

КІНЕТИКА ДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ БОРОМ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ У8

Анотація. У роботі досліджено вплив режимів порошкового борування – температури (850, 900, 950°C) та витримки (4, 6, 8 год) – на товщину, будову та мікротвердість дифузійного шару на інструментальній сталі У8. Встановлено, що кінетика формування шару задовільно описується параболічним законом, характерним для дифузійно-керованих процесів. Розраховано коефіцієнти дифузії бору при кожній температурі; визначено кінетичні параметри дифузії бору: енергію активації $Q = 199,6$ кДж/моль та передекспоненційний множник $D_0 = 9,24 \times 10^{-4}$ м²/с. Мікроскопічний аналіз виявив зубчастий рельєф міжфазної границі, який покращує зчеплення дифузійного шару з основою. Дисперсійний аналіз (ANOVA) підтвердив, що температурний режим є пріоритетним чинником, котрий визначає товщину шару ($\eta^2 = 0,9897$ проти 0,8964 для часу витримки). На базі методу поверхні відгуку побудовано поліноміальну регресійну модель другого ступеня ($R^2_{adj} = 0,9886$), придатну для розрахунку режимів борування без додаткових досліджень. Результати розширюють уявлення про механізм дифузії бору та закладають кількісну основу для проектування режимів зміцнення деталей зі сталі У8.

Ключові слова: борування, боридний шар, кінетика росту мікроструктура, мікротвердість, регресійна модель, дисперсійний аналіз.

Постановка проблеми. Сталь У8 широко застосовується у виробництві різальних та вимірювальних інструментів, деревообробного оснащення й дрібних штамтів. Умови її експлуатації передбачають контакт з абразивними середовищами та циклічні навантаження, що прискорюють спрацювання робочих поверхонь і скорочують експлуатаційний ресурс виробів. Підвищення

якого залишається актуальним технічним завданням у інструментальному виробництві.

Одним із перспективних шляхів подолання цієї проблеми є використання технологій хіміко-термічної обробки, що забезпечують радикальне зміцнення поверхні зі збереженням пластичності внутрішніх шарів матеріалу. Окреме місце серед них займає борування, здатне формувати боридні шари (FeB , Fe_2B) із твердістю, що сягає 20 ГПа. На відміну від азотування та цементації, боридні покриття відрізняються стійкістю до окиснення при підвищених температурах, а також корозійною стійкістю в кислих середовищах і розплавах кольорових металів [1-4]. Для сталі У8 борування відкриває шлях до суттєвого збільшення довговічності при відносно невисокій собівартості обробки.

Попри наявність загальних відомостей про механізм насичення бором, для конкретної марки У8 бракує перевірених кінетичних параметрів, а також практичного інструменту для розрахунку товщини шару залежно від температури й часу обробки.

Отже, вирішення даної проблеми потребує комплексного експериментального вивчення та подальшої ґрунтовної інтерпретації отриманих результатів з метою формування кількісної бази для процесу борування сталі У8.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі борування сталей накопичено значний масив досліджень, однак акцент переважно зроблено на легованих і швидкорізальних марках сталі. Роботи, присвячені вуглецевим інструментальним сталям класу У8, нечисленні, що й зумовлює необхідність окремого вивчення.

Базовою моделлю для аналізу швидкості росту дифузійних шарів є параболічна залежність товщини від часу, що випливає з другого закону Фіка. Відповідність зазначеної моделі реальним процесам доведена значною кількістю наукових праць стосовно різних матеріалів. Температурна залежність коефіцієнта дифузії традиційно описується за допомогою відомого рівняння Арреніуса. Наприклад, в роботах [5; 6] досліджували кінетику на сталях AISI H13 та AISI P20 відповідно. Числові значення енергії активації (Q) суттєво можуть відрізнятися залежно від хімічного складу матеріалу, умов дифузійного насичення: наприклад, для армко-заліза характерне значення ≈ 157 кДж/моль

[7], а для сталі AISI W110 – 165,0 кДж/моль [1], що відображає характерну залежність – із збільшенням частки домішкових включень дифузійний бар'єр закономірно зростає.

