

132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.785

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359798

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ БОРУВАННЯ НА СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ

Бармін О.Є. канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>, e-mail: axel.com.ua@gmail.com;

Григор'єва С.В. інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>, e-mail: kapuchinka84@gmail.com

У статті розглянуто закономірності формування боридних шарів на сталі 45 при боруванні в порошкових сумішах, досліджено вплив температури та тривалості насичення на структуру, мікротвердість і кінетику росту шару. **Мета.** Метою роботи є встановлення кількісних закономірностей формування боридних шарів на конструкційній сталі 45, дослідження впливу температури та тривалості насичення на структуру і мікротвердість шару, розроблення математичної моделі прогнозування товщини боридного шару залежно від параметрів процесу. **Методика.** Зразки зі сталі 45 піддавали боруванню в герметичних контейнерах у суміші карбіду бору, фторборату калію та оксиду алюмінію при температурах 850, 900 і 950°C з витримкою 4, 6 та 8 годин; товщину шару визначали за результатами не менше 50 вимірювань на зразок. Кінетику росту описували параболічним законом дифузії, температурну залежність – рівнянням Арреніуса. Статистичну обробку виконували методами дисперсійного та регресійного аналізу в рамках методології поверхні відгуку. **Результати.** Борування формує боридний шар з пилкоподібною морфологією. Товщина шару зростає від 102 до 308 мкм зі збільшенням температури та часу витримки. Визначено енергію активації дифузії бору – 193,0 кДж/моль та частотний фактор – $6,69 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Мікротвердість боридної зони становить 16–20 ГПа і визначається фазовим складом, а не режимами обробки. Регресійна модель другого порядку описує товщину шару зі скоригованим коефіцієнтом детермінації 0,9904. **Наукова новизна.** Вперше для сталі 45 отримано повний комплекс кінетичних параметрів дифузії бору та розроблено регресійну модель, яка кількісно зв'язує товщину боридного шару з температурою та тривалістю обробки з точністю апроксимації 99,04%. **Практична значимість.** Модель є готовим інженерним інструментом для розрахунку режимів борування сталі 45 без додаткових дорогих експериментів і може бути застосована при виробництві зносостійких деталей без переходу на дорожчі матеріали.

Ключові слова: борування; боридний шар; кінетика росту; енергія активації; мікроструктура; регресійна модель.

Постановка проблеми

Забезпечення тривалої роботи машинних компонентів, що функціонують за умов інтенсивного тертя, ударних навантажень та контакту з корозійно-активними середовищами, є однією з ключових проблем машинобудування.

Сталі середньовуглецевого класу (вміст вуглецю від 0,25% до 0,6%), завдяки оптимальному поєднанню міцності, пластичності та технологічності, набули широкого застосування у виробництві відповідальних деталей: валів, осей, шестерень, штоків, шпинделів, втулок і кріпильних елементів. Проте відносно невисока твердість їхньої поверхні у вихідному стані робить такі деталі схильними до інтенсивного абразивного зношування, особливо при роботі без мастила або в середовищах, що містять абразивні частинки. Низька зносостійкість поверхневого шару нерідко виступає вирішальним обмеженням загального ресурсу деталі та довговічності всього вузла.

Перспективним способом вирішення цієї проблеми є хіміко-термічна обробка, яка дає змогу суттєво поліпшити властивості поверхневого шару, при цьому

зберігається в'язка серцевина. Особливе місце серед таких методів займає борування: воно забезпечує формування надзвичайно твердих шарів боридів заліза (FeB, Fe₂B) з твердістю до 20 ГПа. Такі шари не лише радикально підвищують зносостійкість поверхні, жаростійкість, але й забезпечують стійкість до корозії в ряді агресивних середовищ, у тому числі в розплавах деяких металів [1-4]. Отже, насичення бором поверхні конструкційних середньовуглецевих сталей дозволить без переходу на дорожчі матеріали значно підвищити довговічність широко застосовуваних деталей.

Проте ефективне використання процесу в промислових масштабах неможливе без встановлення кількісних співвідношень між режимами обробки і параметрами сформованого дифузійного шару, насамперед його товщиною та мікроструктурою. Наявність таких залежностей дозволить обґрунтовано призначати технологічні параметри процесу (температуру, час витримки), щоб досягти потрібних експлуатаційних властивостей, скорочуючи витрати та мінімізуючи деформацію деталей. Саме в отриманні подібних кількісних

даних стосовно конкретної, масово вживаної сталі 45 і полягає актуальність цього дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наукової літератури свідчить про те, що загальна феноменологія борування сталей на сьогодні охарактеризована досить детально, однак дослідницький інтерес традиційно зосереджений переважно на інструментальних та легованих марках.

