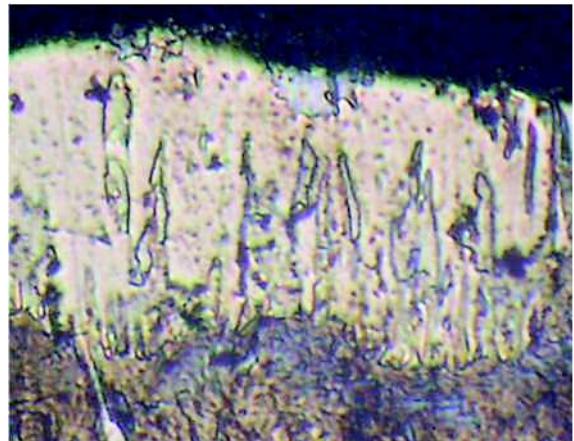
а



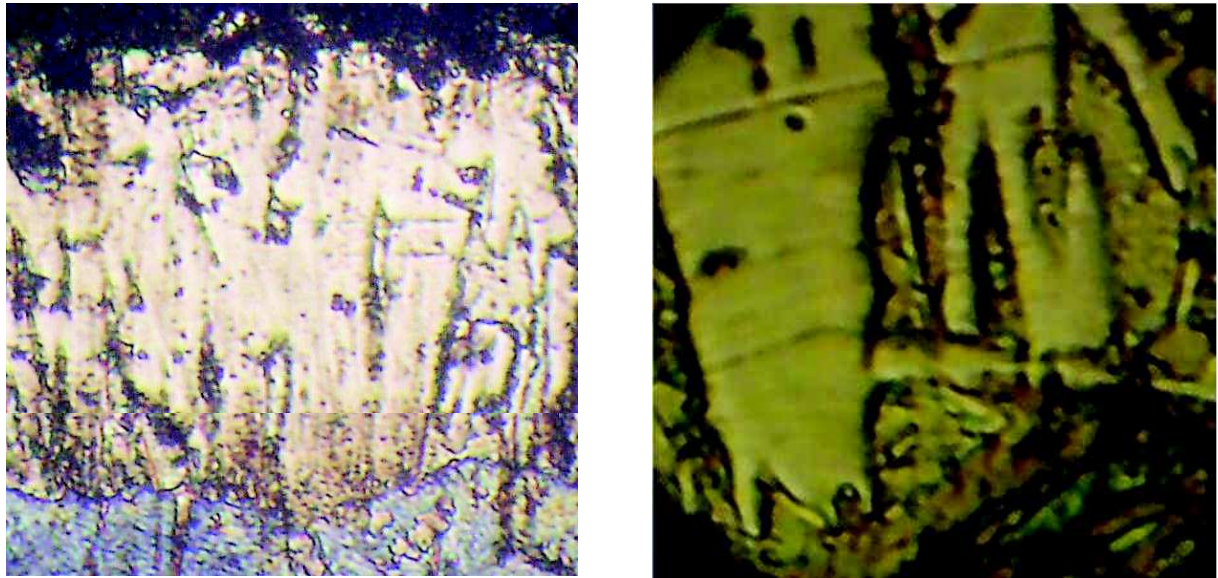
б



в



г



д е
Рис. 1 – Мікроструктури сталі 38X2МЮА після борування протягом 2 год при температурах: а–800 °С; б–850 °С; в–900 °С; г–950 °С; д–1000 °С при 200 крат та е–950 °С при 1600 крат

Склад і властивості перехідної зони зумовлюють міцність зв'язку борованого шару з основним металом, від чого залежить схильність борованого шару до сколювання. Від складу і властивості перехідної зони залежать утворення і розвиток втомних тріщин; продавлювання шару при високих контактних напруженнях та ін., що визначає працездатність борованих деталей.

За експериментальними даними отримано залежність товщини боридів від температури борування для сталі 38X2МЮА (рис. 2). Тривалість борування дорівнювала 120 хв, температура змінювалась від 800 до 1000 °С з шагом 50 °С. Товщина боридів з підвищенням температури збільшується по формулі отриманої апроксимацією експериментальних даних поліномом другого ступеню:

$$h = 2,5 \cdot t^2 + 2,5 \cdot t + 15, \quad (1)$$

де h – товщина боридів, мкм;

t – температура борування, °С.

Достовірність отриманої апроксимації (R^2) дорівнює одиниці. Це означає, що модель (1) адекватна у діапазоні 800–1000 °С.