За даними работ [8, 9], температура чинить на товщину дифузійного шару значно потужніший вплив, ніж тривалість процесу, хоча кількісне співвідношення цих ефектів є індивідуальним для кожної марки сталі. Щодо морфології покриття, встановлено [10, 11], що на вуглецевих сталях формується зубчаста границя розділу боридного шару й металевої основи, яка обумовлена кристалографічною анізотропією дифузії; подібна геометрія підвищує адгезійну міцність з'єднання.

Для оптимізації та систематизації результатів у матеріалознавчих дослідженнях дедалі ширше застосовуються методи планованого експерименту й статистичного моделювання. Так, в [12] регресійний аналіз використовувався для моделювання та визначення товщини шару, що утворюється в процесі борування на ковкому чавуні, а в [13] методологія поверхні відгуку застосована для оптимізації твердості покриттів на кобальт-хромовому сплаві. Ці підходи дозволяють отримати компактні аналітичні моделі на основі відносно невеликого числа дослідів.

Незважаючи на наявність загальних уявлень про закономірності процесу борування, стосовно сталі У8 досі бракує систематизованої сукупності даних, яка б інтегрувала результати планованого експерименту, кінетичний аналіз із розрахунком енергії активації Q та передекспоненційного множника D_0 , статистичну оцінку внеску технологічних факторів та побудову прикладної регресійної моделі для прогнозування товщини шару.

Формулювання мети дослідження. Метою цієї роботи є кількісне охарактеризування закономірностей порошкового борування сталі У8: визначення кінетичних параметри дифузії бору, встановлення відносного внеску температури й тривалості насичення в товщину покриття, а також побудування прогностичної математичної моделі для інженерних розрахунків.

Методика досліджень. Матеріалом дослідження закономірностей росту боридних шарів слугувала високовуглецева сталь У8, склад якої за хімічними елементами відображено в таблиці 1. Невисокий рівень легування дозволяє

спостерігати дифузію бору у відносно чистому вигляді, без ускладнень, зумовлених присутністю карбідо- та нітридоутворюючих елементів.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі У8

| Елемент | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu |
|----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Вміст, % | 0,75–0,84 | 0,17–0,33 | 0,17–0,33 | ≤ 0,030 | ≤ 0,028 | ≤ 0,20 | ≤ 0,25 | ≤ 0,25 |

Борування проводили в герметичних сталевих контейнерах у порошковій суміші наступного складу:



де B_4C – карбід бору (донор бору); KBF_4 – газоутворюючий активатор, що підвищує парціальний тиск бору біля поверхні металу [14]; Al_2O_3 – інертний наповнювач, котрий перешкоджає спіканню суміші та стабілізує її склад. Вибір складу насичуючої суміші обґрунтований даними літератури та власними попередніми дослідженнями.

Насичення здійснювали за трьома температурами – 850, 900, 950°C та трьома витримками – 4, 6, 8 год.

Металографічні дослідження проводили на компактному інвертованому мікроскопі ZEISS Axio Vert.A1, оснащеному цифровою камерою. За металографічними знімками визначали товщину боридного шару методом середньої лінії, що є типовим підходом при аналізі шарів з нерегулярною морфологічною структурою.

Для визначення мікротвердості використовували прилад ПМТ-3 при навантаженнях 10–200 г, витримка під навантаженням 7–10 с.

Для математичного опису швидкості росту боридного шару було застосовано параболічний закон, який є характерним для процесів, що перебувають під контролем об'ємної дифузії [1, 6, 8]:

$$d^2 = D \cdot t \quad (2)$$

де d – товщина дифузійного шару (м),

D – коефіцієнт дифузії ($\text{м}^2/\text{с}$),

t – час насичення (с).