Дифузійне зростання боридних шарів підпорядковується параболічному закону, який безпосередньо впливає з другого закону Фіка і підтверджений у численних роботах для широкого кола матеріалів. У практиці досліджень характер взаємозв'язку коефіцієнта дифузії та температури традиційно описується за допомогою рівняння Арреніуса: зокрема, в роботах [5, 6] цей підхід використовувався при дослідженні кінетики борування сталей AISI H13 та AISI P20 відповідно. Розкид значень енергії активації, що наводяться різними дослідниками, може бути досить значним внаслідок відмінностей у методах проведення експериментів, хімічних складів насичуючого середовища та сталі. Наприклад, автори роботи [1] для сталі AISI 1045 отримали значення енергії активації 186,0 кДж/моль, а в роботі [7] для армко-заліза значення склали 157 кДж/моль, що відображає загальну закономірність: чим вищий вміст вуглецю, тим більший енергетичний бар'єр дифузії.

Наявні наукові праці переконливо свідчать про експоненційну залежність коефіцієнта дифузії та товщини дифузійного шару від температури, натомість залежність від часу має параболічний характер. Як показано в роботах [8, 9], температурний фактор суттєво переважає за своїм впливом тривалість витримки. Проте кількісне співвідношення цих ефектів може змінюватися залежно від хімічного складу сталі.

Щодо морфології та структури боридного шару на середньовуглецевих сталях, добре встановленим є факт формування вираженої пилкоподібної (зубчастої) морфології. В основі цього явища лежить анізотропія дифузійних процесів і швидкості росту залежно від кристалографічного напрямку. Відповідно до результатів, представлених у роботах [10, 11], така морфологія сприяє надійній механічній адгезії боридного шару до основи завдяки ефекту геометричного зчеплення за типом.

Останніми роками для моделювання та підвищення ефективності різноманітних технологічних процесів дедалі частіше звертаються до статистичних методів обробки даних. Так, у роботі [12] для прогнозування товщини боридного шару на чавуні було залучено регресійний аналіз, а методологія поверхні відгук у роботі [13] була спрямована на оптимізацію твердості покриття. Подібні методи дають змогу

отримувати високоточні емпіричні моделі в рамках планованого експерименту.

Таким чином, попри те, що узагальнені закономірності насичення бором достатньо вивчені, для сталі 45 досі не сформовано комплексу даних, який би поєднував результати статистично спланованого експерименту, кінетичний аналіз з обчисленням кінетичних параметрів Q та D_0 , статистичну оцінку впливу технологічних факторів і практичну регресійну модель прогнозування товщини боридного шару.

Мета статті

Робота має на меті визначення особливостей формування боридних шарів на сталі 45 в умовах борування в порошкових сумішах, вивчення впливу температурного режиму та часу насичення на структурні характеристики, мікротвердість і кінетичні закономірності росту шару, а також розроблення математичної моделі для прогнозування товщини дифузійного шару залежно від умов проведення насичення.

Матеріали та методи

Як об'єкт для вивчення кінетики росту боридних шарів використовувалась середньовуглецева конструкційна сталь 45, елементний склад наведено в таблиці 1.

Сталь 45 випускається у вигляді листів, фасонного прокату та поковок і використовується для виготовлення колінчастих валів, шестерень, осей, болтів, гайок та інших деталей, що працюють в умовах середніх механічних навантажень. Підвищення експлуатаційних властивостей досягається термічною обробкою – загартуванням з відпуском або методами поверхневого зміцнення.

Низький вміст легувальних елементів та домішок створює умови дослідження безпосереднього ефекту дифузії бору, виключаючи вплив карбідоутворюючих та нітридоутворюючих компонентів.

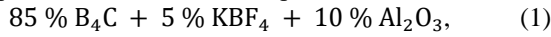
Для виготовлення зразків використовувалась прокат зі сталі 45, зразки мали форму циліндра з поперечним перерізом 15 мм та висотою 10 мм. Підготовку поверхонь проводили шліфуванням наждачним папером із фінішною зернистістю P800, промивали в етиловому спирті з метою знежирення та піддавали сушінню. Зазначена підготовка поверхні забезпечує низький рівень шорсткості ($Ra \leq 0,2$ мкм) та перешкоджає утворенню оксидних плівок, які негативно впливають на активність процесу насичення. Підготовлені зразки поміщали у герметичні контейнери та засипали шаром (~20 мм) порошкової насичуючої суміші. Для запобігання витоку газів, що виникають в ході реакції між активатором та борвмісними складовими суміші, контейнери надійно герметизували.

Таблиця 1

Елементний склад сталі 45

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Вміст, %	0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	≤ 0,030	≤ 0,035	≤ 0,25	≤ 0,3	≤ 0,3	Решта

Співвідношення компонентів порошкової суміші було визначено на підставі аналізу літературних даних та напрацювання власних попередніх досліджень:



V_4C – основний постачальник бору;

KBF_4 – активатор, який прискорює перебіг реакції шляхом утворення легких борвмісних сполук;

Al_2O_3 – інертний наповнювач, що забезпечує стабільність суміші та перешкоджає її спіканню.

Відповідно до літературних даних [14], активуючі компоненти порошкової суміші типу KBF_4 підвищують парціальний тиск бору безпосередньо біля металевої поверхні, що підвищує інтенсивність процесу насичення та сприяє рівномірності шару.

