

Література

1. Пульцин, М. Н. Титановые сплавы и их применение в машиностроении [Текст] / М. Н. Пульцин. – М. : Машгиз, 1962. – 167 с.
2. Глазунов, С. Г. Конструкционные титановые сплавы [Текст] / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – М. : Металлургия, 1974. – 368 с.
3. Колачев, Б. А. Физические основы разрушения титана [Текст] / Б. А. Колачев, А. В. Мальков. – М. : Металлургия, 1983. – 160 с.
4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [Текст] : справ. / под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981. – 420 с.
5. Способ модификации поверхности титановых сплавов. Патент РФ МПК C23C14/48 [Текст] / Гусева М. И., Смыслов А. М., Сафин Э. В., Измайлова Н. Ф. – № 2117073; заявл. 08.07.1997; опубл. 10.08.1998, Бюл. № 22.
6. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И. И. Аксенов, А. А. Андреев, В. А. Белоус, В. Е. Стрельницкий, В. М. Хорошин. – Киев : Наукова думка, 2012. – 727 с.
7. Картмазов, Г. Н. Коррозионно-эрозионностойкие покрытия для рабочих лопаток паровых турбин [Текст] / Г. Н. Картмазов, Ю. В. Лукирский, Г. В. Кирик, В. Г. Маринин, Ю. И. Поляков, А. А. Дейнека // Наука та інновації. – 2012. – Т. 8, № 3. – С. 17–22. doi: 10.15407/scin8.03.017
8. Васильев, В. В. Структура и механические свойства многокомпонентных покрытий на основе TiN и TiAlN, легированных Y, Re, Ni, Cr, Si, Mo [Текст] / В. В. Васильев, В. И. Коваленко, А. А. Лучанинов, В. Г. Маринин, Е. Н. Решетняк, В. Е. Стрельницкий, Г. Н. Толмачев // Актуальные проблемы прочности: тез. докл. 55 Междунар. конф. – Харьков, 2014. – С. 140.
9. Коваленко, В. И. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікро ударному діянні [Текст] / В. И. Коваленко, В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. Серия ФРП и РМ. – 1998. – Вып. 5 (71). – С. 83–85.
10. Коваленко, В. И. Исследование стойкости к эрозии поверхностных слоев сталей при воздействии кавитации [Текст] / В. И. Коваленко, Л. И. Мартыненко, В. Г. Маринин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 5 (74). – С. 23–27. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40196
11. Маринин, В. Г. Взаємозв'язок кавітаційної стійкості та мікротвердості покриттів [Текст] / В. Г. Маринин // Вопросы атомной науки и техники. Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2009. – Вып. 6 (64). – С. 181–183.

Розроблена проста для використання та енергетично доцільна нанотехнологія борування деталей з легованої сталі 30ХГСА, яка скорочує тривалість обробки при одержанні високоякісних боридних шарів. Виконана математична обробка результатів дозволяє визначати конкретні температуру та тривалість борування виходячи з заданої глибини шару боридів. Розрахунок коефіцієнту дифузії бору підтвердив прискорення процесу у 3 рази

Ключові слова: борування, сталь, дифузійні шари, мікротвердість, глибина шару, математична модель, номограма

Разработана простая для использования и энергетически целесообразная нанотехнология борирования деталей из легированной стали 30ХГСА, которая сокращает продолжительность обработки при получении высококачественных боридных слоев. Выполненная математическая обработка результатов позволяет определять конкретные температуру и длительность борирования исходя из заданной глубины слоя боридов. Расчет коэффициента диффузии бора подтвердил ускорение процесса в 3 раза

Ключевые слова: борирование, сталь, диффузионные слои, микротвердость, глубина слоя, математическая модель, номограмма

УДК 621.785.53

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55015

РОЗРОБКА ШВИДКІСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БОРУВАННЯ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

К. О. Костик

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра ливарного виробництва
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21,
м. Харків, Україна, 61002
E-mail: eklitus@yandex.ru

1. Вступ

Одним з найефективніших засобів підвищення терміну служби деталей машин є їх поверхневе зміцнення, яке значно підвищує зносостійкість, міцність, опір деталі руйнуванню.

В наш час відомі різні методи поверхневого зміцнення: поверхнева термічна обробка, механічне зміцнення (наклеп), електроіскрова обробка, наплавка, наварка і різні види хіміко-термічної обробки.

Широко застосовуються в промисловості такі види хіміко-термічної обробки, як цементация, азотування та борування. Основним недоліком традиційних методів є значна тривалість процесів та необхідність у використанні спеціального складного обладнання [1].

Одним з актуальних питань є розробка нових швидкісних методів борування. Вирішення цього питання сьогодні досягається використанням методів борування при індукційному, іонно-плазмовому, лазерному нагріванні та у віброкиплячому шарі, що дозволяє

скоротити час ціною застосування дорогого та складного обладнання і великих енерговитрат.

Існуючі середовища для буровання в обмазках та порошкоподібних сумішах прискорюють процес в незначній мірі, хоча і не потребують спеціального обладнання.

Тому на сьогодні актуальним є розробка простої для використання та енергетично доцільної технології буровання та пошук нового насичувального середовища, яке дозволить значно скоротити тривалість хіміко-термічної обробки при одержанні високоякісних боридних шарів.

2. Аналітичний огляд та постановка задачі

В промисловості використовують три основні методи буровання:

- в твердих середовищах (в обмазках (пастах) або порошкоподібних сумішах);

- в рідких середовищах (буровання в розчині електролітів і буровання в металевих і сольових розплавах (безелектролізне));

- в газоподібних середовищах (буровання в середовищі боранів і галогенідів).

