

# Исследование кинетики борирования и его влияния на структуру и механические свойства стали 16MnCr5

АДНАН ДЖАЛИК<sup>1</sup>, НАЗИМ УДЖАР<sup>2</sup>, НУРЫ ЕНЫАЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Технологический факультет, Машиностроение, Университет прикладных наук Испарта, г. Испарта, Турция

<sup>2</sup> Факультет искусств и наук, отделение физики, Университет Сулеймана Демиреля, г. Испарта, Турция  
(nazimucar@sdu.edu.tr)\*

Исследована кинетика борирования низколегированной стали 16MnCr5 при 1123, 1173 и 1223 К длительностью 2, 4 и 6 ч в порошкообразных смесях с использованием агента Экабор-II для определения возможности его применения для повышения поверхностных свойств этой стали. Проведен микроструктурный анализ методами световой и электронной микроскопии, а также рентгеновской дифракции. Определены механические свойства стали, борированной при разных режимах. Показано, что рост боридного слоя во времени описывается параболической зависимостью. Определены энергия активации диффузии при борировании и предэкспоненциальный множитель, получено эмпирическое уравнение для прогнозирования толщины боридного слоя на стали 16MnCr5 в зависимости от времени и температуры борирования. Установлено, что после борирования пределы текучести и прочности стали при растяжении увеличиваются, а пластичность уменьшается. После борирования в течение 6 ч при 1223 К твердость боридного слоя составила 1940 HV<sub>0,1</sub> при твердости матрицы 401 HV<sub>0,1</sub>.

**Ключевые слова:** борирование; сталь 16MnCr5; кинетика; энергия активации; механические свойства.

## ВВЕДЕНИЕ

Легированная сталь 16MnCr5 (AISI 7131) благодаря сочетанию высокой ударной вязкости сердцевины и достаточной прочности поверхности широко используется в производстве промышленных и автомобильных компонентов, таких как шестерни, валы, коленчатые валы и т.д. [1 – 3]. Основными направлениями повышения эксплуатационных свойств этой стали являются легирование, термическая обработка (цементация) и термохимическое поверхностное упрочнение (борирование) [4 – 6]. В настоящее время для повышения ударной вязкости стали 16MnCr5 в ряде работ предлагается увеличивать содержание марганца и снижать концентрацию углерода. Однако в работе [7] показано, что уменьшение содержания C, N, Si, Cr и Mo, а также добавка Ni, Cu и Mn существенно снижают твердость и прочность легированных сталей. В связи с этим в качестве альтернативного способа повышения комплекса механических свойств стали 16MnCr5 используется термическая обработка. В работе [4] показано, что после цементации микротвердость этой стали достигает значений 720 HV, а предел прочности при растяжении  $\sigma_b = 387$  МПа. В работе [1] установлено, что твердость и износстойкость науглероженной и затем об-

работанной при криогенных температурах стали 16MnCr5 возрастают, а ударная вязкость снижается.

Борирование, как и цементация, широко применяется в промышленности для увеличения срока службы, снижения коэффициента трения, а также повышения износстойкости и коррозионной стойкости сталей при сохранении высоких механических свойств [8 – 10]. Однако, несмотря на многочисленные исследования структуры и свойств низколегированной стали 16MnCr5 [1, 2, 4, 11, 12], подробных исследований влияния борирования на свойства этой стали в литературе очень мало. В работе [13] исследовали влияние непрерывного и прерывистых режимов борирования на свойства стали 16MnCr5. Установлено, что борирование оказывает очень сильное влияние на твердость и микроструктуру стали, причем непрерывное борирование более эффективно для повышения ее твердости.