По завершенні борування металографічну підготовку зразків здійснювали відповідно до стандартної методики, яка включала послідовне шліфування із застосуванням наждачного паперу зростаючих номерів зернистості, полірування на сукняному крузі із полірувальною пастою на основі Cr_2O_3 та завершальне хімічне травлення 4% спиртовим розчином HNO_3 для виявлення елементів мікроструктури. Мікроструктурний аналіз та фотографування здійснювали на стаціонарному металографічному мікроскопі ZEISS Axio Vert.A1 із застосуванням цифрової фіксації зображень; оптимальне збільшення визначали з умови забезпечення достовірної ідентифікації та зіставлення структурних складових незалежно від ступеня їх дисперсності.

Для визначення товщини дифузійного шару застосовували метод середньої лінії, який широко застосовується для шарів з нерівномірним пілкоподібним профілем границі розділу. На кожному зразку виконували не менше 50 вимірювань відстані від поверхні зразка до вершин найглибших пілкоподібних виступів боридного шару, а їх усереднене арифметичне значення вважали ефективною товщиною шару (d_{ef}). Вимірювання мікротвердості здійснювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях 10–200 г з витримкою під навантаженням 7–10 секунд.

Для опису кінетики росту дифузійного шару застосовували параболічний закон, який є характерним для дифузійно-контрольованих процесів [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 витримки при дифузії (с).

Таким чином, між товщиною дифузійного шару та квадратним коренем часу встановлюється лінійна залежність:

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

Для опису зв'язку між коефіцієнтом дифузії D та абсолютною температурою T використовують

рівняння Арреніуса [1, 6, 8]:

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

де D_0 – коефіцієнт частоти (передекспоненційний коефіцієнт), що залежить насамперед від типу кристалічної решітки, а також від величини атомного стрибка та частоти коливань дифузійного атома, $\text{м}^2/\text{с}$;

R – універсальна газова константа, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$;

Q – енергія активації (мінімальна енергія, необхідна для здійснення дифузійного стрибка), $\text{Дж}/\text{моль}$.

Логарифмічне перетворення рівняння (4) дає лінійну форму запису:

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

Відповідно, аналіз графіка залежності $\ln D$ від $1/T$ дає змогу визначення Q за нахилом прямої та $\ln D_0$ за відрізком, що відсікається нею на осі ординат.

Статистичний аналіз отриманих даних виконували у програмному пакеті TIBCO Statistica. З метою встановлення впливу температурного режиму та тривалості витримки на товщину боридного шару застосовували метод дисперсійного аналізу (ANOVA) із перевіркою значимості факторних ефектів відповідно до F -критерію та p -значенням.

Ступінь впливу кожного фактора визначали через показник часткового ета-квадрату (η^2), що відображає відносний внесок у дисперсію залежної змінної, яку пояснює відповідний фактор. Для побудови прогнозної моделі використовували регресійний аналіз у рамках статистичної методології поверхні відгуку (Response Surface Methodology) з урахуванням квадратичних членів і парної взаємодії факторів; ступінь відповідності моделі даним оцінювали за допомогою скоригованого коефіцієнта детермінації (R^2_{adj}).

Виклад основного матеріалу

Результати металографічного аналізу свідчать, що насичення бором сталі 45 порошковим методом у температурному діапазоні 850–950°C приводить до формування явно вираженого боридного шару (рис. 1). У всіх випадках боридна зона складається з боридів FeB , Fe_2B та має виражену зубчасту структуру з характерним пілкоподібним профілем границі розділу. У міру зростання температури та тривалості процесу насичення морфологія боридів зазнає характерної трансформації – від тонкоголчастої до щільнішої пластинчастої будови, притаманної тривалішим процесам. Переважний ріст голок спостерігається вздовж границь зерен, що корелює з підвищеною швидкістю зернограничної дифузії бору.

Подібна морфологія сприятливо позначається на адгезії шару до основи завдяки ефекту механічного закріплення за типом «ластівчиного хвоста» [10, 11].

Встановлено, що підвищення температури та тривалості борування закономірно збільшує товщину боридного шару при цьому температурний фактор є значно вагомішим: при зростанні температури з 850°C до 950°C товщина шару зростає більш як удвічі.

Безпосередньо під боридним шаром простежується перехідна зона, представлена феритом і перлітом з підвищеним вмістом останнього порівняно з серцевиною. Такий розподіл є наслідком інтенсивних дифузійних процесів, що спричиняють витіснення атомів вуглецю з поверхневих шарів углиб матеріалу та стимулюють утворення додаткового цементиту. Оскільки вміст вуглецю в сталі 45 є відносно невисоким, це зумовлює повільне формування бар'єрного карбідного шару, який не може достатньо ефективно компенсувати анізотропію росту боридів, внаслідок чого зубці ростуть вглиб металу, утворюючи характерну нерівномірну морфологію.