Буровання в твердих середовищах [2] доцільно розділити на процес насичення в порошках елементного (аморфного або кристалічного) бору, порошках сплавів (наприклад, феросплавах), хімічних сполук бору (бориди) і в порошкових сумішах на основі оксиду бору (B_2O_3) з доданням відновника (металотермічний метод). Буровання в твердих середовищах відбувається при високих температурах (900–1000 °C) і потребує тривалої витримки (до 6–10 год). Виготовлення робочої суміші, упакування та распакування ящиків – трудомісткі ручні операції.

Також існують різні методи нагрівання при бурованні, такі як іонно-плазмове, лазерне, буровання при індукційному нагріві, у віброкиплячому шарі та ін.

Буровання в обмазках займає проміжне положення між бурованням в твердих і рідких середовищах. Залежно від складу обмазки, температури процесу і способу нагрівання цей метод буровання наближається до одного з них. Розрізняють буровання в умовах швидкісного електронагрівання, повільного (зазвичай пічного) нагрівання і буровання в енерговиділяючих пастах. Найбільше використання знаходять перші два способи. У разі використання пічного нагріву активні обмазки слід оберігати від окиснення. Консистенція пасти визначається в основному вибраною технологією її нанесення на деталі: пульверизацією, зануренням, кистю шаром 1,5–2,5 мм. Після нанесення кожного шару пасти виробу просушують на повітрі (при 20 °C, 10–15 год) або в сушильній шафі (при 100–250 °C, 0,5–2,0 год). Підготовлені таким чином виробу можна нагрівати будь-яким способом [3].

Буровання в порошкоподібних сумішах переважно здійснюється в герметичних контейнерах. При цьому способі швидкість формування шару вища, а виснажувальність сумішей менша. З відомих в даний час насичувальних середовищ для твердого буровання найбільший інтерес представляють порошкові суміші на основі технічного карбиду бору або металотермічні суміші. Перед використанням всі компоненти порошкових насичувальних середовищ просушують і подрібнюють, карбід бору необхідно додатково прогріти при 300–500 °C протягом 1–5 год. З метою підвищення

насичувальної здатності складу окрім карбиду бору додають ще й активатори.

Електролізне буровання проводять в розплаві бури [4]. У ряді випадків в буру додають нейтральні солі ($NaCl$ та ін.). В розплав занурюють зібрані на пристрої деталі, заздалегідь просушені над дзеркалом ванни. При електролізі деталі є катодом, густина току 0,08–0,25 А/см². Зазвичай буровання проводять при 850–1050 °C протягом 2–10 годин, що дозволяє отримати шар боридів 20–240 мкм. По закінченні процесу буровання струм електролізу відключають, деталі витягують з розплаву і піддають безпосередньо гартуванню або охолодженню на повітрі. Деталі відмивають від залишків бури в киплячій воді. Для прискорення цього процесу іноді застосовують ультразвук. Недоліком процесу є швидкий вихід з ладу тиглів, велика витрата бури, а також швидке вичерпання та зменшення її активності. Негативною стороною процесу є агресивність розплавленої бури, яка чинить сильну роз'їдаючу дію на метал.

Рідинне (безелектролізне) буровання [5] проводять в розплавах нейтральних (без бору) солей з додаванням речовин, які містять бор (B , B_4C та ін.); в розплавах боратів з введенням B , B_4C , феробору і ін.; в розплавах боратів з доданням хімічно активних металів (Ca , Al , Ti і ін.) або металургійних розкислювачів (феромарганцю, феросиліцію, силікокальцію, силікомарганцю і ін.). Найперспективнішими для промислового використання є розплави останнього типу, тобто розплави на основі боратів лужних і лужноземельних металів. Насичення проводять при 850–1050 °C протягом 2–10 год.

Газове буровання здійснюється в газах, які містять бор (B_2H_6 і BCl_3), розбавлених газами, що не містять бору (воднем, аргонем, очищеним азотом, аміаком). Інакше на стінках реактора і на деталях відкладається шар елементного бору, і швидкість буровання зменшується. При заміні водню азотом або аміаком швидкість процесу знижується, проте зменшується його вибухонебезпека, тому така заміна доцільна. Істотно впливають на результати газового буровання швидкість подачі газу і його тиск в реакторі, а також хімічний склад сталі. Режим буровання призначають, виходячи з необхідної товщини шару, наприклад, для отримання дифузійних шарів 0,15–0,2 мм на середньовуглецевих сталях буровання проводять при температурі 800–860 °C протягом 5–6 год. Недоліком процесу є токсичність, вибухонебезпека і використання складного спеціального газового обладнання.

При насиченні в пастах часто використовується нагрівання струмами високої частоти. Це дозволяє значно скоротити час, затрачений на нагрів виробів. Процес дифузії бору при нагріванні сталі СВЧ протікає зі швидкістю 0,03–0,05 мм/хв, структура і властивості дифузійних шарів аналогічні тим, що утворюються в умовах нагріву в печі при бурованні в розплавах. При цьому можна варіювати швидкість нагрівання у широких межах, не змінюючи структури і властивостей борованого шару. Вигідніше застосовувати велику швидкість нагрівання, оскільки це приводить до прискорення процесу насичення.