Отже, товщина дифузійного шару перебуває у лінійному співвідношенні з квадратним коренем із тривалості процесу:

$$d = \sqrt{D} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Температурну залежність коефіцієнта дифузії D описують рівнянням Арреніуса [1, 6, 8]:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (4)$$

де D_0 – передекспоненційний множник (коефіцієнт частоти), що залежить насамперед від типу кристалічної будови матеріалу, а також від таких параметрів, як величина атомного стрибка та власна частота коливань атома-дифузанта, $\text{м}^2/\text{с}$;

R - універсальна газова стала, Дж/(моль·К);

Q - енергія активації (теплота дифузії), (кДж/моль).

Після логарифмування рівняння (4) воно набуває лінійного вигляду:

$$\ln D = \ln D_0 - \left(\frac{Q}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

Отже, побудова графіка $\ln D - 1/T$ дозволяє графічно визначити Q за кутом нахилу апроксимуючої прямої та встановити $\ln D_0$ як значення у точці її перетину з віссю ординат.

Статистичний аналіз даних виконували у середовищі TIBCO Statistica. Вплив температури та тривалості насичення на товщину дифузійного шару оцінювали шляхом проведення дисперсійного аналізу (ANOVA) з використанням F-критерію та р-значення для перевірки значущості ефектів.

Практична значущість кожного досліджуваного фактора додатково характеризувалась величиною часткового ета-квадрата (η^2) – показника, що відображає відносний внесок окремого чинника у пояснення загальної мінливості залежної змінної.

З метою прогнозування товщини шару використовували регресійний аналіз у рамках методології поверхні відгуку (Response Surface Methodology). Модель враховувала вплив двох незалежних змінних, їх квадратичні ефекти та взаємодію між факторами. Ступінь відповідності моделі експериментальним даним визначали за скоригованим коефіцієнтом детермінації (R^2_{adj}).

Викладення основного матеріалу дослідження. Металографічний аналіз виявив, що борування сталі У8 у порошкових сумішах у температурному діапазоні 850–950°C супроводжується формуванням добре вираженого боридного шару (рис. 1). На всіх досліджуваних зразках боридна зона характеризується типовою зубчастою морфологією. Зі зростанням температури та тривалості насичення відбувається трансформація тонкоголчастої форми боридів у більш компактну пластинчасту структуру, що є закономірним для процесів тривалого дифузійного насичення. Варто відзначити, що максимальну довжину набувають голки, локалізовані вздовж границь зерен, що свідчить про пришвидшену зернограничну дифузію бору.

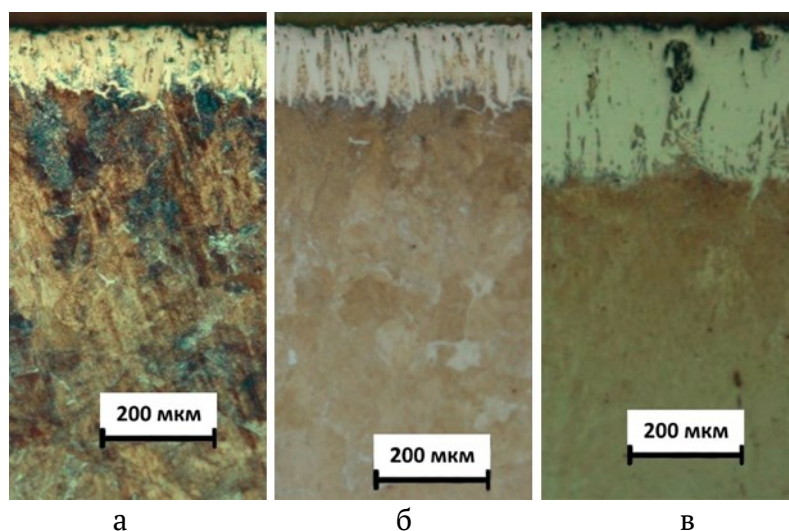


Рисунок 1 – Характер мікроструктури боридного шару, сформованого на сталі У8 при боруванні: а) 850 °С, 4 год; б) 850 °С, 8 год; в) 950 °С, 4 год.