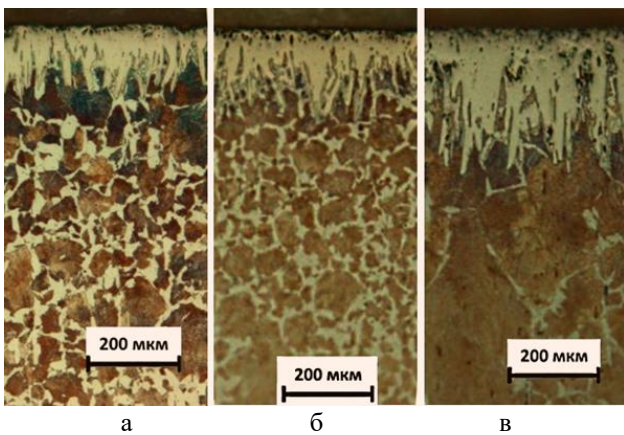


Рис. 1 – Мікроструктура боридного шару на сталі 45 після насичення в різних режимах: а) 850°C, 4 години; б) 850°C, 8 годин; в) 950°C, 4 години

В таблиці 2 наведено результати експериментальних досліджень, що характеризують середню товщину боридного шару, сформованого на сталі 45 в залежності від параметрів режиму насичення.

Таблиця 2

Середні вимірні значення товщини боридного шару на сталі 45, мкм

Температура борування, °C	Час борування, год		
	4	6	8
850	102	120	132
900	150	196	221
950	231	285	308

Аналіз даних таблиці показав, що температура відіграє домінуючу роль у формуванні товщини боридного шару: зі зростанням температури з 850°C до 950°C спричиняє збільшення її значення більш як удвічі. Зокрема, при витримці протягом 4 годин при

температурі 850°C формується шар товщиною близько 102 мкм, тоді як при 950°C – вже близько 231 мкм. Збільшення тривалості обробки також сприяє зростанню товщини шару, однак цей вплив є менш інтенсивним і має нелінійний характер. Зокрема, при 900°C подовження витримки з 4 до 6 годин дає помітний приріст товщини (~ 46 мкм), тоді як подальше збільшення до 8 годин забезпечує лише незначний приріст (~ 25 мкм). Це може свідчити про поступове зниження активності борвмісних складових насичуючого середовища або про сповільнення дифузійного процесу через збагачення приповерхневої зони вуглецем.

Для підтвердження параболічного характеру росту боридного шару було побудовано графіки залежності товщини шару (d) від \sqrt{t} для всіх трьох температур експерименту (рис. 2а). Лінійний характер залежності, виявлений при кожній із трьох температур, підтверджує об'ємно-дифузійний механізм контролю процесу згідно з рівнянням (2). Значення коефіцієнта дифузії бору D в сталі 45 для кожної температури було розраховано з нахилів відповідних прямих.

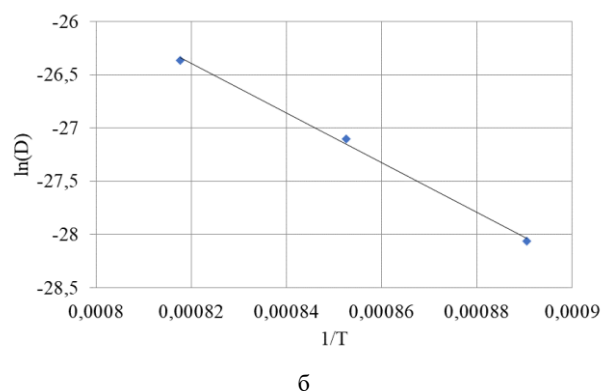
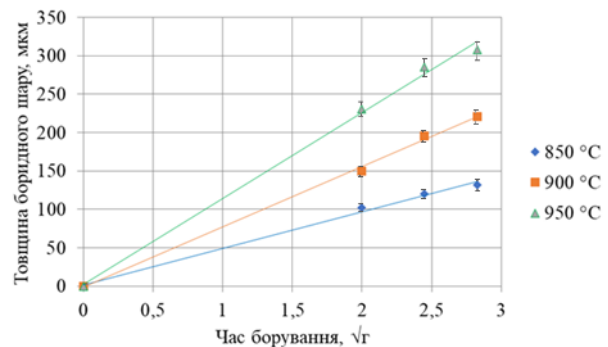


Рис. 2 – Кінетичні закономірності росту боридного шару на сталі 45: а) лінійна залежність ефективної товщини шару від кореня квадратного з часу борування; б) залежність натурального логарифма коефіцієнта дифузії від величини, оберненої до абсолютної температури

На наступному етапі було побудовано графік Арреніуса: натуральний логарифм коефіцієнта дифузії $\ln D$ як функція оберненої температури $1/T$ (рис. 2б).

З наведеного графіка видно, що експериментальні дані добре узгоджуються з прямолінійною залежністю, підтверджуючи застосовність рівняння Арреніуса для характеристики температурної залежності борування. За тангенсом кута нахилу прямої та відрізком, що відсікається нею на осі ординат, визначено:

- енергія активації дифузії бору,

$$Q = 193,0 \text{ кДж/моль}$$

- коефіцієнт частоти, $D_0 = 6,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Розраховане значення енергії активації дифузії бору в сталі 45 корелює з відомими літературними даними для середньовуглецевих сталей подібного складу (табл. 3).

