

УДК 621.785.539

С.М. Чернега, І.А. Поляков, М.О. Красовський, А.Г. Мазняк*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***СТРУКТУРА КОМПЛЕКСНИХ БОРИДНИХ ПОКРИТТІВ, СФОРМОВАНИХ В РІЗНИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ УМОВАХ**

В даній роботі проведено дослідження з формування комплексних дифузійних боридних шарів порошковим методом на сталях в умовах дії зовнішнього магнітного поля. Встановлено, що при застосуванні зовнішнього магнітного поля (ЗМП) в 1,5 – 2 рази зменшується тривалість насичення деталей та формується суцільний, однорідний боридний шар, товщина якого в 2 рази вища, ніж при боруванні без ЗМП.

Ключові слова: покриття, борування, боридний шар, дифузія, фаза, магнітне поле.

Рис. 6. Табл. 1. Літ. 15.

С.М. Чернега, І.А. Поляков, М.А. Красовський, А.Г. Мазняк**СТРУКТУРА КОМПЛЕКСНЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ В РАЗНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

В данной работе проведено исследование по формированию комплексных диффузионных боридных слоев порошковым методом на сталях в условиях действия внешнего магнитного поля. Установлено, что применение внешнего магнитного поля (ВМП) приводит к интенсификации диффузионного насыщения в 1,5 – 2 раза и формированию сплошного однородного диффузионного слоя с толщиной в 2 раза выше чем без магнитного поля.

Ключевые слова: покрытие, борирование, боридных слой, диффузия, фаза, магнитное поле.

S.M. Chernega, I.A. Poliakov, M.A. Krasovskyi, A.G. Mazniak**STRUCTURE OF COMPLEX BORIDE COATINGS, FORMED IN DIFFERENT PHYSICAL-CHEMICAL CONDITIONS**

In this paper, a study was made of the formation of complex diffusion boride layers by the powder method on steels under the action of an external magnetic field. It has been established that the use of an external magnetic field (VMP) leads to an intensification of diffusion saturation by a factor of 1.5 - 2, and the formation of a continuous uniform diffusion layer with a thickness 2 times higher than without a magnetic field.

Keywords: coating, boriding, boride layer, diffusion, phase, the magnetic field.

Постановка проблеми. Одним з методів інтенсифікації процесу ХТО є застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП), що дозволяє пришвидшити процеси дифузії та утворення дифузійних шарів. Оскільки вивчення змін структури, фазового та хімічного складу, а також зносостійкості та інших фізико-механічних характеристик покриттів сформованих на сталях та сплавах під дією магнітного поля є одним із напрямків металознавства та термічної обробки металів, то можна стверджувати, що зазначені дослідження дадуть можливість отримувати комплексні зносостійкі покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які представляють значний інтерес для промисловості [1-10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що проведення хіміко-термічної обробки в умовах накладання зовнішнього магнітного поля є перспективним напрямком проте в літературі практично відсутні дані по застосуванню комплексного насичення бором та міддю з одночасною дією магнітного поля.

Постановка задач. Для вирішення цієї задачі в роботі застосовували дифузійне комплексне насичення поверхневого шару сталей бором чи бором та міддю при одночасній дії ЗМП.

Метою даної роботи було дослідження структури дифузійних боридних та бороміднених покриттів на вуглецевих сталях, отриманих в різних фізико – хімічних умовах, а саме: проведення насичення без застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП) та при його одночасному накладанні.

Виклад основного матеріалу.

Для проведення ХТО в умовах дії ЗМП використовували спеціально розроблену установку. Схема установки для ХТО в умовах дії ЗМП представлена на рис. 1. [142–143].