Зубчаста геометрія міжфазної границі виконує роль механічного замка: взаємне проникнення виступів боридного шару й матриці підвищує опір розшаруванню при дотичних навантаженнях – так званий ефект «ластівчиного хвоста» [10; 11].

Безпосередньо під боридною зоною фіксується перехідна область із підвищеним вмістом цементиту відносно структури серцевини. Ця особливість пояснюється перерозподілом вуглецю під час борування: атоми вуглецю витісняються бором з приповерхневого шару вглиб металу, де й виділяються при охолодженні у вигляді додаткового цементиту.

Зведені дані щодо середньої товщини боридного шару, сформованого на сталі У8 за різних режимів насичення, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Узагальнені дані щодо товщини боридних шарів, одержаних на сталі У8, мкм

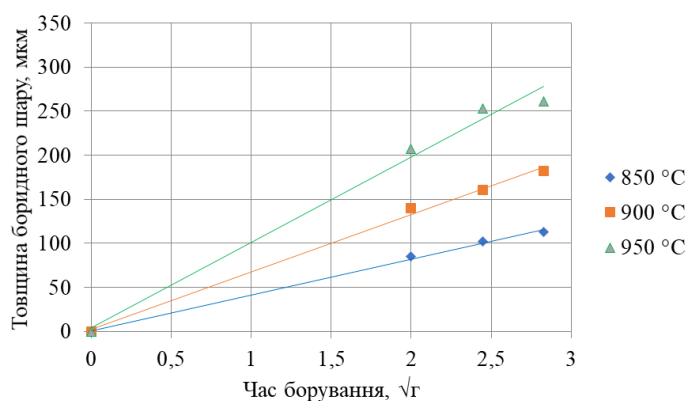
| Температура борування, °С | Час борування, год | | |
|---------------------------|--------------------|-----|-----|
| | 4 | 6 | 8 |
| 850 | 85 | 102 | 113 |
| 900 | 140 | 161 | 182 |
| 950 | 207 | 253 | 261 |

З таблиці видно, що підвищення температури від 850 до 950°С збільшує товщину шару більш як удвічі при однаковій витримці (наприклад, за 4 год: 85 → 207 мкм). Вплив часу насичення є менш виразним і набуває нелінійного характеру при тривалих витримках: так, при 950°С приріст товщини при збільшенні часу від 4 до 6 год складає ~46 мкм, при збільшенні часу від 6 до 8 год – лише ~8 мкм. Імовірною причиною такого нелінійного характеру може бути поступове збіднення насичуючої суміші та гальмування дифузії вуглецем, що накопичується в приповерхневій зоні.

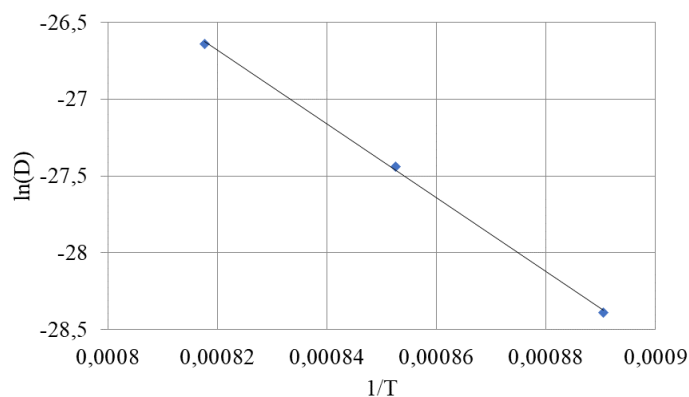
Побудовані у координатах $d - \sqrt{t}$ графіки для трьох температур борування (рис. 2а) засвідчили стійку лінійну залежність в усьому досліджуваному діапазоні, що є переконливим підтвердженням параболічного закону росту боридного шару та визначальної ролі об'ємної дифузії бору відповідно до рівняння (2). Кількісні значення коефіцієнта дифузії D , розраховані з нахилів відповідних прямих для кожної температури, наведено в таблиці 3.