Таблиця 3

Зіставлення значень енергій активації

Матеріал	Середовище борування	Енергія активації, кДж/моль	Посилання
AISI 1040	порошкова суміш	168,0	[15]
AISI 1045	порошкова суміш	186,0	[1]
Армко-залізо	паста	157,0	[7]
Сталь 45	порошкова суміш	193,0	це дослідження

Більш високе значення енергії активації для сталі 45 відносно чистого заліза пояснюється впливом вуглецю та супутніх елементів (Si, Mn), що ускладнює дифузійне переміщення атомів бору та збільшує відповідний енергетичний бар'єр.

Передекспоненційний множник D_0 характеризує частоту атомних коливань, які завершуються успішним дифузійним переходом. Підвищення значення D_0 сприяє збільшенню коефіцієнта дифузії.

Для статистичного аналізу експериментальних результатів у даній роботі було залучено методи дисперсійного та регресійного аналізу. Дисперсійний аналіз застосовували для з'ясування природи варіювання товщини боридного шару – випадкової чи зумовленої впливом температури та тривалості борування як незалежних змінних. Результати ANOVA (табл. 4) засвідчили статистичну значущість обох досліджуваних змінних ($p < 0,05$).

Величину впливу кожної змінної в дисперсійному аналізі оцінювали за допомогою часткового ета-квадрату (η^2) – показника, що відображає частку загальної дисперсії, зумовлену відповідним ефектом. Розраховані значення цього показника для температури та тривалості насичення дорівнюють 0,9812 та 0,8854 відповідно, що свідчить про значно більший вплив температурного фактора. Це закономірно узгоджується з фізичною природою дифузійного процесу, де температура відіграє визначальну роль через експоненційний характер залежності, описуваної рівнянням Арреніуса.

Таблиця 4

Зіставлення значень енергій активації

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	338336,1	1	338336,1	1913,906	0,000002	0,9979
Температура	36924,2	2	18462,1	104,4372	0,000353	0,9812
Тривалість	5467,6	2	2733,8	15,464	0,01311	0,8854
Помилка	707,1	4	176,8			

З технологічної точки зору наведений висновок свідчить про те, що для прискореного нарощування боридного шару на сталі 45 підвищення температури є пріоритетнішим заходом, ніж збільшення тривалості борування, хоча останнє також суттєво впливає на товщину шару.

З метою встановлення функціональної залежності між змінними було виконано регресійний аналіз. Такий підхід широко використовується для побудови емпіричних моделей, що описують поведінку матеріалів та інженерних процесів, і дозволяє визначити оптимальне поєднання вхідних параметрів для отримання необхідних властивостей. Регресійні моделі є ефективним інструментом побудови емпіричних залежностей у матеріалознавстві та інженерній практиці, оскільки дають змогу визначити оптимальні значення вхідних параметрів для отримання заданих характеристик матеріалу.

За результатами обробки експериментальних даних отримано емпіричну регресійну модель другого порядку, що описує залежність товщини боридного шару (d , мкм) на сталі 45 від температури (t , °C) та тривалості борування (τ , год) – рівняння 6.

$$d = 1619,9443 - 4,4183 \cdot t - 61,9167 \cdot \tau + 0,0029 \cdot t^2 - 2,4167 \cdot \tau^2 + 0,1175 \cdot t \cdot \tau \quad (6)$$

Значення скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2_{adj} = 0,9904$ вказує на те, що розроблена модель охоплює 99,04% варіації товщини боридного шару в досліджуваному діапазоні умов борування, що є переконливим свідченням її точності та адекватності експериментальним даним.

Графічна візуалізація у вигляді тривимірної поверхні відгуку (рис. 3) є наочним підтвердженням експоненційної залежності товщини боридного шару від температури та параболічної – від часу борування.

Розподіл мікротвердості за перерізом зразків сталі 45, що пройшли борування при трьох різних температурах з тривалістю витримки 4 години, наведено на рисунку 4.

Отриманий профіль твердості наочно відображає зональну будову поверхневого шару. У границях боридної зони мікротвердість змінюється від ~20 ГПа на зовнішній поверхні до ~16 ГПа на її внутрішній границі. Максимальне значення твердості (~20 ГПа) властиве зовнішньому шару боридної зони, утвореному фазою FeB, тоді як внутрішня частина, представлена фазою Fe₂B, демонструє дещо нижчий рівень твердості – близько 16 ГПа.