Вибір методу буровання диктується його технологічністю, обладнанням, яке є на виробництві, конфігурацією, розмірами, умовами роботи і ступенем досягнутого підвищення стійкості зміцнюваних виробів. У масовому виробництві обробка нескладних виробів, середніх за розмірами виробів переважно здійснюється електролізним і газовим бурованням. При обробці дрібних

складних за конфігурацією виробів доцільніше рідкий або порошковий методи борування. Порошковий метод більш прийнятний, якщо зміцнювані вироби не вимагають подальшої термообробки. Крупногабаритні вироби, особливо при необхідності їх місцевого борування або поєднання борування з термічною обробкою, доцільно насичувати в обмазках (в пастах).

Для запобігання відшарування або відколювання боридного шару необхідно забезпечити його добру адгезію з матрицею основного металу.

Дуже висока твердість шару утруднює подальшу механічну обробку, і у багатьох випадках вона не потрібна. Якщо подальша механічна обробка все ж таки необхідна, використовують алмазний інструмент і шліфувальні круги з корундом, карбідом кремнію.

Як і для всіх дифузійних процесів, для формування бориду характерне збільшення об'єму. Зміна розмірів визначається, перш за все, товщиною шару і вживаними матеріалами. Зазвичай спостерігається збільшення розмірів на 20–25 % від глибини шару. Для високолегованих сталей ця зміна значно більша і досягає 80 % від глибини шару [7].

Корозійна стійкість нелегованих або малолегованих сталей при боруванні поліпшується. Наприклад, якщо деталі помістити у 18 %-вий розчин соляної кислоти, відбувається практично повне розчинення основного металу, сам же борований шар залишається непошкодженим.

Відомо [8], що службові властивості борованих виробів залежать головним чином від товщини, структури і властивостей боридної зони. Проте, істотний вплив на працездатність борованих деталей надає і перехідна зона. Зокрема її товщина, хімічний склад і структура визначають характер розподілу залишкових напружень, міцність зв'язку борованого шару з основним металом, схильність його до сколювання, умови створення і розвитку втомних тріщин, можливість продавлювання шару та ін. Тому вплив структури перехідної зони на вказані властивості слід враховувати при виборі сталей і призначенні режиму насичення.

3. Мета та задачі дослідження

Боровані леговані сталі застосовуються для виготовлення деталей технологічного призначення. Поверхнєве насичення бором сталі 30ХГСА проводиться з метою підвищення зносостійкості деталей складної конфігурації. Метою роботи є розробка простої для використання та енергетично доцільної нанотехнології борування деталей з легованої сталі, яка спрямована на скорочення тривалості хіміко-термічної обробки при одержанні високоякісних боридних шарів, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Для досягнення поставленої мети були вирішувалися наступні задачі:

- вивчити вплив температури та тривалості розробленої технології борування на ріст глибини шару боридів та поверхнєву твердість;

- отримати математичну модель та номограму залежності глибини шару боридів одночасно від зміни температури та тривалості обробки;

- знайти ефективний коефіцієнт дифузії бору для легованої сталі 30ХГСА для підтвердження прискорення процесу борування за розробленою технологією.

4. Матеріал дослідження, технологічні режими проведення борування та методики проведення досліджень

4. 1. Досліджуваний матеріал та технологічні режими борування

Матеріалом дослідження є легована сталь 30ХГСА.

Борування здійснювали у пасті. Як відмічалось раніше, основним і суттєвим недоліком традиційних методів борування є тривалість процесу 2–10 годин. Для прискорення процесів використовують порошкові суміші, наприклад:

- 1) 40–90 % аморфного бору, 10–60 % емалі типу ЕВТ. Для отримання однорідної пасти суміш розводять водою [9];

- 2) 45–65 % карбіду бора, 4–7 % фтористого натрію, 20–25 % залізної окалини, 4–8 % графіту, 7–15 % доломіту $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ [10].

Недоліком першого складу суміші для борування сталевих виробів є відсутність активаторів дифузійних процесів, внаслідок чого час борування залишається достатньо великим – більше 4 годин. Крім цього, після нанесення обмазки необхідно виконання сушки виробів при 800 °С, що ускладнює технологічний процес і призводить до додаткової витрати електроенергії та потребує додаткового термічного обладнання. Основним і суттєвим недоліком другого складу є присутність кисню в залізній окалині та в складі доломіту, складність приготування суміші через велику кількість компонентів, обов'язкова герметизація контейнера. При цьому, тривалість процесу насичення становить не менше 8 годин.

Нами запропонована нова суміш для прискорення процесів насичення поверхні металу бором на основі нанодисперсної боровмісної речовини. На підготовлені зразки наносили шар пасти з суміші, яка містить 80–86 % нанодисперсного полібориду магнію (рис. 1), 7–10 % фтористого літію і 7–10 % фтористого натрію, товщиною до 3 мм [11]. Нагрівання здійснювали в камерній печі тривалістю від 15 до 120 хвилин при зміні температури від 800 до 900 °С [12].

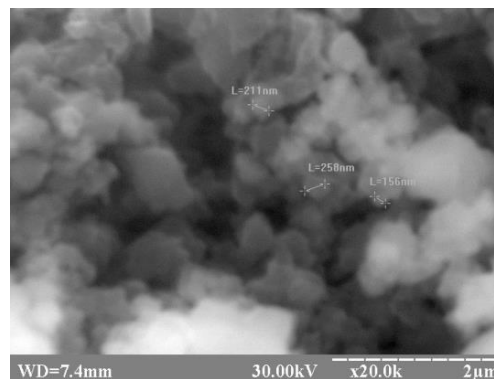


Рис. 1. Електронна мікроскопія полібориду магнію

4. 2. Методи дослідження структур і властивостей борованих шарів на сталі

Мікроструктуру та товщину дифузійних шарів досліджували методом оптичної мікроскопії на мікроскопі МІМ-8 за стандартною методикою при різних збільшеннях.