Цель настоящей работы — подробный анализ кинетики борирования и его влияния на микроструктуру и фазовый состав поверхностного слоя, а также на механические свойства низколегированной стали 16MnCr5.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

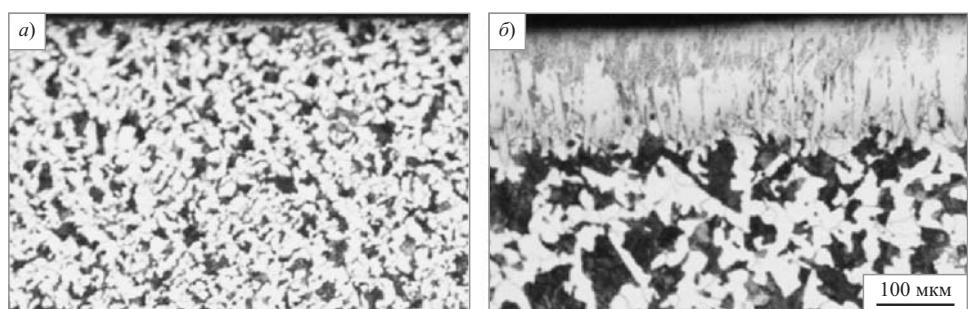
Исследовали сталь 16MnCr5 следующего химического состава, % (масс.): 0,16 C; 1,15 Mn; 0,87 Cr; 0,24 Si; 0,02 S; 0,012 P. После изготовления образцов из заготовки проводили их отжиг для снятия внутренних напряжений.

Борирование осуществляли в твердой среде — порошкообразных смесях с использованием агента

\* Adnan Calik<sup>1</sup>, Nazim Ucar<sup>2</sup> (corresponding author), Nuri Yeniay<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Mechanical Engineering, Isparta, Turkey.

<sup>2</sup> Faculty of Arts and Sciences, Physics Department, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.



**Рис. 1.** Микроструктура поперечного сечения образца стали 16MnCr5 в исходном состоянии (а) и после борирования при 1173 К, 6 ч (б)

Экабор-II при атмосферном давлении в печах электросопротивления при 1123, 1173 и 1223 К в течение 2, 4 и 6 ч. Микроструктуру отполированных и проплавленных образцов в поперечном сечении изучали на световом микроскопе, а также сканирующем электронном микроскопе JEOL 5600LV. Толщину борированного слоя определяли с помощью цифрового измерителя, подключенного к световому микроскопу (Nikon MA100). Фазовый состав слоя оценивали на рентгеновском дифрактометре (Rigaku D-MAX 2200) в медном  $K_{\alpha}$ -излучении ( $\lambda = 0,15418$  нм). Микротвердость измеряли с помощью твердомера TTS Matsuzawa HWMMT-X3 при нагрузке 100 г и времени выдержки 10 с. Испытания на статическое растяжение проводили на машине Instron Himadzu AGS-X с максимальной допустимой нагрузкой 10 кН в соответствии со стандартом ASTM-E8M на образцах с расчетной длиной 15 мм. Определяли условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел прочности  $\sigma_b$  и характеристики пластичности. Испытания на ударный изгиб по Шарпи выполняли на маятниковом копре Instron Ceast 9350 с максимальной энергией удара маятника 300 Дж в соответствии со стандартом ASTM-E23.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

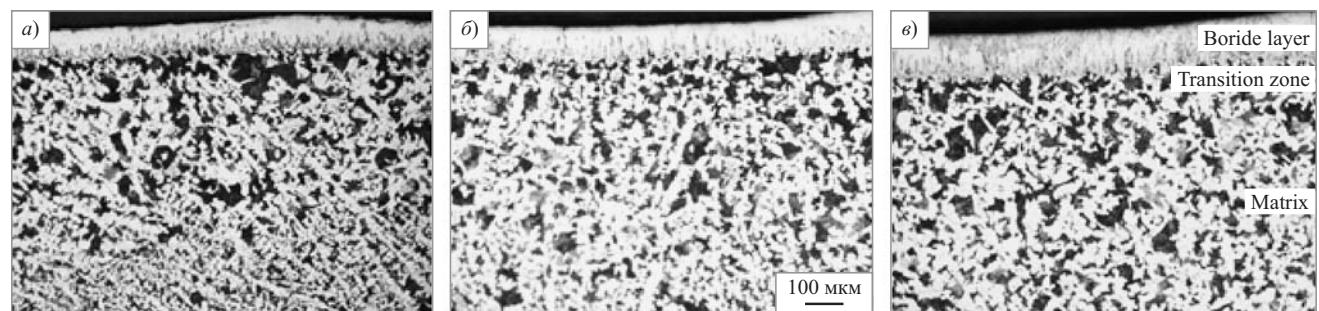
На рис. 1 показана структура стали 16MnCr5 в исходном состоянии и после борирования при 1173 К в течение 6 ч. В исходном состоянии структура стали состоит из феррита (светлая матрица) и перлита (темные включения). В результате борирования на поверхности стали формируется плотный одно-

родный боридный слой и наблюдается укрупнение структурных составляющих — феррита и перлита.