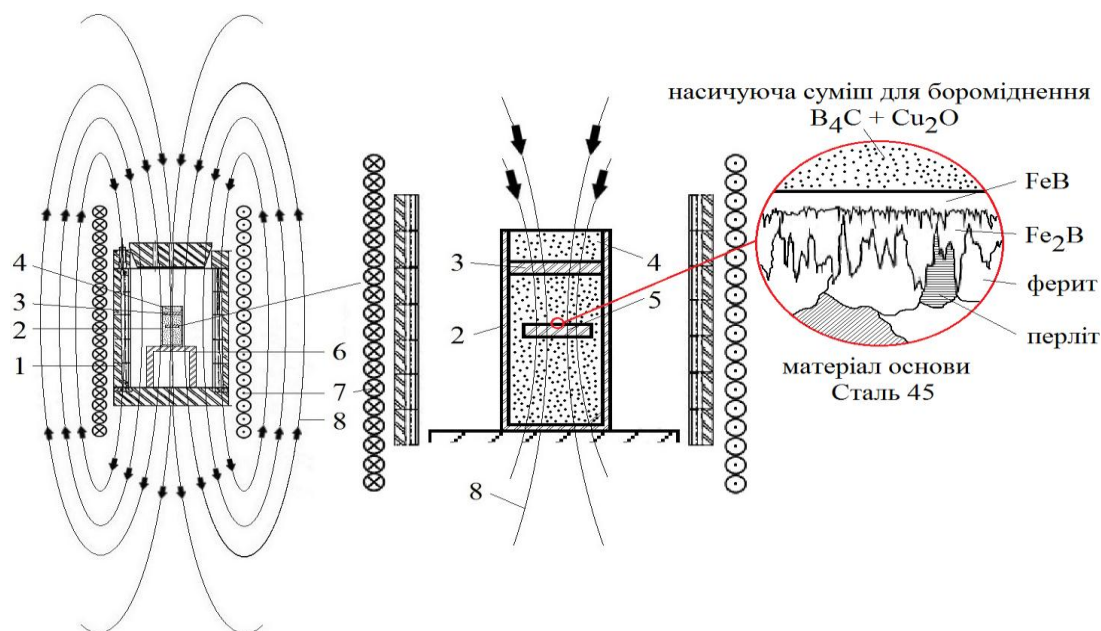


Рис. 1. - Схема установки для ХТО в умовах дії ЗМП:

- 1 – високотемпературна шахтна електропечі типу СШОЛ 1.6.3/11, 2 – тигель, 3 – азбестова прокладка; 4 – натрійсилікатне скло (плавкий затвор),
5 – зразок, 6 – керамічна підставка, 7 – соленоїд, 8 – силові лінії навколо соленоїда

Установка складається з наступних частин: шахтної електропечі типу СШОЛ 1.6,3/11 (параметри робочого простору печі: \varnothing – 160 мм, h – 300 мм), регулятора температури, термомпари, соленоїда, джерела живлення соленоїда, діодного мосту та вентилятора.

Для створення ЗМП використовують соленоїд із внутрішнім діаметром 295 мм та висотою 450 мм. Соленоїд складається із 635 витків шини алюмінієвого сплаву, розміром 10x20 мм; сила струму, яку подають на діодний міст становить 70 – 75 А. В результаті проходження струму через витки соленоїда виникає магнітна індукція величиною 35–45 мТл (44–57 кА/м). Для живлення соленоїду застосовували джерело трансформаторного типу.

Для запобігання перегріву соленоїда, його охолоджують за допомогою вентилятора, який розміщують під соленоїдом.

Розрахунок напруженості магнітного поля котушки соленоїда виконують за формулами:

$$H_i = \frac{I \cdot n}{l} \quad H_B = \frac{B}{\mu_0 \mu} \quad (2.3)$$

де H_i – напруженість магнітного поля, що розрахована за силою струму в котушці соленоїда; H_B – напруженість магнітного поля, що розрахована за магнітною індукцією; I – сила струму в котушці; n – число витків котушки; l – довжина (висота) котушки, мм; B – магнітна індукція; μ_0 магнітна стала, Гн/м; μ – відносна магнітна проникливість середовища.

При нагріванні тиглів до 975 °С в борувальній суміші на поверхні деталей утворюється плівка з V_2O_3 у розплавленому стані. Ця плівка слугує джерелом двох- та тривалентних іонів бору, які мають свої магнітні моменти.

Дифузійне масоперенесення іонів бору до основного фронту реакції на сталевій матриці призводить до утворення осередків фази Fe_2B при досягненні концентрації бору 33 ат. % в залізі, якими поступово заростає вся сталева поверхня. При зростанні концентрації В до 49 ат. % утворюються осередки фази FeB, які поступово поширюються по поверхні фази Fe_2B . Наступне вростання фази Fe_2B в сталеву матрицю пов'язане з дифузією іонів бору через фазу FeB.