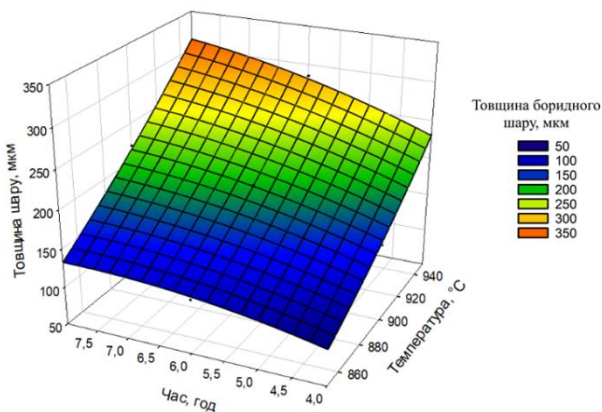


Рис. 3 – Графічне зображення поверхні відгуку для регресійного рівняння товщини боридного шару

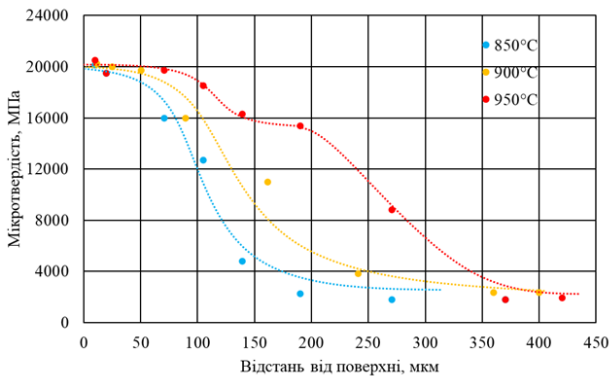


Рис. 4 – Розподіл мікротвердості по товщині боридного шару сталі 45 (борування протягом 4 години)

За границею боридного шару, у напрямку до серцевини матеріалу, твердість різко знижується. Ця ділянка відповідає перехідній зоні зі зменшеною концентрацією бору, де присутній лише його твердий розчин у залізі, а також спостерігається підвищений вміст вуглецю, витісненого з поверхні в процесі борування. Падіння твердості в цій зоні відбувається стрімко: вже на глибині 20–50 мкм від границі боридної зони вона знижується з приблизно 16 ГПа до 5–6 ГПа. У зоні 200–300 мкм від поверхні (залежно від температурного режиму борування) твердість виходить на рівень,

характерний для сталі 45 після нагріву та наступного охолодження на повітрі.

Порівняльний аналіз профілів мікротвердості для зразків, оброблених при різних температурах, виявляє спільну тенденцію: поверхнева твердість у боридній зоні залишається практично незмінною незалежно від температурно-часових параметрів борування. Зазначене свідчить про те, що на мікротвердість боридної зони середньовуглецевих сталей не справляють суттєвого впливу ні температурний режим, ні тривалість борування. Цей факт свідчить про те, що для сталей типу сталі 45 визначальним чинником мікротвердості боридної зони є її фазовий склад (FeB/Fe₂B), а не режим обробки.

Результати та їх обговорення

Отримані в ході дослідження результати дозволяють зробити низку важливих узагальнень щодо фізичних механізмів формування боридних шарів на сталі 45 та їх практичного значення.

Підтвердження параболічного закону кінетики росту боридного шару свідчить про те, що визначальним механізмом процесу є об’ємна дифузія бору крізь вже сформований шар, а не реакція на границі розподілу або дифузія по поверхні. Це узгоджується з класичною теорією дифузійного росту фаз і підтверджується лінійністю залежності товщини шару від квадратного кореня часу насичення для всіх досліджуваних температур.

Визначена енергія активації дифузії бору в сталі 45 ($Q = 193,0$ кДж/моль) є помітно вищою, ніж для армо-заліза (~157 кДж/моль [7]), і дещо перевищує літературні дані для сталі AISI 1045 (~186,0 кДж/моль [1]). Ця закономірність має чітке фізичне пояснення: присутні у складі сталі 45 вуглець, а також кремній та марганець, створюють поля пружних напружень у кристалічній ґратці заліза та стають додатковими перешкодами для дифузійних стрибків атомів бору, підвищуючи енергетичний бар’єр процесу. Таким чином, простежується чітка тенденція: зі зростанням вмісту вуглецю та легуючих елементів у сталі енергія активації дифузії бору збільшується, що призводить до відносного уповільнення росту шару при однакових температурних режимах. Ця закономірність має важливе значення при виборі температури борування для різних марок сталей.

Домінуючий вплив температури на товщину боридного шару, підтверджений дисперсійним аналізом (частковий ета-квадрат 0,9812), є прямим наслідком експоненційної залежності коефіцієнта дифузії від температури згідно з рівнянням Арреніуса. Важливий практичний висновок з цього: для отримання товстого зміцненого шару за мінімальний час значно ефективніше підвищити температуру процесу, ніж збільшувати тривалість витримки. Це дозволяє не лише скоротити виробничий цикл, але й зменшити енергетичні витрати та ризик надмірної деформації деталей.

Пилкоподібна морфологія боридного шару, що формується на сталі 45, має двоїсту природу. З одного боку, вона забезпечує надійне механічне зчеплення шару з основою (подібно до «ластівчиного хвоста»), що суттєво підвищує адгезійну міцність і знижує ризик відшарування в умовах ударних навантажень. З іншого боку, надмірно розвинута зубчаста границя розподілу може виступати концентратором напружень, знижуючи опір втомі. Тому при проектуванні технологічних режимів борування слід враховувати не лише необхідну товщину шару, а й характер умов навантаження деталі при експлуатації.