Твердість поверхневого шару не залежить від температури борування та ступіня легування сталі (рис. 3). Це і зрозуміло, оскільки твердість самих боридів (FeB, Fe₂B), які є основними фазами боридних шарів від вмісту вуглецю і легувальних елементів майже не залежить. Мікротвердість підтверджує наявність двох боридів, а саме FeB з твердістю 22 ГПа і Fe₂B – 18 ГПа. Висока міцність бориду пояснюється

складним типом зв'язку в цих з'єднаннях. Наявність єдиного 2р-електрона на зовнішній орбіті атома бору не тільки збільшує міцність зв'язку між атомами бору і металу, але і зумовлює наявність ковалентного зв'язку між атомами бору. Атоми бору зв'язані між собою в ланцюжки FeB.

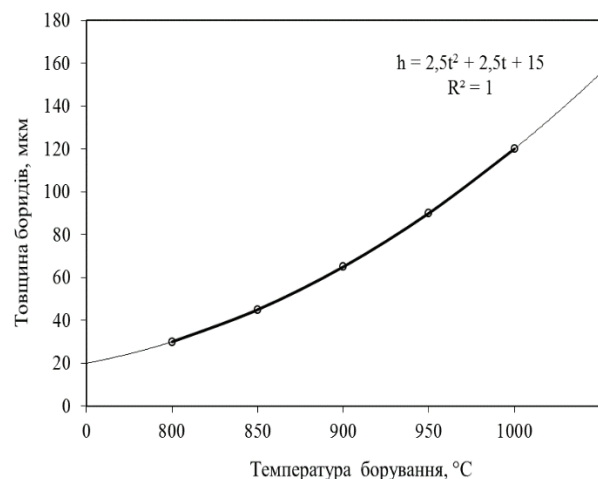


Рис. 2 – Залежність товщини боридів від температури борування сталі 38X2МЮА

Характер кривих (рис. 3) при температурах борування 800–900 °С однаковий, але товщина боридного шару збільшується від 30 до 65 мкм відповідно. При подальшому підвищенні температури обробки, характер кривих стає більш пологим в порівнянні з попередніми кривими, боридний шар збільшується до 120 мкм (при температурі борування

1000 °С). Усі криві мають дві горизонтальні ділянки, які відповідають боридам Fe₃B, твердість якого 22 ГПа та Fe₂B – 18 ГПа. Чим більша температура борування сталі 38Х2МЮА, тим більша товщина борованого шару. Поверхнева твердість при зміні температури процесу не змінюється.

Таким чином, для спрощення технологічного процесу пропонується поєднати борування з гартуванням для сталі 38Х2МЮА. Тобто оптимальним режимом борування для сталі 38Х2МЮА є температура 950 °С та тривалість 120 хв. При такій температурі формується достатній шар боридів (90 мкм) та у перехідній зоні немає окремих боридів по границях зерен, як при температурі 1000 °С, які можуть зіграти негативну роль при експлуатації виробу та призвести до крихкого руйнування по границям зерен.

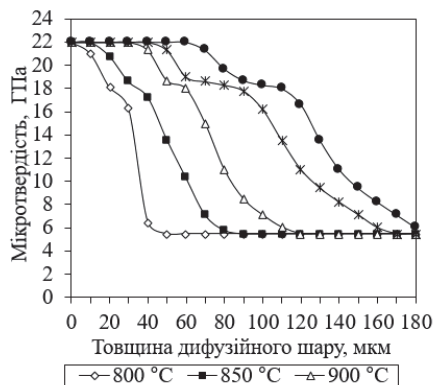
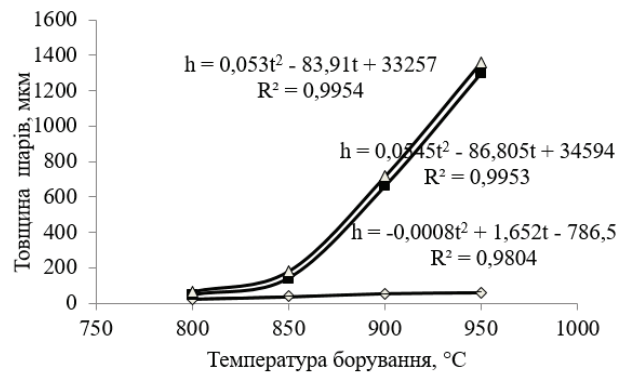


Рис. 3 – Розподіл мікротвердості в дифузійних шарах сталі 38Х2МЮА після борування

Після комплексного насичення поверхні сталі атомарними вуглецем при цементації та атомарним бором при боруванні отримано залежність глибини дифузійного шару від температури при різних ХТО за режимами (рис. 4), які приведені в табл. 3.