На наступному етапі було побудовано графік Арреніуса у координатах $\ln D - 1/T$ для сталі У8 (рис. 2б). Апроксимація експериментальних даних у координатах виявила чітку лінійну тенденцію, що підтверджує термічно активований характер дифузії бору та обґрунтовує використання рівняння Арреніуса. Кількісна обробка графічної залежності дозволила встановити два ключові кінетичні параметри: енергію активації дифузії $Q = 199,6$ кДж/моль та передекспоненційний множник $D_0 = 9,24 \times 10^{-4}$ м²/с.

Встановлена величина енергії активації дифузії бору в сталі У8 знаходиться у задовільному узгодженні з наявними у науковій літературі відомостями для сталей вуглецевого класу (таблиця 4).



а)



б)

Рисунок 2 – Закономірності росту боридних шарів на сталі У8: а) залежність товщини боридного шару від кореня квадратного з часу обробки; б) залежність натурального логарифму коефіцієнта дифузії від оберненої температури борування

Таблиця 3

Визначені розрахунковим методом коефіцієнти дифузії бору для сталі У8

| Марка сталі | Температура борування, °С | $D \cdot 10^{12}$, м ² /с |
|-------------|---------------------------|---------------------------------------|
| У8 | 850 | 0,68 |
| | 900 | 1,10 |
| | 950 | 2,69 |

Підвищене значення енергії активації для сталі У8 порівняно з технічно чистим армко-залізом є закономірним наслідком легувального впливу вуглецю та домішкових елементів Si і Mn, які спричиняють викривлення кристалічної решітки, створюючи додаткові дифузійні бар'єри, тим самим збільшуючи енергетичний поріг активації дифузійного процесу.

Таблиця 4

Зіставлення величин енергії активації

| Матеріал | Середовище борування | Енергія активації, кДж/моль | Посилання |
|--------------|----------------------|-----------------------------|----------------|
| AISI W1 | порошкова суміш | 171,2 | [15] |
| AISI W110 | порошкова суміш | 165,0 | [1] |
| AISI 1045 | порошкова суміш | 186,0 | [1] |
| Армко-залізо | паста | 157,0 | [7] |
| Сталь У8 | порошкова суміш | 199,6 | це дослідження |

Статистичний аналіз експериментальних результатів проводився із залученням методів дисперсійного та регресійного аналізу. ANOVA застосовувався для розмежування систематичного впливу температури і тривалості борування від випадкової мінливості товщини боридного шару. Аналіз показав статистичну значущість обох факторів ($p < 0,05$), що відображено в таблиці 5. Розраховані значення часткового ета-квадрата (η^2) становили 0,9897 для температури та 0,8964 для тривалості, підтверджуючи переважний вплив температурного параметра дифузійного насичення. Така закономірність є фізично обґрунтованою, оскільки дифузія бору підпорядковується експоненційній температурній залежності Арреніуса. У технологічному аспекті це означає, що регулювання температури є пріоритетним способом досягнення необхідної товщини боридного шару, тоді як збільшення тривалості процесу відіграє допоміжну роль.