Незначний вплив температурно-часових параметрів процесу борування на мікротвердість боридного шару є важливим практичним результатом. Це дає змогу технологу вільно варіювати температуру і час насичення для досягнення необхідної товщини боридного шару, не побоюючись погіршення твердості поверхні. Разом з тим слід зазначити, що переважання фази FeV у зовнішній частині шару, яка має вищу твердість, але є більш крихкою, може бути небажаним для деталей, що працюють в умовах ударних навантажень.

Розроблена регресійна модель другого порядку зі скоригованим коефіцієнтом детермінації 0,9904 є надійним інструментом для прогнозування товщини боридного шару в границях дослідженого факторного простору: температури 850–950°C та тривалості 4–8 годин. Проте важливо наголосити на її емпіричному характері. Екстраполяція результатів за межі цього діапазону є некоректною, оскільки при нижчих температурах кінетика може сповільнюватися через недостатню активацію процесу, а при триваліших витримках можливе поступове зниження активності борвмісних складових насичуючого середовища або спікання порошку, що призведе до відхилення від параболічної залежності.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення факторного простору та вивчення впливу складу насичуючої суміші на кінетику процесу.

Висновки

У ході комплексного дослідження було встановлено кількісні закономірності порошкового насичення бором сталі 45, що дозволило отримати такі основні результати:

1. Борування сталі 45 при температурах 850–950°C забезпечує формування двофазного боридного шару FeV/Fe₂B з характерною зубчастою морфологією, яка сприяє надійній механічній адгезії до основного металу. Зі зростанням обох технологічних параметрів, температури та тривалості борування, спостерігається потовщення шару та збільшення глибини дифузійної зони.

2. Встановлено, що кінетика росту боридного шару на сталі 45 описується параболічним законом дифузії. Експериментально встановлено фундаментальні кінетичні параметри дифузії бору в досліджуваній

системі: енергія активації $Q = 193,0$ кДж/моль та коефіцієнт частоти $D_0 = 6,69 \cdot 10^{-4}$ м²/с, значення яких узгоджуються з літературними даними для подібних систем.

3. Температура насичення бором є визначальним фактором впливу на товщину боридного шару. Результати статистичного аналізу засвідчили значно більший вплив температури ($\eta^2 = 0,9812$) порівняно з тривалістю борування ($\eta^2 = 0,8854$), що обґрунтовує доцільність керування насамперед температурним режимом для досягнення необхідної товщини шару.

4. Застосування методу поверхні відгуку дозволило побудувати емпіричну регресійну модель другого порядку, що описує залежність товщини боридного шару на сталі 45 від температурного режиму борування та часу насичення. Значення скоригованого коефіцієнта детермінації $R^2_{adj} = 0,9904$ підтверджує виняткову адекватність моделі та обґрунтовує можливість її застосування у технологічному проектуванні в границях розглянутого діапазону параметрів.

Перелік використаних джерел

- [1] Matijević B. Evaluation of Boride layer growth on carbon steel surfaces. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. Vol. 56. Pp. 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. Pp. 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. Pp. 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. Pp. 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. Pp. 159–165. DOI: <https://doi.org/10.24425/118923>.
- [6] Kayali Y. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace. *Vacuum*. 2015. Vol. 121. Pp. 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. Pp. 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. Pp. 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. Pp. 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. Pp. 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.jmatproc.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. Pp. 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. Pp. 76–81.
- [14] Dybkov V. I. Basics of Formation of Iron Boride Coatings. *Journal of Mineral, Metal and Material Engineering*. 2016. Vol. 2. Pp. 30–46.
- [15] A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels / I. Uslu et al. *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. Pp. 1819–1826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.04.019>.

KINETICS STUDY OF BORONIZING ON MEDIUM-CARBON STEEL

Barmin O.Y.

PhD (Engineering), associate professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-7596>, e-mail: axel.com.ua@gmail.com;

Hryhorieva S.V.

engineer, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2589-7729>, e-mail: kapuchinka84@gmail.com