Металографічним аналізом встановлено, що при застосуванні ЗМП змінюється морфологія боридних шарів, гольчатість зерен різко зменшується, зникають окремо пророслі в матрицю зерна боридів (рис.1 – рис. 1.6). Гольчаті зерна боридних фаз щільно прилягають один до одного та формується суцільний, однорідний боридний шар, товщина якого у 1,5 – 2 рази вища, ніж при боруванні без ЗМП за однакової тривалості насичення деталей.

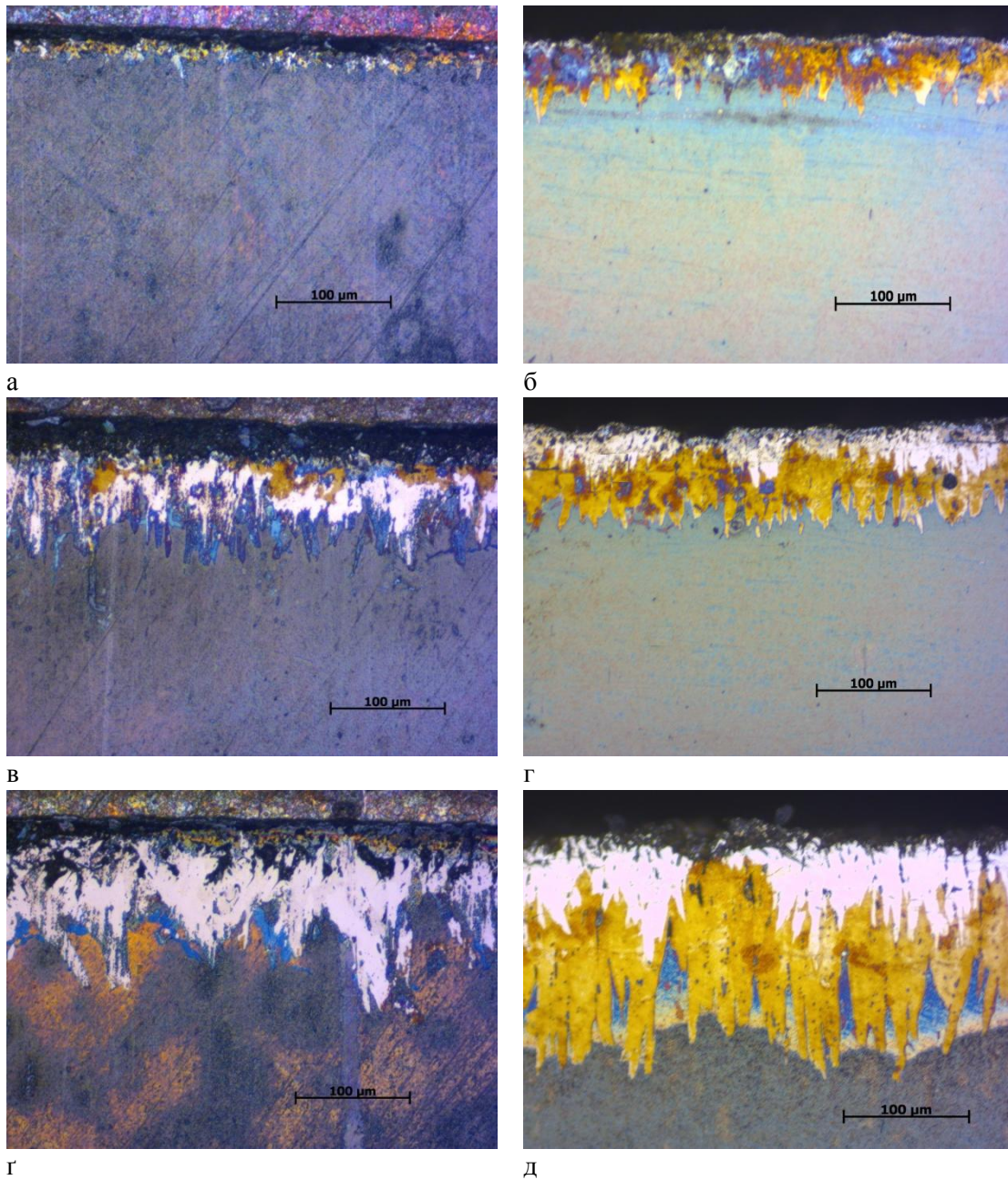
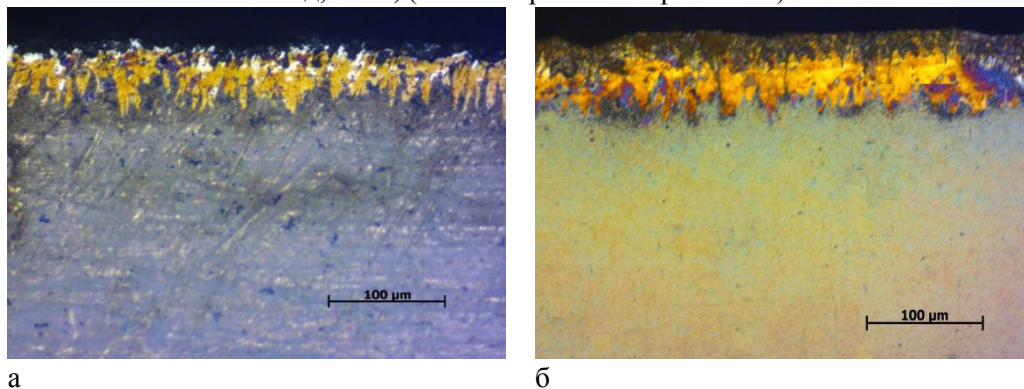