Оцінка дисперсії показників товщини боридного шару

| Ефект | Сума квадратів відхилень SS | Ступені свободи df | Середній квадрат MS | Критерій Фішера F -значення | Рівень значущості p -значення | Частковий ета-квадрат η^2 |
|--------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Вільний член | 251335,1 | 1 | 251335,1 | 3259,3893 | 0,000001 | 0,9988 |
| Температура | 29708,2 | 2 | 14854,1 | 192,633 | 0,000106 | 0,9897 |
| Тривалість | 2670,2 | 2 | 1335,1 | 17,314 | 0,010723 | 0,8964 |
| Помилка | 308,4 | 4 | 77,1 | | | |

З метою встановлення кількісного функціонального зв'язку між досліджуваними змінними було застосовано регресійний аналіз, який широко використовується для побудови емпіричних моделей, що описують властивості матеріалів та перебіг інженерних процесів. Принципова перевага регресійних моделей полягає у їх здатності не лише описувати наявні експериментальні дані, але й визначати оптимальні поєднання вхідних технологічних параметрів для цілеспрямованого формування заданих властивостей матеріалу. На підставі отриманого масиву експериментальних даних було побудовано емпіричну регресійну модель другого порядку, яка відображає зв'язок між товщиною боридного шару (d , мкм) на сталі У8 та такими технологічними параметрами, як температура борування (t , °C) і тривалість процесу (τ , год), що виражено рівнянням 6.

$$d = 2095,8888 - 5,5867 \cdot t - 26,1667 \cdot \tau + 0,0037 \cdot t^2 - 1,8333 \cdot \tau^2 + 0,0650 \cdot t \cdot \tau \quad (6)$$

Величина скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2_{adj} = 0,9886$ засвідчує, що побудована модель пояснює 98,86% загального розсіювання значень товщини боридного шару у границях вивченого діапазону умов насичення, що свідчить про її високу прогностичну точність та статистичну адекватність. Графічне представлення моделі у формі тривимірної поверхні відгуку (рис. 3) графічно відтворює експоненційний характер зростання товщини боридного

шару з підвищенням температури та параболічний – зі збільшенням тривалості процесу.

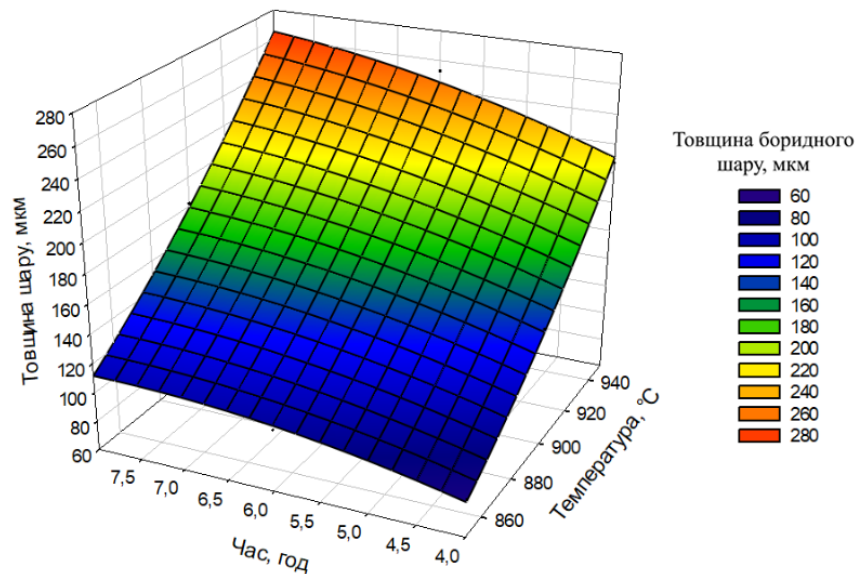


Рисунок 3 – Графічне зображення поверхні відгуку регресійної моделі товщини боридного шару

Розподіл мікротвердості за перерізом зразків, оброблених при трьох температурах протягом 6 год, показано на рис. 4.