Висока мікротвердість борованого шару не поступається мікротвердості загартованої середньовуглецевої сталі. Це дозволяє застосовувати борування для підвищення зносостійкості виробів. При підвищенні температури ХТО характер кривих стає більш пологим в порівнянні з попередніми кривими (рис. 5). Товщина борованого шару досягає 1360 мкм. Також з підвищенням температури комплексної ХТО зона боридів і перехідна зона з карбідами та карбоборидами значно збільшується. Така зміна мікроструктури показана на рис. 6. Як видно, оптимальним режимом ХТО (борування після цементації) являється температура 950 °С, при якій забезпечуються висока поверхнева твердість, зносостійкість, корозійна стійкість з великою перехідною зоною, яка приводить до уникнення крихкого руйнування поверхневого шару.



1 – боридний шар, 2 – карбідний шар, 4 – загальний дифузійний шар

Рис. 4 – Залежність глибини дифузійного шару від температури при різних режимах комплексної ХТО

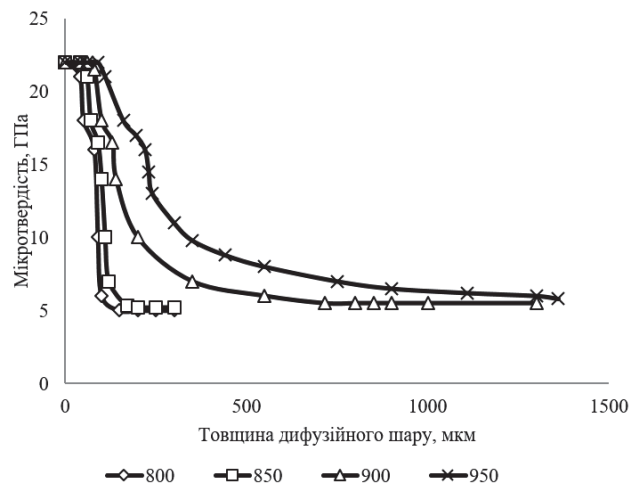


Рис. 5 – Розподіл мікротвердості залежно від температури після комплексної ХТО

Для проведення поверхневого насичення сталі необхідно створити напрямлений дифузійний потік атомів насичуючих елементів з поверхні в глибину зразка, що можливе за одночасним протіканням трьох процесів: утворення вільних атомів насичуючого елементу на поверхні зразка, адсорбції атомів насичуючого елементу, дифузії адсорбованого елементу в глибину зразка.

Висока зносостійкість боридних шарів проявляється в умовах рідинного граничного тертя та тертя без змащуючого матеріалу при коченні, ковзанні та при абразивному зношуванні. Зносостійкість боридних шарів знаходиться практично на одному рівні зі зносостійкістю карбідних шарів та твердих сплавів. Проте боридні шари перевершують по товщині карбідні шари та можуть бути отримані на будь-яких металічних матеріалах, тому їх використання більш ефективне. У відношенні до твердих сплавів борвані сталі інструменти значно економічніші, а за рахунок основи ці інструменти

проявляють працездатність при ударних навантаженнях [17].

Коефіцієнт дифузії бору в загальному вигляді можна записати:

$$D_B = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

де R – газова стала, Дж/моль·К;

D_0 – коефіцієнт дифузії при нескінченно великій температурі, $\text{см}^2/\text{с}$;

Q – енергія, яку необхідно затратити в процесі дифузії з одного положення рівноваги в кристалічній ґратці в інше, кал/г·атом.

Температурна залежність коефіцієнту дифузії в γ -залізі описується наступним виразом:

$$D_B^{\gamma} = (5,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{23 \pm 4}{RT}\right), \text{см}^2/\text{с} \quad (3)$$

Глибина дифузійного шару бору розраховується по формулі:

$$x = \sqrt{2D_B\tau}; \quad (4)$$

Звідси випливає, що:

$$x^2 = 2D_B\tau; \quad (5)$$

Тоді, коефіцієнт дифузії бору розраховується по формулі:

$$D_B = \frac{x^2}{2\tau}; \quad (6)$$

$$\tau = 2 \text{ год} = 2 \cdot 3600 = 7200 \text{ с};$$

$$D_B^{800} = 0,04 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}; \quad D_B^{850} = 0,095 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с};$$

$$D_B^{900} = 0,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}; \quad D_B^{950} = 0,25 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с};$$

З отриманих даних видно, що зі збільшенням температури насичення, коефіцієнт дифузії зростає (рис. 6).