За товщину борованого шару, в яку входять бориди та перехідна зона, приймали відстань зміни мікротвердості від поверхневих значень до твердості серцевини.

Мікротвердість зразків визначали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50, 100 г і витримці 7–15 с за стандартною методикою (ГОСТ 9450–76).

5. Експериментальні дані та їх обробка

При насиченні сталі 30ХГСА бором утворюються хімічні сполуки бору із залізом FeB і Fe₂B, так звані бориди. При утворенні борованого шару спочатку від поверхні углуб 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. Мікроструктури борованих шарів за різними режимами наведені на рис. 2.

Борування при пічному нагріві з паст забезпечує отримання твердості поверхні в межах 22–20 ГПа. Твердість серцевини і товщина шару коливається залежно від швидкості охолодження. В зоні борованого шару твердість знижується від 22 ГПа до 16–15 ГПа, що пов'язано зі зміною фазового складу самого шару, тобто окрім бориду FeB і Fe₂B з'являються карбіди і бориди легувальних елементів сталей. Не зважаючи на дуже високу твердість, борид володіє меншою крихкістю, ніж карбіди.

Висока міцність бориду пояснюється складним типом зв'язку в цих сполуках. Наявність єдиного 2p-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.

Зі збільшенням часу витримки ХТО від 15 до 90 хв при пічному нагріві до температури гартування 850 °С легованої сталі боридний шар росте (рис. 2, а–в). Причому зростання борованого шару швидшає від 60 хв і більше. Зміна часу борування приводить до збільшення загальної глибини дифузійного шару від 35 мкм (за 15 хв) до 136 мкм (за 90 хв), що значно підвищує ефект від борування і покращує експлуатаційні властивості виробів.

При підвищенні температури ХТО від 800 °С до 900 °С при витримці 60 хвилин сталі 30ХГСА спостерігається ріст боридного шару, причому зростання борованого шару швидшає при 850 °С та більше. Це пов'язано з тим, що при збільшенні температури підвищується швидкість дифузії (рис. 2, в–д).

Зі збільшенням температури борування збільшується глибина дифузійного шару загалом від 62 мкм (800 °С) до 163 мкм (900 °С), що сприятливо впливає на підвищення ефекту від борування та покращення експлуатаційних властивостей готових виробів.

Щоб скоротити час процесу борування, до чого прагне кожен виробник, як відомо, необхідно підвищувати температуру ХТО, виходячи з отримання необхідних властивостей готових виробів. Для більш детального вивчення цього питання була побудована математична модель глибини шару боридів залежно від температури та часу зміцнювальної обробки.

В якості вхідних змінних вибиралися температура борування (x_1^*), яка змінювалась від 800 °С до 900 °С та

тривалість хіміко-термічної обробки (x_2^*) в діапазоні 15–90 хв. В якості вихідних змінних – глибина борованого шару (y). Для побудови математичної моделі, що може мати вигляд рівняння регресії [13, 14], було проведено 10 паралельних експериментів з достатньою кількістю зразків сталі в точках поза планом, на підставі яких були отримані середні значення y .

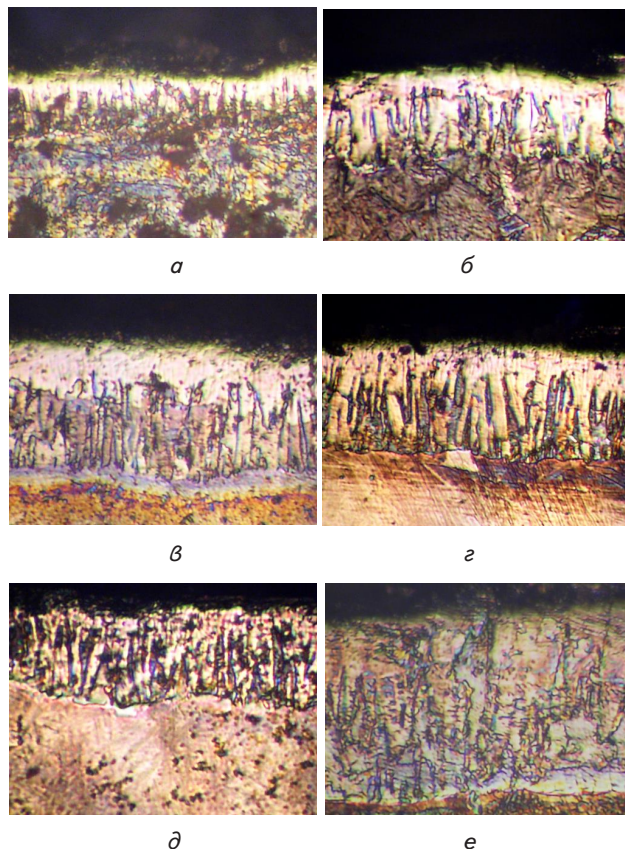


Рис. 2. Мікроструктури шару боридів сталі 30ХГСА при різних режимах обробки: а – 850 °С, 15 хв; б – 850 °С, 60 хв; в – 850 °С, 90 хв; г – 800 °С, 90 хв; д – 900 °С, 60 хв; е – 900 °С, 90 хв; $\times 400$