Рис. 2. - Мікроструктури комплексних боридних покриттів на сталі 45, отриманих в різних фізико-хімічних умовах:

а – борування без дії ЗМП, тривалість насичення 1 год, x200; б – борування в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 30 хв, x200; в – борування без дії ЗМП, тривалість насичення 2 год, x200; г – борування в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 1 год, x200; д – борування без дії ЗМП, тривалість насичення 4 год, x200; е – борування в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 2 год, x200, (теплове травлення при 400 °С)



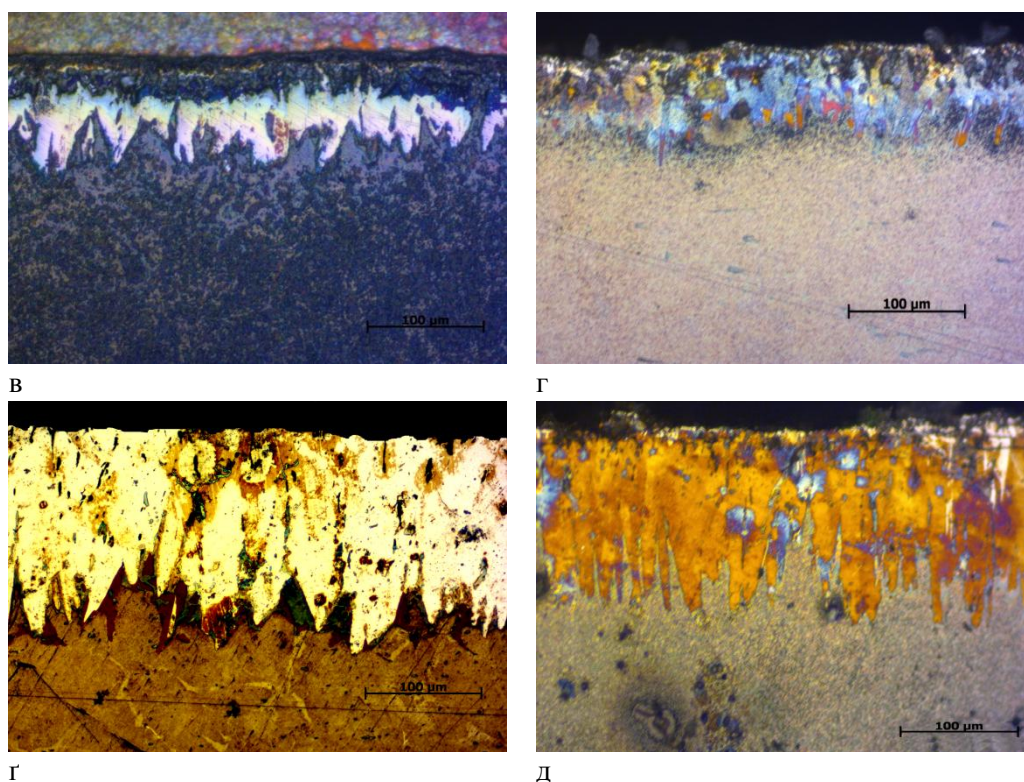


Рис. 3. - Мікроструктури комплексних боридних покриттів на сталі 45, отриманих в різних фізико-хімічних умовах:

- а – комплексне насичення бором та міддю без дії ЗМП, тривалість насичення 1 год, x200; б – комплексне насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 30 хв, x200; в – комплексне насичення бором та міддю без дії ЗМП, тривалість насичення 2 год, x200; г – комплексне насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 1 год, x200; г – комплексне насичення бором та міддю без дії ЗМП, тривалість насичення 4 год, x200; д – комплексне насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, тривалість насичення 2 год, x200, (теплове травлення при 400 °С)

Як відомо магнітне поле (МП) – складова електромагнітного поля, яка створюється змінним у часі електричним полем, рухомими електричними зарядами або спінами заряджених частинок. Магнітне поле спричиняє силову дію на рухомі електричні заряди (сила Лоренца). В нашому випадку магнітне поле взаємодіє з власними магнітними моментами іонів бору, що і спричиняє направлений рух іонів бору до сталюї поверхні матеріалу, що насичується, та прискорює утворення боридних фаз FeB та Fe_2B . Ймовірно, магнітне поле спричиняє деяке зміщення в розташуванні спінів в атомах решітки аустеніту, а це впливає на ефективний радіус атома аустеніту і, як наслідок, може приводити до незначного розширення пор в кристалічній ґратці. Останнє в свою чергу зменшує енергію активації для дифузійного проникнення атомів бору в глибші шари сталюї матриці.