На рис. 2 и 3 показаны поперечные сечения образцов стали после борирования по различным режимам. Изображения структуры при большем увеличении (рис. 3) подтверждают формирование на поверхности стали компактного и равномерного покрытия. Видно также, что толщина слоя боридов растет с повышением температуры и увеличением времени борирования: чем выше температура и больше время процесса, тем толще слой борида. Для каждого режима борирования определяли среднюю толщину боридного слоя по результатам 15 измерений. Наибольшая толщина боридного слоя — 159 мкм получена после обработки при 1223 К длительностью 6 ч. На рис. 4 приведены графики зависимости толщины боридного слоя от  $\sqrt{t}$ , где  $t$  — время обработки. Видно, что эта зависимость имеет параболический характер.

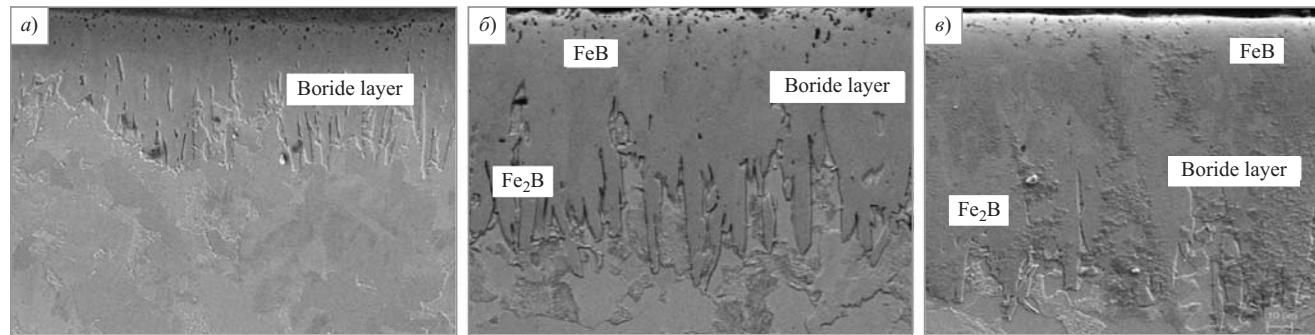
Расшифровка рентгенограмм после борирования стали 16MnCr5 показала, что основные фазы, образующиеся в поверхностном слое — FeB (у поверхности) и Fe<sub>2</sub>B (вблизи матрицы) (рис. 5). Кроме того, на рентгенограммах после борирования при 1223 К, 6 ч выявляются пики, соответствующие бориду хрома Cr<sub>2</sub>B и марганца MnB (рис. 5, б), что объясняется высоким содержанием Mn и Cr в стали.

Микротвердость измеряли в поперечном сечении образцов на разном расстоянии от поверхности вплоть до матрицы. Затем рассчитывали среднее значение микротвердости по результатам пяти измерений на каждой глубине (рис. 6). Максимальная твер-



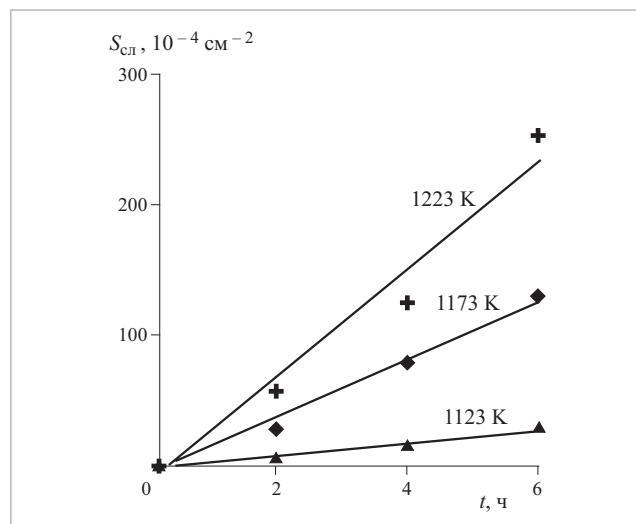
**Рис. 2.** Микроструктура стали 16MnCr5 (поперечное сечение образца) после борирования при 1223 К длительностью 2 ч (а), 4 ч (б) и 6 ч (в):