Враховуючи, що з даних експериментального матеріалу можна «зняти» з достатнім ступенем точності значення вхідних і вихідних змінних, для побудови рівняння регресії було реалізовано повний центральний ортогональний композиційний план другого порядку [15]. Мікроструктури деяких точок плану представлені на рис. 2. Нормування значень вхідних змінних здійснювалося за формулами:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{I_1}, \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{I_2}, \quad (2)$$

де x_1, x_2 – нормовані значення вхідних змінних, x_1^*, x_2^* – натуральні значення вхідних змінних, \bar{x}_1, \bar{x}_2 – середнє значення вхідних змінних ($\bar{x}_1 = 850, \bar{x}_2 = 52,5$), J_1, J_2 – інтервали варіювання вхідних змінних ($J_1 = 50, J_2 = 37,5$).

Математична модель представляється поліномом виду:

$$y_i = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 (x_1^2 - \beta) + a_4 (x_2^2 - \beta) + a_5 x_1 x_2, \quad (3)$$

де a_i – оцінювані коефіцієнти, β – параметр, що розраховується залежно від числа точок ядра композиційного плану 2^{n-p} , плеча «зоряних» точок α і числа точок плану за формулою:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N} \tag{4}$$

Загальний вигляд вхідних змінних для розрахунку коефіцієнтів моделі a_i наведений в табл. 1.

Таблица 1

Данні для побудови ортогонального центрального композиційного плану

Номер експеримента	x_1	x_2	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	y_{ij}
1	x_1^{\max}	x_2^{\max}	$(x_1^{\max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\max})^2 - 0,6667$	y_{i1}
2	x_1^{\min}	x_2^{\max}	$(x_1^{\max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\max})^2 - 0,6667$	y_{i2}
3	x_1^{\min}	x_2^{\min}	$(x_1^{\max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\min})^2 - 0,6667$	y_{i3}
4	x_1^{\min}	x_2^{\min}	$(x_1^{\min})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\min})^2 - 0,6667$	y_{i4}
5	x_1^{\max}	$x_2^{\text{середнє}}$	$(x_1^{\max})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\text{середнє}})^2 - 0,6667$	y_{i5}
6	x_1^{\min}	$x_2^{\text{середнє}}$	$(x_1^{\min})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\text{середнє}})^2 - 0,6667$	y_{i6}
7	$x_1^{\text{середнє}}$	x_2^{\max}	$(x_1^{\text{середнє}})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\max})^2 - 0,6667$	y_{i7}
8	$x_1^{\text{середнє}}$	x_2^{\min}	$(x_1^{\text{середнє}})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\min})^2 - 0,6667$	y_{i8}
9	$x_1^{\text{середнє}}$	$x_2^{\text{середнє}}$	$(x_1^{\text{середнє}})^2 - 0,6667$	$(x_2^{\text{середнє}})^2 - 0,6667$	y_{i9}

Коефіцієнти α_i визначені за формулами [16]:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x_i^j y^j, i = 1, \dots, n \tag{5}$$

$$a_i = c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-1}^j)^2 - \beta] y^j, i = n + 1, \dots, 2n \tag{6}$$

$$a_i = c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-1}^j)^2 - \beta] y^j, i = n + 1, \dots, 2n \tag{6}$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, \lambda = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n + 1, \dots, k \tag{7}$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{i=1}^N a_{n+i} \tag{8}$$

У формулах (5)–(8) c_1, c_2, c_3 – коефіцієнти для лінійних, квадратичних і парних взаємодій незалежних змінних відповідно, n – число лінійних членів моделі, N – кількість експериментів.

Для полінома другого ступеня виду (3) значення вказаних параметрів наведені в табл. 2.

Для оцінки точності отриманої моделі обчислювалися суми квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових, отриманих за моделлю (S_R), і оцінки дисперсії (S_R^2)

$$S_R = (Y_{\text{експ}} - Y_{\text{рач}})^2, \tag{9}$$

$$S^2 = \frac{S_R}{\phi}, \tag{10}$$

де $\phi = N - (k + 1)$ – число ступенів свободи, N – число експериментів ($N=9$), k – число оцінюваних параметрів ($k=5$).

Таблица 2

Значення параметрів ортогональних центральних композиційних планів для розрахунку коефіцієнтів моделі

N	β	c_1	c_2	c_3
9	0,6667	0,1667	0,5	0,25

Для перевірки гіпотези про адекватність використали критерій:

$$F \leq F_{\text{кр}}, \tag{11}$$

$$F = \frac{S_R^2 / \phi_1}{S_B^2 / \phi_2}, \tag{12}$$

де $F_{\text{кр}}$ – табличне значення критерію Фішера для довірчої ймовірності 95 % і відповідних чисел ступенів свободи $\phi_1 = 3$ та $\phi_2 = 9$. Якщо виконується умова (11), модель вважається адекватною, якщо $F > F_{\text{кр}}$, гіпотеза про адекватність моделі відхиляється.

Оцінка значимості коефіцієнтів моделі проводилася на основі критерія:

$$|\hat{a}_i| \geq t_{\text{кр}} s_i, \tag{13}$$

де $t_{\text{кр}}$ – критичне значення розподілу Стюдента для довірчої ймовірності 95 % і числа ступенів свободи $\phi_2 = 9$, s_i – середнє квадратичне відхилення, яке визначається з формули (10).