В системі $Fe - B$ масоперенесення елементів здійснюється переважно шляхом дифузії бору через боридний шар до основного фронту реакції, розташованому на міжфазних границях залізо – борид Fe_2B і борид Fe_2B – борид FeB . При формуванні дифузійного шару на поверхні металу по досягненні граничного насичення бором твердого розчину (γ) спочатку виникає зародок, а потім голки тетрагонального бориду Fe_2B ($a = 5,109 \text{ \AA}$, $c = 4,249 \text{ \AA}$ і $c/a = 0,832 \text{ \AA}$), що містить 8,84% В, густина якого складає $7,336 \text{ г/см}^3$.

Голки тетрагонального бориду ростуть поступово замикаючись в суцільний шар боридів Fe_2B . Потім на поверхні боридного шару виникають відокремлені голки, а після цього утворюється другий шар ромбічного бориду FeB , котрий має густину $6,706 \text{ г/см}^3$ ($a = 5,506 \text{ \AA}$, $b = 4,061 \text{ \AA}$ і $c = 2,952 \text{ \AA}$), що містить 16,25% В. Застосування магнітного поля призводить до розрихлювання ґратки і швидшому проникненню атому В в кристалічну ґратку Fe.

Проведено дослідження кінетики росту боридних шарів в різних фізико-хімічних умовах. Встановлено, що після дифузійного насичення в борувальній суміші протягом 4 годин без ЗМП отримуємо покриття, товщина яких складала 125–160 мкм, тоді, як при накладанні ЗМП

формується покриття товщиною 160–200 мкм за 2 години; при боромідненні протягом 4 годин без ЗМП формуються покриття товщиною 165–200 мкм, тоді, як при боромідненні в умовах дії ЗМП за 2 години дифузійного насичення виростають боридні фази товщиною 180–225 мкм (рис. 4.7 та рис. 4.8) [172–174].