The article investigates the patterns of boride coating development on steel 45 under powder-pack boriding conditions and examines how processing temperature and saturation time affect coating architecture, microhardness, and diffusion kinetics. **Purpose.** The study aims to quantify the relationships governing boride coating formation on structural steel 45, assess the individual and combined effects of temperature and saturation time on coating architecture and surface hardness, and construct a predictive mathematical model for coating thickness as a function of process variables. **Methods.** Steel 45 specimens were borided in a mixture of boron carbide, potassium tetrafluoroborate, and aluminum oxide at 850, 900, and 950°C with holding times of 4, 6, and 8 hours, with a minimum of 50 measurements per specimen. Growth kinetics were described by the parabolic diffusion law and the Arrhenius equation. Statistical analysis applied analysis of variance and regression analysis within the Response Surface Methodology framework. **Results.** Boriding produces a layer with sawtooth morphology. Layer thickness increases from 102 to 308 μm. Activation energy of 193.0 kJ/mol and frequency factor of $6.69 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ were determined. Microhardness of the boride zone reaches 16–20 GPa and is governed by phase composition. A second-order regression model describes layer thickness with an adjusted coefficient of determination of 0.9904. **Scientific novelty.** For the first time for steel 45, a complete set of boron diffusion kinetic parameters has been determined and a regression model developed that quantitatively links boride layer thickness to temperature and treatment duration with an approximation accuracy of 99.04%. **Practical significance.** The model serves as a ready-to-use engineering tool for calculating boriding conditions for steel 45 without additional experiments and is applicable to the production of wear-resistant components without transitioning to more expensive materials.

Keywords: boriding; boride layer; growth kinetics; activation energy; microstructure; regression model.

References

- [1] B. Matijević, “Evaluation of Boride layer growth on carbon steel surfaces,” *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 56, pp. 269–273, 2014. doi: [10.1007/s11041-014-9744-7](https://doi.org/10.1007/s11041-014-9744-7)
- [2] T. Balusamy, T. S. N. Sankara Narayanan, K. Ravichandran, I. Song Park, and M. H. Lee, “Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment,” *Vacuum*, vol. 97, pp. 36–43, 2013. doi: [10.1016/j.vacuum.2013.04.006](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.04.006)
- [3] P. Jurci and M. Hudakova, “Characterization of microstructure and fracture performance of boronized H11 grade hot-work tool steel,” *Materials Performance and Characterization*, vol. 9, pp. 339–357, 2020. doi: [10.1520/MPC20190086](https://doi.org/10.1520/MPC20190086)
- [4] M. Ortiz-Dominguez, M. A. Flores-Rentería, M. Keddam, M. Elias-Espinosa, O. Damian-Mejía, J. I. Aldana-González, J. Zuno-Silva, S. A. Medina-Moreno, and J. G. González-Reyes, “Simulation of growth kinetics of Fe₂B layers formed on gray cast iron during

- the powder-pack boriding,” *Materials and Technology*, vol. 48, pp. 905–916, 2014.
- [16] M. S. Karakas, A. Gunen, E. Kanca, and E. Yilmaz, «Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders,” *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 63, pp. 159–165, 2018. doi: **10.24425/118923**.
- [5] Y. Kayali, “Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace,” *Vacuum*, vol. 121, pp. 129–134, 2015. doi: **10.1016/j.vacuum.2015.08.006**
- [6] I. Campos-Silva, M. Ortiz-Domínguez, H. Cimenoglu, R. Escobar-Galindo, M. Keddam, M. Elías-Espinosa, and N. López-Perrusquia, “Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron,” *Surface Engineering*, vol. 27, pp. 189–195, 2011. doi: **10.1179/026708410X12550773057820**
- [7] S. Sen, U. Sen, and C. Bindal, “An approach to kinetic study of borided steels,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 191, pp. 274–285, 2005. doi: **10.1016/j.surfcoat.2004.03.040**
- [8] I. Campos, R. Torres, G. Ramírez, R. Ganem, and J. Martínez, “Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis,” *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 8662–8667, 2006. doi: **10.1016/j.apusc.2005.12.002**
- [9] O. Allaoui, N. Bouaouadja, and G. Sainderran, “Characterization of boronized layers on a XC38 steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 3475–3482, 2006. doi: **10.1016/j.surfcoat.2006.07.238**
- [10] M. A. Béjar and E. Moreno, “Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 352–358, 2006. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2005.12.006**
- [11] E. Yalamaç, I. Türkmen, and Ö. Firtina, “Characterization and kinetic analysis of iron boride layer formed on the GGG 70 ductile cast iron,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 74, pp. 1701–1711, 2021. doi: **10.1007/s12666-021-02249-y**
- [12] J. L. Arguelles-Ojeda, A. Márquez-Herrera, A. L. Saldaña-Robles, A. Saldaña-Robles, M. A. Corona-Rivera, and J. Moreno-Palmerin, “Hardness optimization of boride diffusion layer on ASTM F-75 alloy using response surface methodology,” *Revista Mexicana de Física*, vol. 63, pp. 76–81, 2017.
- [13] V. I. Dybkov, “Basics of Formation of Iron Boride Coatings,” *Journal of Mineral, Metal and Material Engineering*, vol. 2, pp. 30–46, 2016.
- [14] I. Uslu, H. Comert, M. Ipek, F. G. Celebi, O. Ozdemir, and C. Bindal, “A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels,” *Materials & Design*, vol. 28, pp. 1819–1826, 2007. doi: **10.1016/j.matdes.2006.04.019**

Стаття надійшла 15.02.2026

Стаття прийнята 17.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Бармін О. Є., Григор’єва С. В. Дослідження кінетики борування на середньовуглецевій сталі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2026. Вип. 53, том 1. С. 145–153. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359798>.