Boride layer — боридный слой; Transition zone — переходная зона; Matrix — матрица



**Рис. 3.** Структура боридных покрытий (поперечное сечение, СЭМ) на стали 16MnCr5 после борирования длительностью 6 ч при 1123 К (а), 1173 К (б) и 1223 К (в):

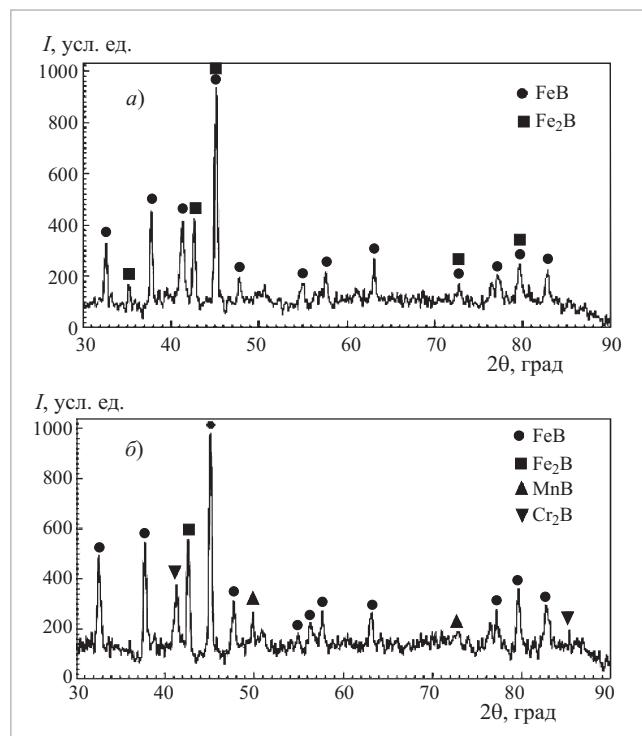
Boride layer — боридный слой



**Рис. 4.** Зависимость  $S_{\text{сл}} = f(t^{1/2})$  (где  $S_{\text{сл}}$  — квадрат толщины слоя борида,  $t$  — время борирования) для стали 16MnCr5 после борирования при различных температурах (цифры у кривых)

дость ( $1940 HV_{0,1}$ ) получена после борирования стали при 1223 К, 6 ч, что в  $\sim 5$  раз выше, чем у стали в исходном состоянии. Такое значительное повышение твердости поверхности стали связано с образованием боридов MnB и Cr<sub>2</sub>B, помимо твердых боридов железа FeB и Fe<sub>2</sub>B, а также с сильным искажением кристаллической решетки при образовании твердого раствора бора в железе. Такие же объяснения даны в исследованиях [14 – 16]. Следует отметить, что твердость исследованной борированной стали очень близка к значениям, полученным при аналогичных условиях борирования низколегированных сталей: 16MnCr5 —  $1759 HV_{0,1}$  при 1273 К, 16 ч [13]; AISI 8620 —  $1610 HV_{0,1}$  при 1210 К, 4 ч [17], AISI 4130 —  $2030 HV_{0,1}$  при 2213 К, 5 ч [18].