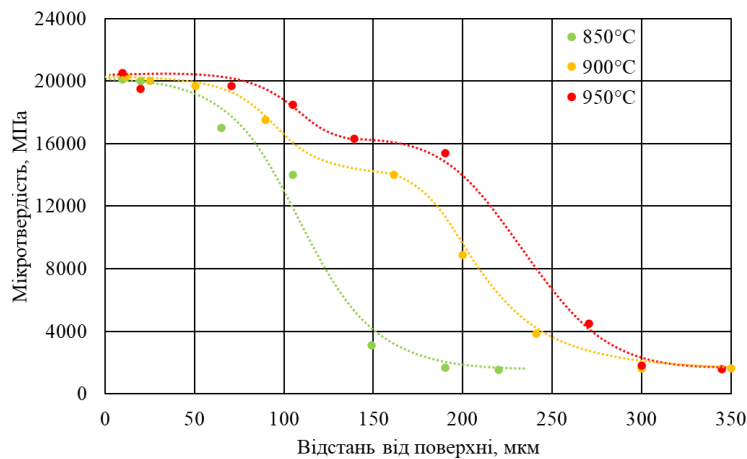


Рисунок 4 – Профіль мікротвердості за глибиною боридного шару сталі У8 при тривалості обробки 6 год

Розподіл мікротвердості по перерізу зразка чітко корелює зі структурою зон, що спостерігається при мікроскопічному дослідженні. Мікротвердість

боридного шару змінюється в діапазоні від ~20 ГПа до ~16 ГПа: зовнішня зона, що відповідає фазі FeB, характеризується максимальною твердістю (~20 ГПа), тоді як внутрішня зона фази Fe₂B демонструє нижчі значення близько 16 ГПа. У напрямку вглиб матеріалу, за границею боридної зони, спостерігається різке зниження твердості, що зумовлено зменшенням концентрації бору, формуванням лише твердого розчину бору в залізній матриці та зростанням концентрації вуглецю. Ця перехідна зона характеризується твердістю ~5-6 ГПа. У шарі, віддаленому від поверхні на 200–300 мкм, при різних температурах борування (рис. 4), твердість набуває значень, характерних для вихідного стану сталі У8.

Аналіз профілів мікротвердості різних зразків виявив схожість загальних тенденцій та практично однакові значення поверхневої твердості, що вказує на несуттєвий вплив температурних умов та часу борування на показники мікротвердості боридної зони високовуглецевих сталей.

Висновки. Проведене дослідження комплексно охарактеризувало процес порошкового борування інструментальної сталі У8 в діапазоні температур 850–950°C та тривалостей 4–8 год. Встановлено, що ріст боридного шару FeB/Fe₂B підпорядковується параболічному закону дифузії; розраховано енергію активації $Q = 199,6$ кДж/моль та передекспоненційний множник $D_0 = 9,24 \times 10^{-4}$ м²/с, що корелює з даними, наведеними у літературних джерелах для вуглецевих сталей і відображає гальмівний вплив вуглецю та легувальних елементів на дифузійний процес. Зубчаста морфологія міжфазної границі, виявлена металографічно, забезпечує ефективне механічне зчеплення дифузійного шару з основою. Дисперсійний аналіз довів домінуючу роль температури ($\eta^2 = 0,9897$) над тривалістю ($\eta^2 = 0,8964$), що є практично важливим орієнтиром для технологічного проектування. Побудована регресійна модель другого порядку ($R^2_{adj} = 0,9886$), яка дозволяє розраховувати товщину шару без проведення додаткових експериментів. Результати формують кількісну науково-практичну базу для оптимізації зміцнення деталей зі сталі У8.