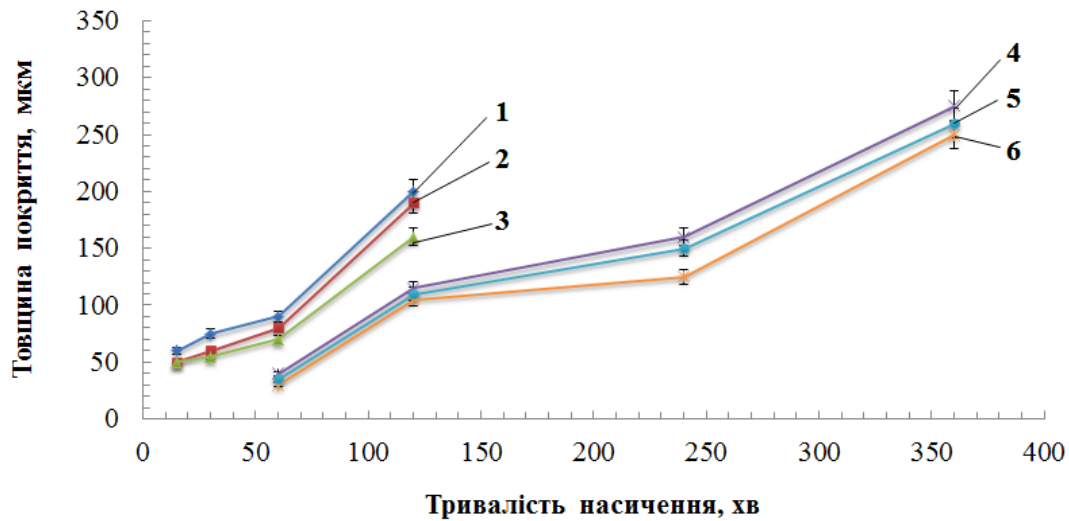


Рис. 4. - Кінетичні криві росту боридних покриттів, отриманих після:

1 – борування із застосуванням ЗМП, сталь 20; 2 – борування із застосуванням ЗМП, сталь 45; 3 – борування із застосуванням ЗМП, У10; 4 – борування без застосуванням ЗМП, сталь 20; 5 – борування без застосуванням ЗМП, сталь 45; 6 – борування без застосуванням ЗМП, У10

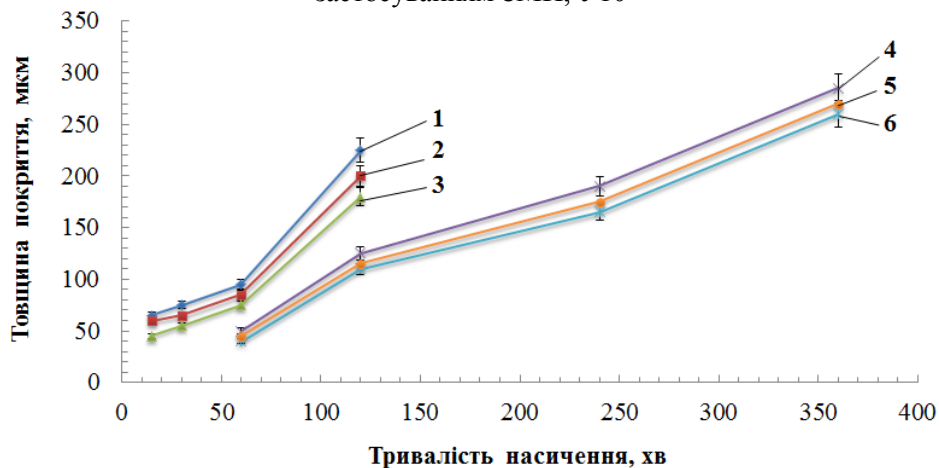


Рис. 5. - Кінетичні криві росту боридних покриттів, отриманих після:

1 – комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, сталь 20; 2 – комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, сталь 45; 3 – комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП, У10; 4 – комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП, сталь 20; 5 – комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП, сталь 45; 6 – комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП, У10.

В роботі згідно рівняння Ареніуса [15] $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ розраховано, що при дифузійному

боруванні без дії ЗМП енергія активації бору становить 89 кДж/моль. Накладання магнітного поля призводить до зменшення величини енергії активації бору і при боруванні з одночасною дією ЗМП вона становить 72 кДж/моль.