В таблице приведены результаты определения механических свойств стали 16MnCr5 в исходном состоянии и после борирования по разным режимам. Видно, что борирование значительно повышает прочность, но несколько снижает пластичность ста-



**Рис. 5.** Дифракторограммы поверхностного слоя стали 16MnCr5 после борирования при 1123 К, 2 ч (а) и 1223 К, 6 ч (б)

ли. Можно предположить, что эффективное влияние обработки на  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$  обусловлено не только формированием в поверхностном слое стали твердых боридов железа, но и образованием боридов Cr<sub>2</sub>B и MnB. Так, в работе [19] показано, что включения борида Fe<sub>1,1</sub>Cr<sub>0,9</sub>B<sub>0,9</sub> в структуре нержавеющей стали с высоким содержанием бора существенно повышают ее прочностные характеристики. Из таблицы также следует, что борирование увеличивает энергию разрушения при ударном изгибе стали в 2 – 4 раза в зависимости от режима обработки. Полученные результаты показывают, что за счет варьирования параметров борирования (температуры и длительности)

можно достичь оптимального сочетания механических свойств стали 16MnCr5.

Следует отметить, что в литературе можно найти противоречивые результаты исследований влияния борирования на механические свойства материалов. В некоторых случаях значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$  стали снижаются после борирования вследствие формирования твердого, но хрупкого поверхностного слоя [20, 21]. Однако в других работах [22, 23] показано, что как  $\sigma_{0,2}$ , так и  $\sigma_b$  при борировании стали возрастают, а относительное удлинение снижается.

Известно, что в основе выбора технологических параметров процесса борирования лежит знание кинетики роста поверхностного слоя. За последние двадцать лет выполнено много исследований кинетики роста боридных слоев в различных сталях [14, 24 – 27]. Установлено, что рост боридных слоев происходит в направлении диффузионного потока атомов бора перпендикулярно поверхности подложки и описывается во времени параболической зависимостью:

$$d^2 = Kt, \quad (1)$$

где  $d$  — толщина слоя борида, м;  $t$  — время борирования, с;  $K$  — константа скорости параболического роста при заданной температуре борирования,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Следовательно,  $K$ ,  $Q$  и  $T$  (К) могут быть связаны уравнением Аррениуса:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $K_0$  — коэффициент столкновений (также известный как предэкспоненциальный множитель, зависящий от потенциала бора в насыщающей среде),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $Q$  — энергия активации,  $\text{Дж}/\text{моль}$ ;  $T$  — абсолютная температура, К;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

Зависимость  $\ln K$  от обратной температуры (рис. 7) позволяет рассчитать энергию активации  $Q$  и коэффициент столкновений  $K_0$  по углу наклона кривой и его пересечению оси  $Y$  ( $y$ -intercept) соответственно. Для борирования стали 16MnCr5 эти величины составляют  $Q = 243,6 \text{ кДж}/\text{моль}$  и  $K_0 = 3,75 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ . Так как нет опубликованных дан-