Отримана модель глибини шару боридів залежно від нормованих значень температури та часу зміцнювальної обробки має вигляд:

$$y = 50,88889 + 9,1685 \cdot x_1 + 23,0046 \cdot x_2 + 3,8257 \cdot x_1^2 - 8,6743 \cdot x_2^2 - 4,5 \cdot x_1 \cdot x_2. \tag{14}$$

Критерій для перевірки гіпотези про адекватність моделі, розрахований за формулою (12), дорівнює 1,96256, що менше табличного значення критерія Фішера для довірчої ймовірності 95 % і відповідних чисел ступенів свободи $\phi_1 = 3$ та $\phi_2 = 9$. Таким чином, виконується умова (11), модель вважаємо адекватною.

Оцінка значимості коефіцієнтів моделі показала (табл. 3), що усі коефіцієнти моделі (14) значимі, це доказано виконанням умови (13).

Виходячи з порівняння значень коефіцієнтів отриманої моделі (14), можна зробити висновок, що саме тривалість борування має найбільший вплив (у 2,5 рази більше ніж температура) на зростання шару боридів на сталі 30ХГСА. Таке відхилення від класичного значного впливу температури, а не часу пов'язане з чітким обмеженням температурних та часових характеристик розробленого процесу борування.

Поверхня відгуку у факторному просторі, яка описує значення вихідних змінних при різних значеннях вхідних змінних у заданій області планування, наведена на рис. 3.

Таблица 3

Результати розрахунків значень відхилення $t_{\text{кр}} s_i$ для оцінки значимості коефіцієнтів моделі

Значення відхилень $t_{\text{кр}} s_i$		
Для лінійних коефіцієнтів	Для квадратичних коефіцієнтів	Для коефіцієнтів при парній взаємодії
1,78977	3,09966	2,19179

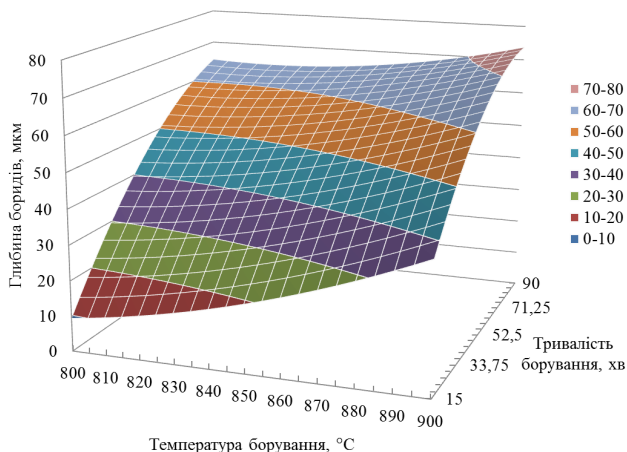


Рис. 3. Поверхня відгуку у факторному просторі зміни глибини шару боридів злежно від температури та часу зміцнювальної обробки

Візуальний аналіз поверхні відклику дозволяє зробити висновок, що із зростанням температури та тривалості, як ми і очікували, глибина боридів збільшується, причому максимальне значення глибини боридів досягається при максимальній тривалості та температурі, що і підтверджує металографія (рис. 2, е). Математичний оптимум знаходиться у діапазоні 70–80 мкм.

Математична модель (14) дійсна для борування сталі 30ХГСА за розробленою технологією в діапазоні температур 800–900 °С, тривалістю 15–90 хв. Графічне зображення залежності глибини боридів одночасно від температури та тривалості обробки показано на рис. 4.

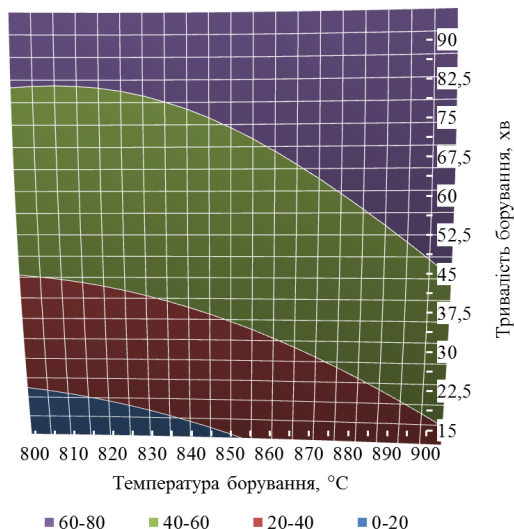


Рис. 4. Номограма глибини боридів одночасно від температури та тривалості обробки

Отримана номограма (рис. 4) дозволяє визначити конкретні умови борування (температуру та тривалість) виходячи з заданої глибини шару боридів.

6. Коефіцієнт дифузії бору при пічному нагріві

Відомо, що для проведення поверхневого дифузійного насичення виробу необхідно створити направле-

ний дифузійний потік атомів насичуючого елемента з поверхні в глибину виробу, що можливе за умови одночасного протікання трьох основних процесів:

- 1) утворення вільних атомів насичуючого елемента на поверхні виробу, що піддається дифузійному насиченню;
- 2) адсорбції (поглинання поверхнею) атомів насичуючого елемента виробом;
- 3) дифузії адсорбованих атомів в глибину виробу.

Дифузія відбувається за вакансійним механізмом. Відомо, що реальний кристал містить певне число вакантних вузлів решіток. Ці вакансії відкривають шлях для легкого здійснення дифузії. Елементарним стрибком при дифузії по цьому механізмі є перескок атома у сусідню вакансію. В результаті стрибка атом і вакансія обмінюються місцями.