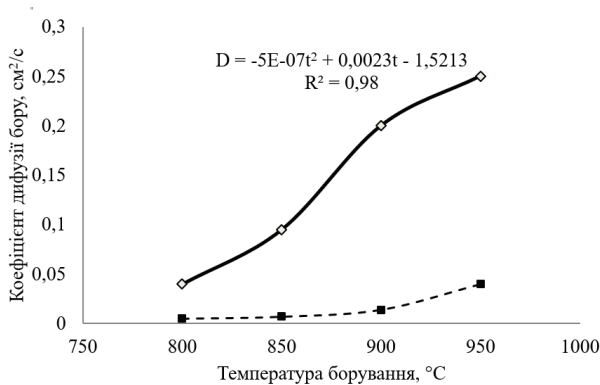


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта дифузії бору сталі 38Х2МЮА від температури після кожної ХТО

Висновки

1. Поверхнєве двошарове зміцнення сталі 38Х2МЮА при послідовну насиченні атомарним вуглецем (при цементації) та атомарним бором (при пічному боруванні) при різних температурах, дозволило сформувати боридний шар з перехідною зоною.

2. Отримана перехідна зона дозволяє підвищити експлуатаційні властивості деталей машин та інструменту за рахунок зменшення мікрокрихкості дифузійного шару.

3. Обрано оптимальний режим комплексної ХТО, який включає цементацію при 950 °С протягом 2 годин, борування при 950 °С протягом 2 годин для отримання найбільшої поверхнєвої твердості 22 ГПа з максимальним загальним дифузійним шаром 1,4 мм.

4. Отримано математичні моделі формування дифузійних шарів та зміну коефіцієнту дифузії бору після комплексного насичення атомарним вуглецем та бором, які дозволяють прогнозувати необхідні властивості поверхнєвих шарів легованої сталі від температури ХТО.

Список літератури

1. Czerwinski, F. Thermochemical Treatment of Metals / F. Czerwinski // *Heat Treatment – Conventional and Novel Applications*. – 2012. – P. 73–112. – doi: 10.5772/51566.
2. Kulka, M. Microstructure and properties of borocarbonized and laser-modified 17CrNi6–6 steel / M. Kulka, N. Makuch, A. Pertek, A. Piasecki // *Optics and Laser Technology*. – 2012. – Vol. 44, Issue 4. – P. 872–881. – doi: 10.1016/j.optlastec.2011.11.016.
3. Aghaie-Khafri, M. A study of chromo-boronizing on DIN 1.2714 steel by duplex surface treatment / M. Aghaie-Khafri, M. Mohamadpour // *Journal of Metals*. – 2012. – Vol. 64, Issue 6. – P. 694–701. – doi: 10.1007/s11837-012-0337-x.
4. Kartal, G. Investigating the morphology and corrosion behavior of electrochemically borided steel / G. Kartal, O. Kahvecioglu, S. Timur // *Surface and Coating Technologies*. – 2006. – Vol. 200, Issue 11. – P. 3590–3593. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.210.
5. Веропаха, Н. В. Влияние жидкостного борирования на износо- и коррозионную стойкость длинномерных изделий / Н. В. Веропаха, Д. Н. Веропаха, А. В. Скориков и др. // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. Спец. вып.: Актуальные проблемы машиностроения*. – 2006. – С. 20–21.
6. Алиев, А. А. Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности / А. А. Алиев, В. П. Булгаков, Б. С. Приходько // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. – 2005. – № 2. – С. 91–94.
7. Stergioudis, G. Formation of boride layers on steel substrates / G. Stergioudis // *Crystal Research and Technology*. – 2006. – Vol. 41, Issue 10. – P. 1002–1004. – doi: 10.1002/crat.200610711.
8. Saduman, S. An approach to kinetic study of borided steels / S. Saduman, S. Ugur, B. Cuma // *Surface and Coating*