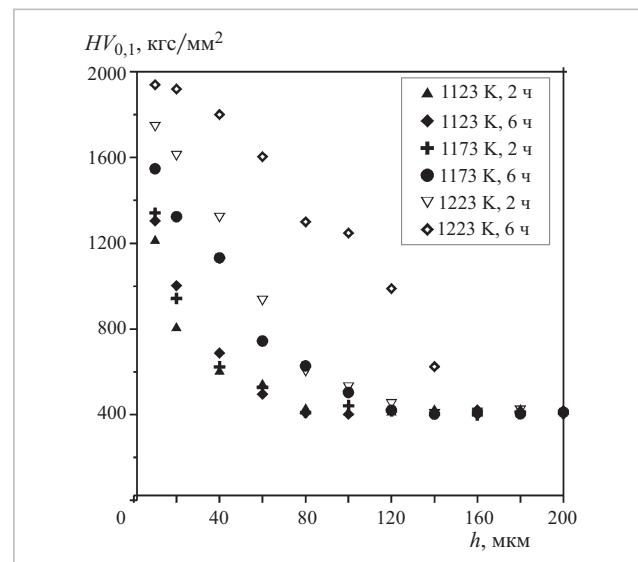


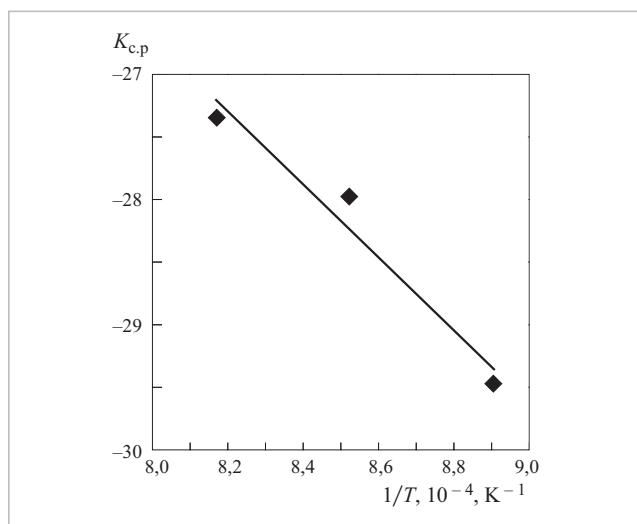
Рис. 6. Изменение микротвердости по толщине образца ( $h$  — расстояние от поверхности) стали 16MnCr5 после борирования при 1123, 1173 и 1223 К длительностью 2 и 6 ч

ных по исследованию кинетики борирования стали 16MnCr5, то сопоставить полученные значения с результатами других исследований можно лишь для сталей других марок. В литературе имеются данные для низколегированных сталей, близких по химическому составу к стали 16MnCr5. Опубликованные значения энергии активации  $Q$  для таких сталей составляют: 189,4 [28]; 215 [29]; 158,78 [30]; 194,3 [31] и 213,9 кДж/моль [32] — для борированных сталей AISI 4140 (пакетное борирование при 1123 – 1273 К), AISI 4140 (в соляной ванне при 1123 – 1223 К), AISI 4140 (в порошкообразных смесях при 1123 – 1273 К), AISI P20 (пакетное борирование при 1123 – 1223 К) и AISI P20 (с использованием микроволнового излучения при 1123 – 1223 К) соответственно. Значение  $Q = 243,6 \text{ кДж}/\text{моль}$ , рассчитанное в настоящем исследовании, несколько выше, чем в других исследованиях. Однако из сравнения приведенных данных видно, что величина  $Q$  значительно зависит от метода борирования. Кроме того, в работах [33 – 35] показано, что величина  $Q$  также изменяется в зависимости от потенциала бора насыщающей среды, химического состава материала подложки, способов подготовки его поверхности, типа и разме-

Таблица. Механические свойства стали 16MnCr5 после борирования по разным режимам

| $T, \text{ К}$  | $t, \text{ ч}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\sigma_b, \text{ МПа}$ | $\delta, \%$ | $A, \text{ Дж}$ |
|-----------------|----------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|-----------------|
| Без борирования | —              | 180                         | 440                     | 27           | 36              |
| 1123            | 6              | 300                         | 610                     | 14           | 69              |
| 1223            | 6              | 370                         | 710                     | 8            | 115             |
| 1173            | 2              | 180                         | 530                     | 21           | 51              |
| 1173            | 6              | 320                         | 670                     | 7            | 97              |

Обозначения:  $T$  — температура борирования;  $t$  — длительность борирования;  $A$  — энергия разрушения при испытаниях на удар.



**Рис. 7.** Зависимость константы скорости роста покрытия  $K_{c,p}$  на стали 16MnCr5 от обратной температуры борирования  $1/T$

ра борирующих порошков и т.д. Это объясняет различие результатов, полученных в настоящем исследовании, с данными, приведенными в других работах.

Используя рассчитанные значения  $Q$  и  $K_0$ , получаем эмпирическое уравнение для прогнозирования толщины боридного слоя в зависимости от времени и температуры борирования для стали 16MnCr5:

$$d = 19,36 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{t \exp\left(-\frac{29299,9}{T}\right)} \quad (3)$$

1123 K <  $T$  < 1223 K.

Это выражение можно использовать для назначения технологических параметров борирования стали 16MnCr5 в промышленных условиях.

## ВЫВОДЫ

1. Исследована кинетика борирования низколегированной стали 16MnCr5 при 1123, 1173 и 1223 К длительностью 2, 4 и 6 ч в порошкообразных смесях с использованием агента Экабор-II.

2. Боридный слой, образующийся на поверхности стали 16MnCr5, имеет пилообразную морфологию и однородную плотную структуру, состоит из боридов железа ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ), хрома ( $Cr_2B$ ) и марганца ( $MnB$ ). Толщина слоя изменяется от 24 до 159 мкм в зависимости от температуры и длительности борирования.