ЖИТЕПАТҮПА/ REFERENCES

1. Matijević B. Evaluation of Boride layer growth on carbon steel surfaces. Metal Science and Heat Treatment. 2014. Vol. 56. P. 269–273. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-014-9744-7>
2. Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment / T. Balusamy et al. Vacuum. 2013. Vol. 97. P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.04.006>
3. Jurci P., Hudakova M. Characterization of microstructure and fracture performance of boronized H11 grade hot-work tool steel. Materials Performance and Characterization. 2020. Vol. 9. P. 339–357. DOI: <https://doi.org/10.1520/MPC20190086>
4. Simulation of growth kinetics of Fe₂B layers formed on gray cast iron during the powder-pack boriding / M. Ortiz-Dominguez et al. Materials and Technology. 2014. Vol. 48. P. 905–916.
5. Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders/ M. S. Karakas et al. Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. P. 159–165.
6. Kayali Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace. Vacuum. 2015. Vol. 121. P. 129–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.08.006>
7. Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron / I. Campos-Silva et al. Surface Engineering. 2011. Vol. 27. P. 189–195. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708410X12550773057820>
8. Sen S., Sen U., Bindal C. An approach to kinetic study of borided steels. Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 191. P. 274–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.03.040>
9. Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis / Campos I. et al. Applied Surface Science. 2006. Vol. 252. P. 8662–8667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.12.002>
10. Allaoui O., Bouaouadja N., Saindernan G. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201. P. 3475–3482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.238>
11. Béjar M. A., Moreno E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 173. P. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.12.006>
12. Yalamaç E., Türkmen I., Firtina Ö. Characterization and kinetic analysis of iron boride layer formed on the GGG 70 ductile cast iron. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2021. Vol. 74. P. 1701–1711. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02249-y>
13. Hardness optimization of boride diffusion layer on ASTM F-75 alloy using response surface methodology / J. L. Arguelles-Ojeda et al. Revista Mexicana de Física. 2017. Vol. 63. P. 76–81.
14. Dybkov V. I. Basics of Formation of Iron Boride Coatings. Journal of Mineral, Metal and Material Engineering. 2016. Vol. 2. P. 30–46.
15. Genel K., Ozbek I., Bindal C. Kinetics of boriding of AISI W1 steel. Mater. Sci. Eng. A. 2003. Vol. 347. P. 311–314. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00607-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00607-X)

Received 16.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 621.785

Svitlana Hryhorieva, Oleksandr Barmin

BORON DIFFUSION SATURATION KINETICS OF TOOL STEEL U8

Abstract. This article presents the results of a study on the effect of powder boriding parameters – temperature (850, 900, 950°C) and holding time (4, 6, 8 hours) – on the growth kinetics, microstructure, morphology, and microhardness of the boride diffusion

layer on high-carbon tool steel U8. Boriding was carried out in sealed containers using a powder mixture of 85% B_4C , 5% KBF_4 , and 10% Al_2O_3 . Metallographic examination revealed a well-defined dual-phase FeB/Fe_2B boride layer with a characteristic sawtooth interfacial morphology, which provides mechanical interlocking between the coating and the substrate, improving resistance to delamination. A cementite-enriched transition zone beneath the boride layer was observed, attributed to carbon redistribution during boron diffusion. Microhardness values reached approximately 20 GPa in the outer FeB zone and 16 GPa in the inner Fe_2B zone, dropping sharply to base-metal values beyond 200–300 μm depth. The boride layer growth was found to follow a parabolic law, confirming diffusion-controlled kinetics. Arrhenius analysis yielded an activation energy $Q = 199.6$ kJ/mol and a pre-exponential factor $D_0 = 9.24 \times 10^{-4}$ m²/s, consistent with literature data for carbon steels. Analysis of variance (ANOVA) confirmed that both factors are statistically significant ($p < 0.05$); the partial eta-squared values were $\eta^2 = 0.9897$ for temperature and $\eta^2 = 0.8964$ for time, establishing temperature as the dominant process variable. A second-order polynomial regression model based on response surface methodology was developed ($R^2_{adj} = 0.9886$), enabling reliable prediction of boride layer thickness without additional experiments. The results provide a quantitative basis for optimizing surface hardening of steel U8 components to improve their wear resistance and service life.

Keywords: boriding, boride layer, growth kinetics, microstructure, microhardness, regression model, analysis of variance.

Бармін Олександр Євгенович – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>

Григор'єва Світлана Вікторівна – інженер кафедри електричних машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>

Barmin Oleksandr – PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Materials Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>

Hryhorieva Svitlana – engineer at the Department of Electrical Machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>