- Technologies*. – 2005. – Vol. 191, Issue 2–3. – P. 274–285. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.03.040.
9. **А. с. 1216249 СССР**, МПК7 С 23 С 8/70. Состав обмазки для борирования стальных изделий / **Шашина Л. Т., Махаров Д. М.** (СССР). – № 3793701/22–02; заявл. 24.09.84; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9.
 10. **Idan, A. F. I.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / **A. F. I. Idan, O. Akimov, L. Golovko, O. Goncharuk, K. Kostyk** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 69-73. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65455.
 11. **Mohanad, M. K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / **M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Domin, & K. Kostyk** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 45-49. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454.
 12. **А. с. 1712462 СССР**, МПК7 С 23 С 8/70. Порошкообразный состав для борирования стальных изделий / **Г. И. Янцен, В. И. Астащенко, Е. И. Сергеева** (СССР). – № 4792103/02; заявл. 13.02.90; опубл. 15.02.92, Бюл. № 6.
 13. **Патент України №33654**, Склад для борування сталевих виробів. МПК8 С 23 С 8/00 / **О. О. Павлюченко, В. О. Костик, К. О. Костик** – № u200800226; заявл. 04.01.08; опубл. 10.07.08, Бюл. № 13.
 14. **Костик, К. О.** Зміцнення прес–форм лиття під тиском по нанотехнології / **К. О. Костик** // *Машинобудування*. – 2013. – № 12. – С. 113–118.
 15. **Хартман, К.** Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / **К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер**. – М.: Мир. – 1977. – 552 с.
 16. **Seraya, O. V.** Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data / **O. V. Seraya, D. A. Demin** // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2012. – Vol. 44, Issue 7. – P. 34–48. – doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40.
 17. **Костик, К. О.** Development of the high-speed boriding technology of alloy steel // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – Т. 6. – №. 11 (78). – С. 8-15. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015.
 18. **Костик, К. О.** Моделирование глубины боридного шару сталі 4Х5МФС при зміні тривалості борування по нанотехнології / **К. О. Костик, В. О. Костик** // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ"* : зб. наук. пр. Темат. вип. : *Механіко-технологічні системи та комплекси*. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 40 (1083). – С. 145-149.
- .Bibliography (transliterated)**
1. **Czerwinski, F.** Thermochemical Treatment of Metals. *Heat Treatment – Conventional and Novel Applications*, 2012, 73–112, doi: 10.5772/51566.
 2. **Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., Piasecki, A.** Microstructure and properties of borocarbured and laser-modified 17CrNi6–6 steel. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44** (4), 872–881, doi: 10.1016/j.optlastec.2011.11.016.
 3. **Aghaie–Khafri, M. Mohamadpour, M.** A study of chromo-boronizing on DIN 1.2714 steel by duplex surface treatment. *Journal of Metals*, 2012, **64** (6), 694–701, doi: 10.1007/s11837–012–0337–x.
 4. **Kartal, G., Kahvecioglu, O., Timur, S.** Investigating the morphology and corrosion behavior of electrochemically borided steel. *Surface and Coating Technologies*, 2006, **200** (11), 3590–3593, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.210.
 5. **Veropaha, N. V., Veropaha, D. N., Skorikov, A. V. et. al.** Vliyanie zhidkostnogo borirovaniya na iznos– i korrozionnuju stojkost' dlinnomernyh izdelij [Influence of liquid boriding on the wear and corrosion resistance of long products]. *Izvestiya vuzov. Severo–Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki, Spec. vyp.: Aktual'nye problemy mashinostroenija [Proceedings of the universities. North-Caucasian region. Series: Engineering. Recent engineering problems]*, 2006, 20–21.
 6. **Aliev, A. A., Bulgakov, V. P., Prihod'ko, B. S.** Diffuzionnoe borirovanie stali i sherohovatost' poverhnosti [Diffusion boriding of steel and surface roughness]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta [Journal of Astrakhan State Technical University]*, 2005, **2**, 91–94.
 7. **Stergioudis, G.** Formation of boride layers on steel substrates. *Crystal Research and Technology*, 2006, **41** (10), 1002–1004, doi: 10.1002/crat.200610711.
 8. **Saduman, S., Ugur, S., Cuma, B.** An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coating Technologies*, 2005, **191** (2–3), 274–285, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.03.040.
 9. **Shashina, L. T., Maharov, D. M.** (1986). Certificate of authorship 1216249 SSSR, MPK7 С 23 С 8/70. Sostav obmazki dlja borirovaniya stal'nyh izdelij [Composition of pack boriding for steel products] (SSSR). 3793701/22–02; declared 24.09.84, № 9.
 10. **Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**(5 (80)), 69-73, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65455.
 11. **Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., & Kostyk, K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**(5 (80)), 45-49, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454.
 12. **Jancen, G. I., Astashhenko, V. I., Sergeeva, E. I.** (1992). Certificate of authorship 1712462 SSSR, MPK7 С 23 С 8/70. Poroshkoobraznyj sostav dlja borirovaniya stal'nyh izdelij [The powdered composition boriding of steel products] (SSSR). 4792103/02; declared 13.02.90, № 6.
 13. **Pavluchenko, O. O., Kostik, V. O., Kostik, K. O.** (2008). Sklad dlja boruvannja stalevyh vyrobiv [Composition for Boriding steel products]. Patent of Ukraine №33654, МПК8 С 23 С 8/00. № u200800226; declared 04.01.08; published 10.07.08, № 13.
 14. **Kostyk, K. O.** Zmicnennja pres–form lyttja pid tyskom po nanotehnologii' [Strengthening of molds for injection molding nanotechnology]. *Mashynobuduvannja*, 2013, **12**, 113–118.
 15. **Hartman, K., Leckij, Je., Shefer, V.** Planirovanie jeksperimenta v issledovanii tehnologicheskikh processov [Experimental Design in the research of technological processes]. Moscow: Mir, 1977, 552 p.
 16. **Seraya, O. V., Demin, D. A.** Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2012, **44** (7), 34–48. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40.
 17. **Kostyk, K. O.** Development of the high-speed boriding technology of alloy steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **6**(11 (78)), 8-15, doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015.
 18. **Kostyk, K. O., Kostyk, V. O.** Modelyuvannya glibini boridnogo sharu stali 4Kh5MFS pri zmini trivalosti