3. После борирования твердость поверхности стали возрастает в ~5 раз, пределы текучести и прочности значительно увеличиваются, а относительное удлинение несколько снижается. Энергия разрушения при испытаниях на ударный изгиб возрастает в 2–4 раза в зависимости от режима обработки.

4. Рассчитаны значения энергии активации диффузии бора  $Q = 243,6$  кДж/моль и предэкспоненциальный множитель  $K_0 = 3,75 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ , с использованием которых получено эмпирическое уравнение для прогнозирования толщины боридного слоя 16MnCr5 при заданном времени и температуре процесса, в том числе в промышленных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohan N., Arul S. Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of alloy steel 16MnCr5 // Materials Today: Proceedings. 2018. V. 5. P. 25265 – 25275.
2. Arunkumar S., Chandrasekaran M., Muthuraman V., Vinod Kumar T. Study properties and mechanical behavior of the shaft material 16MnCr5 // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 37. P. 2458 – 2461.
3. Kováč I., Mikuš R., Žarnovský J. et al. Creation of wear resistant boride layers on selected steel grades in electric arc remelting process // Kovove Mater. 2014. V. 52. P. 387 – 394.
4. Vivek Cm. Influence of carburizing and carbonitriding in 16MnCr5 to enhance mechanical properties // International Journal of Innovations in Engineering and Technology. 2016. V. 7. P. 261 – 266.
5. Litoria A. K., Figueroa C. A., Bim L. T. et al. Pack-boriding of low alloy steel: microstructure evolution and migration behavior of alloying elements // Philosophical Magazine. 2020. V. 100. P. 353 – 378.
6. Nam W. J., Choi H. C. Effect of Si on mechanical properties of low alloy steels // Materials Science and Technology. 1999. V. 15. P. 527 – 530.
7. Okkubo N., Miyakusu K., Uematsu Y., Kimara H. Effect of alloying elements on the mechanical properties of the stable austenitic stainless steel // ISIJ International. 1994. V. 34. P. 764 – 772.
8. Kara R., Colak F., Kayali Y. Investigation of wear and adhesion behaviors of borided steels // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2016. V. 69. P. 1169 – 1177.
9. Campos-Silva I. E., Rodriguez-Castro G. A. Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels // Thermochemical Surface Engineering of Steels, Improving Materials Performance. 2015. P. 651 – 702.
10. Dokumaci E., Ozkan I., Onay B. Effect of boronizing on the cyclic oxidation of stainless steel // Surface and Coatings Technology. 2013. V. 232. P. 22 – 25.
11. Yegen I., Usta M. The effect of salt bath cementation on mechanical behavior of hot-rolled and cold-drawn SAE 8620 and 16MnCr5 steels // Vacuum. 2010. V. 85. P. 390 – 396.
12. Cetinkaya C., Arabaci U. Flash butt welding application on 16MnCr5 chain steel and investigations of mechanical properties // Materials and Design. 2006. V. 27. P. 1187 – 1195.
13. Calik A., Ucar N., Kosaaslan A., Karakas S. Effect on interrupted boriding on microstructure and mechanical properties of 16MnCr5 steel // Surface Review and Letters. 2018. V. 25. P. 1 – 6.
14. Gunes I., Yildiz I. Rate of growth of boride layers on stainless steel // Oxidation Communications. 2015. V. 38. P. 2189 – 2198.
15. Treskina M. N., Dolgikh L. F. Microhardness and defectiveness of solid-solution crystals of alkali halide compounds of the system KCl–KBr // Soviet Physics Journal. 1966. V. 9. P. 17 – 19.
16. Gaber A., Afify N., El-Halawany S. M., Mossad A. Studies on Al – Mg solid solutions using electrical resistivity and microhardness measurements // The European Physical Journal Applied Physics. 1999. V. 7. P. 103 – 109.
17. Calik A., Duzgun A., Ekinci A. E. et al. Comparison of hardness and wear behaviour of boronized and carburized AISI 8620 steels // Acta Physica Polonica A. 2009. V. 116. P. 1029 – 1032.
18. Nora R., Zine T. M., Abdelkader K. et al. Boriding and boronitrocarburising effects on hardness wear and corrosion behavior of AISI 4130 steel // Revista Matéria. 2019. V. 24. P. 1 – 11.