Енергія активації міді при боромідненні без дії ЗМП становить 177 кДж/моль, тоді як накладання магнітного поля призводить до зменшення E_a – 155 кДж/моль.

Висновки. В даній роботі досліджено структуру і кінетику росту боридних покриттів отриманих після комплексного насичення вуглецевих сталей бором та міддю із застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП). Даний метод нанесення боридних покриттів дозволяє 1,5 – 2 рази зменшити тривалість насичення деталей та отримати покриття з високою твердістю. При застосуванні ЗМП змінюється морфологія боридних шарів, гольчатість зерен різко зменшується,

зникають окремо пророслі в матрицю зерна боридів. Гольчаті зерна боридних фаз щільно прилягають один до одного та формується суцільний, однорідний боридний шар, товщина якого в 2 рази вища, ніж при боруванні без ЗМП

Список використаних джерел:

1. Кухарева Н.Г. Борирование углеродистых и легированных сталей в кипящем слое / Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Н.А. Галынская, В.Ф. Протасевич, Т.Н. Смирнова // Наука и Техника. – № 5. – 2012. – С. 11 – 17.
2. Костик В.О. Формирование микроструктуры борированного слоя на поверхности углеродистой конструкционной и инструментальной сталях из обзоров при печном нагреве / В.О. Костик, О.В. Сапуцкая, Е.А. Костик // Харьков: Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 17. – № 5/1. – 2005. – С. 63 – 68.
3. Чернега С.М. Комплексне насичення вуглецевої сталі бором і міддю / С.М. Чернега, І.А. Поляков, М.А. Красовський // Луцький національний технічний університет «Наукові нотатки». – 2015. – Вип. 49. – С. 165–171.
4. Похмурский В.И. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий / В.И. Похмурский, В.Б. Далисов, В.М. Голубец. – К.: Наук. думка, 1980. – 188 с.
5. Бернштейн М.Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М.Л. Бернштейн, В.Н. Пустовой. – М.: Машиностроение, 1987. – 254 с.
6. Иванцов А.Е. Бориды: Тематическая консультация для студентов механических специальностей / А.Е. Иванцов, Г.А. Рожкова. – Казань: Казанский государственный технологический университет, 2006. – 19 с.
7. Самсонов Г.В. Бориды / Г.В. Самсонов, Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов. – М.: Атомиздат, 1975. – 375 с.
8. Matkovich V.I. Boron and Refractory Borides / V.I. Matkovich. – Berlin: Springer-Verlag, 1977. – 656 pp. – ISBN 978 – 3 – 642 – 66622 – 3.
9. Amberger E. Boron: Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry, Supplement Vol. 2: Elemental Boron. Boron Carbides / E. Amberger, W. Stumpf. – Berlin: Springer, 1981. – 242 pp.
10. David R.L. CRC handbook of chemistry and physics / Lide R. David, Boca Raton. – CRC Press: Taylor and Francis Group, 2008. – 89th edition. – 2736 pp. – ISBN 978 – 1420066791.
11. Пат. 83894 України, МПК С23С 8/00. Склад порошкової суміші для бороміднення сталевих виробів / С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. Ю. Медова ; заявники і патентовласники С. М. Чернега, І. А. Поляков, І. Ю. Медова. – № u201215001 ; заявл. 27.12.2012 ; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19.
12. Пат. 109189 України, МПК С23С 8/70. Склад для бороміднення сталевих виробів / П. І. Лобода, С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський ; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201603094 ; заявл. 25.03.2016 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.;
13. Пат. 108781 України, МПК С23С 8/68, В05D 5/00. Спосіб борування сталевих виробів / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, В. Д. Кузнецов; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201601924 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.
14. Пат. 109188 України, МПК С23С 8/70, В05D 5/00. Спосіб бороміднення сталевих виробів / С. М. Чернега, І. А. Поляков, М. О. Красовський, В. Д. Кузнецов ; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201603093 ; заявл. 25.03.2016 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15.
15. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. Курс лекций / Б. С. Бокштейн. – М.: Институт стали и сплавов, 1973. – 64 с.