boruvannya po nanotekhnologii [Simulation depth borydnoho layer steel 4H5MFS by changing the length Boriding on nanotechnology]. *Visnik Nats. tekhn. un-tu "KhPI"* : zb. nauk. pr. Temat. vip.: Mekhaniko-tehnologichni

sistemi ta kompleksi. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, **40** (1083), 145-149.

Відомості про авторів (About authors)

Костик Катерина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна, e-mail: eklitus@gmail.com.

Kateryna Kostyk – Candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: eklitus@gmail.com.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Костик, К. О. Поверхневе двошарове зміцнення сталі при послідовному насиченні вуглецем та бором в порошкових макро- та нанодисперсних середовищах / **К. О. Костик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 54-63. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.09.

Please cite this article as:

Kostyk, K. Double-layered surface hardening of steel in successive saturation of carbon and boron in powdered macro and nanoscale environments. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 54–63, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.09.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Костик, Е. А. Поверхностное двухслойное упрочнения стали при последовательном насыщении углеродом и бором в порошковых макро - и нанодисперсных средах / **Е. А. Костик** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 54-63. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.09.

АННОТАЦИЯ Целью работы является укрепление поверхностных слоев сталей методами КТО в порошковых макро - и нанодисперсных средах. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: разработать методы КТО в новых порошковых средах; установить оптимальные режимы; рассчитать эффективные коэффициенты диффузии насыщающих элементов в сталях. В работе использованы оптическая и электронная микроскопия, измерение микротвердости, обработка результатов статистическими методами. Поверхностное двухслойное упрочнения стали 38Х2МЮА при последовательном насыщении атомарным углеродом (при цементации) и атомарным бором (при печном борировании) при различных температурах, позволило сформировать боридный слой с переходной зоной. Полученная переходная зона позволяет повысить эксплуатационные свойства деталей машин и инструмента за счет уменьшения микрохрупкости диффузионного слоя. Выбран оптимальный режим комплексной КТО, который включает цементацию при 950 °С в течение 2 часов, борования при 950 °С в течение 2 часов для получения наибольшей поверхностной твердости 22 ГПа с максимальным общим диффузионным слоем 1,4 мм. Получены математические модели формирования диффузионных слоев и изменение коэффициента диффузии бора после комплексного насыщения атомарным углеродом и бором, которые позволяют прогнозировать необходимые свойства поверхностных слоев легированной стали от температуры.

Ключевые слова: химико-термическая обработка; легированная сталь; глубина диффузионного слоя; микротвердость поверхности, диффузия

Поступила (received) 09.11.2016