19. *Zheng X. Q., Liu Y., Li J.* et al. Boride precipitation and mechanical behaviour of high boron stainless steel with boron and titanium additions // International Journal of Materials and Product Technology. 2015. V. 51. P. 332 – 344.
20. *Calik A., Ucar N., Delikanli K.* et al. Boride kinetics and mechanical properties of borided commercial purity nickel // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2017. V. 24. P. 362 – 368.
21. *Sultan N. M., Jauhari I., Sabri M. F. M.* Mechanical properties of superplastic thin boronised duplex stainless steel (DSS) // Materials Research Express. 2019. V. 6. P. 1 – 9.
22. *Calik A., Taylan F., Sahin O., Ucar N.* Comparison of mechanical properties of boronized and vanadium carbide coated AISI 1040 steels // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2009. V. 16. P. 326 – 330.
23. *Hou J., Fan J., Yang H., Wang Z., Oiao J.* Deformation behavior and plastic instability of boronized  $\text{Al}_{0.25}\text{CoCrFeNi}$  high-entropy alloys // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2020. V. 27. P. 1363 – 1370.
24. *Gunes I., Keddam M., Chegroune R., Ozcatal M.* Growth kinetics of boride layers formed on 99.0 % purity nickel // Bulletin of Materials Science. 2015. V. 38. P. 1113 – 1118.
25. *Keddam M., Kulka M.* Simulation of boriding kinetics of AISI D2 steel using two different approaches // Metal Science and Heat Treatment. 2020. V. 61. P. 756 – 763.
26. *Ucar N., Aytar O. B., Calik A.* Temperature bahavior of the boride layer of a low carbon microalloyed steel // Materials and Technology. 2012. V. 46. P. 621 – 625.
27. *Ortiz-Domínguez M., Gómez-Vargas O. A., Ares de Parga G.* et al. Modeling of the growth kinetics of 4 boride layers in powder-pack borided ASTM A36 steel based on two different approaches // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. V. 6. P. 1 – 12.
28. *Keddam M., Ortiz-Domínguez M., Gómez-Vargas O. A.* et al. Kinetic study and characterization of borided AISI 4140 steel // Materials and Technology. 2015. V. 49. P. 665 – 672.
29. *Sen S., Sen U., Bindal C.* The growth kinetics of borides formed on boronized AISI 4140 steel // Vacuum. 2005. V. 77. P. 195 – 202.
30. *Nait Abdellah Z., Keddam M., Elias A.* Evaluation of the effective diffusion coefficient of boron in the  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase in the presence of chemical stress // International Journal of Materials Research. 2013. V. 104. P. 260 – 265.
31. *Ortiz-Domínguez M., Keddam M., Elias-Espinosa M.* et al. Pack-boriding of AISI P20 steel: estimation of boron diffusion coefficients in the  $\text{Fe}_2\text{B}$  layers and tribological behavior // International Journal of Surface Science and Engineering. 2017. V. 11. P. 563 – 585.
32. *Kayali Y.* Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace // Vacuum. 2016. V. 121. P. 129 – 134.
33. *Karakas S., Gunen A., Kanca E., Yilmaz E.* Boride layer growth kinetics of AISI H13 steel borided with nano-sized powders // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. V. 63. P. 159 – 165.
34. *Jain V., Sundararajan G.* Influence of the pack thickness of the boronizing mixture on the boriding of steel // Surface and Coatings Technology. 2002. V. 149. P. 21 – 26.
35. *Brakman C. M., Gommers A. W. J., Mittemeijer E. J.* Boriding of Fe and Fe – C, Fe – Cr, and Fe – Ni alloys; Boride-layer growth kinetics // Journal of Materials Research. 1989. V. 4. P. 1354 – 1370.

Статья поступила в редакцию 05.05.2021 г.

Доработанный вариант статьи поступил 21.07.2021 г.