Атом дифундує по кристалу в результаті ряду обмінних місцями з різними вакансіями, які час від часу виявляються поблизу нього. Аналіз діаграми стану залізо-бор показав, що дифузійні шари на залізі легко формуються з хорошою відтворністю тими елементами, які на діаграмі стану утворюють явно виражену замкнуту γ -область поблизу температурної осі заліза. Виникнення фазового перетворення під дією зміни температури і концентрації бору в сталі пояснює голкоподібне зростання боридних дифузійних шарів на поверхні сталі. Формування дифузійного шару можливе і у разі відсутності розчинності в результаті хімічної взаємодії атомів насичуючого елемента (В) і основи (Fe).

Тут дифузія пов'язана з утворенням нових фаз (хімічних сполук), що виникають в результаті реакцій, що відбуваються в твердій фазі. Така дифузія називається реакційною. Коефіцієнт дифузії бору в загальному вигляді можна записати:

$$D_b = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (15)$$

де R – газова постійна, Дж/моль·К, D_0 – коефіцієнт дифузії при нескінченно великій температурі, $\text{см}^2/\text{с}$, Q – енергія, яку необхідно затрачувати в процесі дифузії з одного положення рівноваги в кристалічній решітці в інше, кал/г·атом.

Температурна залежність коефіцієнта дифузії бору в α - і γ -залізі описується наступними виразами:

$$D_b^{\alpha} = (7,9 \pm 2,3) \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{67 \pm 5}{RT}\right), \quad \text{см}^2/\text{с}; \quad (16)$$

$$D_b^{\gamma} = (5,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{23 \pm 4}{RT}\right), \quad \text{см}^2/\text{с}. \quad (17)$$

Товщина борованого шару визначається за формулою

$$h = 2\sqrt{D_b \cdot \tau}, \quad \text{мкм}. \quad (18)$$

З формули (18), знаючи експериментальні дані товщини шару і варіюючи температуру борування, визначено коефіцієнт дифузії бору для сталі 30ХГСА, який змінюється від $2,8 \times 10^{-9}$ до $4,6 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$.

Залежність експериментального ефективного коефіцієнта дифузії бору для легованої сталі в порівнянні зі значенням розрахункового коефіцієнта при різних температурах борування показана на рис. 5. Як і очікували, з підвищенням температури ефективний коефіцієнт дифузії зростає.

З рис. 5 видно, що борування в запропонованій обматці дозволяє прискорити процес, у порівнянні з розрахунковими даними у 3 рази.

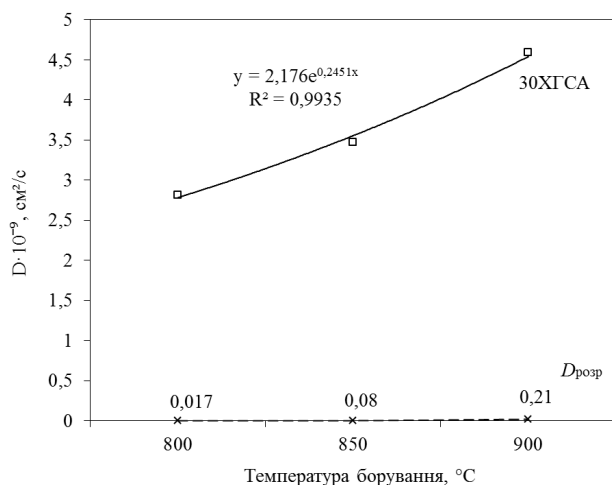


Рис. 5. Залежність розрахункового та ефективного коефіцієнтів дифузії бору у сталі 30ХГСА від температури борування

Для сталі 30ХГСА значення коефіцієнта дифузії при нескінченно великій температурі та енергії активації будуть наступні: $2,17 \text{ см}^2/\text{с}$ та $2,03787 \text{ кал/г-атом}$ відповідно. Враховуючи реальні умови дифузії та задані температурні рамки, значення D_0 значно більше теоретичного. Тоді як енергії, яку необхідно затрачувати в процесі дифузії з одного положення рівноваги в кристалічній решітці в інше, потрібно у 11 раз менше для здійснення процесу насичення сталі 30ХГСА бором за розробленою технологією борування в обматках з нанодисперсного середовища.

7. Обговорення результатів дослідження розробленої технології борування

Завдяки технології швидкісного борування з використанням нанодисперсного середовища, що розроблена, можна скоротити тривалість обробки у 3 рази. Також така технологія дозволяє відійти від використання спеціального та складного обладнання (соляні ванни, газове, іоно-плазмове та лазерне устаткування). Суміш для насичення має лише один основний компо-

нент та два активатори, що також є важливою перевагою серед існуючих складних та багатокомпонентних середовищ.

Розроблена технологія може використовуватися на підприємствах, де є будь-які печі під гартування без додаткового встановлення чи переобладнання устаткування.

Практичне значення математичної моделі та номограми полягає у можливості чіткого визначення конкретної температури та тривалості борування для отримання необхідної глибини шару боридів, виходячи з експлуатаційних потреб деталі. До того ж це дозволяє варіювати умови обробки залежно від експлуатаційних та технологічних потреб.

Планується продовження вивчення розробленої технології наноборування для широкого спектру сталей та сплавів, виведення закономірностей глибини та якості шару боридів від зміни температури та тривалості насичення.

8. Висновки

1. Збільшення температури і часу ХТО приводить до зростання борованих шарів і перехідної зони. Боркування з паст забезпечує отримання твердості поверхні в межах 22–20 ГПа з пониженням її до 18–16 ГПа по шару до перехідної зони, що пов'язане із зміною фазового складу шарів, в яких окрім боридів FeB і Fe₂B з'являються карбіди і бориди хрому сталей.

2. Отримана математична модель у вигляді залежності глибини шару боридів від зміни температури та тривалості процесу насичення та номограма, що побудована на основі отриманої залежності дозволить визначити конкретні умови борування (температуру та тривалість) виходячи з заданої глибини шару боридів, що має велике технологічне значення.

3. На основі отриманих експериментальних даних глибини борованого шару залежно від зміни температури обробки, виведено залежність експериментального ефективного коефіцієнту дифузії бору для легваної сталі, який експоненціально змінюється від $2,8 \times 10^{-9}$ до $4,6 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ при варіюванні температури у рамках 800–900 °C, тоді як значення розрахункового коефіцієнта при традиційному боруванні становлять $0,0017$ – $0,21 \times 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$. Таке зростання коефіцієнту дифузії підтверджує прискорення процесу борування за розробленою технологією.

Література

1. Czerwinski, F. Thermochemical Treatment of Metals [Text] / F. Czerwinski. – Heat Treatment – Conventional and Novel Applications, 2012. – P. 73–112. doi: 10.5772/51566
2. Kulka, M. Microstructure and properties of borocarbureted and laser-modified 17CrNi6–6 steel [Text] / 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 [Text] / 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 [Text] / 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 [Текст] / Н. В. Веропаха, Д. Н. Веропаха, А. В. Скориков и др. // Известия вузов. Северо–Кавказский регион. Серия: Технические науки, 2006. – Спец. вып.: Актуальные проблемы машиностроения. – С. 20–21.
6. Алиев, А. А. Диффузионное борирование стали и шероховатость поверхности [Текст] / 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 [Text] / 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 [Text] / 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 [Текст] / Шашина Л. Т., Махаров Д. М. (СССР). – № 3793701/22–02; заявл. 24.09.84; опубл. 07.03.86, Бюл. № 9.
10. А. с. 1712462 СССР, МПК7 С 23 С 8/70. Порошкообразный состав для борирования стальных изделий [Текст] / Янцен Г. И., Асташенко В. И., Сергеева Е. И. (СССР). – № 4792103/02; заявл. 13.02.90; опубл. 15.02.92, Бюл. № 6.
11. Склад для борування сталевих виробів. Патент України №33654, МПК8 С 23 С 8/00 [Текст] / Павлюченко О. О., Костик В. О., Костик К. О. – № u200800226; заявл. 04.01.08; опубл. 10.07.08, Бюл. № 13.
12. Костик, К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском по нанотехнології [Текст] / К. О. Костик // Машинобудування. – 2013. – № 12. – С. 113–118.
13. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
14. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / 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
15. Коваленко, Б. П. Оптимизация состава холоднотвердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом [Текст] / Б. П. Коваленко, Д. А. Демин, А. Б. Божко. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 6. – С. 59–61.
16. Дьомін, Д. О. Деякі аспекти управління якістю чавуну з пластинчастим графітом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д. О. Дьомін. – Харків, 1995. – 24 с.

Проведені експериментальні дослідження будови тканин полотняного переплетення та проаналізовані динамічні процеси зміни структури тканин на етапах їх виготовлення: при проектуванні, в умовах заправлення на ткацькому верстаті та після зняття з верстата у рівноважному стані. В якості критерію обраний порядок фазової будови, як характеристика взаємної просторової орієнтації систем ниток основи і утку в тканині. Визначений характер зміни фази будови тканини, який залежить від співвідношення діаметрів і хвиль вигинів ниток з урахуванням їх взаємного розташування

Ключові слова: полотняне переплетення, фаза будови тканини, динаміка зміни структури, мікророзріз тканини, взаємне розташування ниток

Проведены экспериментальные исследования строения тканей полотняного переплетения и проанализированы динамические процессы изменения структуры тканей на этапах их изготовления: при проектировании, в условиях заправки на ткацком станке и после снятия со станка в равновесном состоянии. В качестве критерия выбран порядок фазового строения, как характеристика взаимной пространственной ориентации систем нитей основы и утка в ткани. Определен характер изменения фазы строения ткани, который зависит от соотношения диаметров и волн изгибов нитей с учетом их взаимного расположения

Ключевые слова: полотняное переплетение, фаза строения ткани, динамика изменения структуры, микросрез ткани, взаимное расположение нитей

УДК 677.024.001

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55526

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ СТРУКТУРИ ТКАНИН ПОЛОТНЯНОГО ПЕРЕПЛЕТЕННЯ У ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ

О. В. Федорченко
Асистент*

E-mail: etdt@ukr.net

О. В. Загора

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: zoks@ukr.net

О. Ю. Рязанова

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: lenaoma@mail.ru

*Кафедра експертизи,

технології і дизайну текстилю

Херсонський національний

технічний університет

Бериславське шосе, 24,

м. Херсон, Україна, 73008

1. Вступ

Найбільш вагому частку серед продукції ткацького виробництва складають тканини полотняного пере-

плетення. Асортимент даних тканин формувался під впливом історичних традицій ручного ткацтва і зараз налічує багато артикулів. Різноманіття асортименту, не дивлячись на те, що він представлений одним видом