

УДК 621.785.5

**ВЛИЯНИЕ БОРИРОВАНИЯ НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ И ХРУПКОСТЬ  
ПОВЕРХНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕТЕПЛОСТОЙКИХ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ**

*В.М. КОНСТАНТИНОВ, доктор техн. наук, профессор  
В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент  
А.В. КОВАЛЬЧУК, аспирант  
(БНТУ, г. Минск, Беларусь)*

**Константинов В.М.** – 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65,  
Белорусский национальный технический университет,  
e-mail: v\_m\_konst@mail.ru

Проведена оценка фактора хрупкости двухфазных боридных слоев полученных на сталях У8А и 9ХС в зависимости от температуры насыщения и времени выдержки. Получены уравнения регрессии, которые позволили определить наиболее эффективные режимы процесса борирования и обеспечить показатель напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe<sub>2</sub>V на уровне 120...140 МПа. Уточнены данные об изменении геометрических характеристик поверхности изделий в результате борирования в порошковой среде. Построены номограммы для определения прироста линейных размеров деталей из инструментальных нетеплостойких сталей марок У8А и 9ХС от времени выдержки при борировании в диапазоне температур 930...950 °С. Для исследуемых параметров борирования величина прироста линейных размеров составила: для стали У8А – 14...25 % от толщины боридного слоя на сторону, для стали 9ХС – 10...21 %.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, борирование, диффузионный слой, хрупкость, прецизионные детали, размерная точность.

**Введение**

Известно, что бориды FeV и Fe<sub>2</sub>V, получаемые в результате борирования стали, отличаются высокой хрупкостью [1 - 5], их деформация разрушения является ничтожно малой [6, 7]. В то же время авторский опыт применения борирования для упрочнения стальных деталей различных узлов трения показал, что боридные слои на стали могут проявлять стойкость к небольшим циклическим нагрузкам. Неоднозначная оценка эффективности боридных слоев в условиях циклических нагрузок может быть обусловлена различиями в методиках исследований, а также высокой чувствительностью боридных слоев к температурно-временным параметрам обработки и составу насыщающей среды [4, 8-10].

При высоких контактных нагрузках двухфазные боридные слои могут выкрашиваться из-за невозможности пластически деформироваться. Образующиеся в результате возникающих напряжений трещины могут приводить к выкрашиванию фрагментов поверхности, которые приводят к повышенному абразивному износу последней. Меньшую хрупкость показывают однофазные боридные слои, обладающие большим запасом пластичности. Однако в условиях трения с удельными нагрузками, не превышающими 200...250 МПа, которые обеспечивают сохранение нормального характера изнашивания, двухфазные боридные слои являются более стойкими, чем однофазные [11, 12]. Наряду с

этим существует предельная толщина боридного слоя для каждой марки стали, до которой хрупкость проявляется в меньшей степени и слой имеет прочную связь с основой [1, 4, 13].

Исследование хрупкости диффузионных боридных слоев является сложной задачей, так как для ее оценки пока нет единых, общепризнанных методов, позволяющих получать абсолютные значения показателей хрупкости боридных слоев на разных сталях. Это связано с изменением хрупкости боридных слоев в широком диапазоне в зависимости от толщины слоя, его морфологии и соотношения фаз, условиями насыщения, состава стали и другим [2, 8]. Поэтому задачи определения хрупкости боридных слоев традиционно решаются в каждом конкретном случае с получением сравнительных результатов

В случае борирования, как правило, преследуется цель получения покрытия без припуска на окончательную механическую обработку, поскольку механическая обработка (шлифование) таких покрытий затруднительна, по причине высокой твердости и вероятности скалывания борированного слоя на краях деталей [2, 4, 14]. Поэтому актуальным является определение величины прироста геометрических размеров деталей из конкретных сталей для корректировки конструкторской документации, чтобы фактический размер детали с покрытием соответствовал номинальному значению, указанному на чертеже.

### Материалы и методики

Наиболее показательной характеристикой хрупкости борированных слоев следует считать минимальное напряжение, приводящее к появлению трещин или скола на различном расстоянии от поверхности образца. Поэтому хрупкость борированного слоя оценивалась по методике [15]. Согласно этой методике хрупкость оценивается по напряжению скола  $\sigma$  (МПа) слоя, которое в совокупности учитывает фазовый состав и морфологию слоя, микротвердость и модули упругости фаз, напряженное состояние слоя и запас пластичности. Оценка хрупкости проводилась при нагрузке 1,0 Н, которая способна образовать трещину на межфазной границе для всех образцов, что предварительно установлено опытным путем.

Процесс борирования проводился при температурах от 850 до 950 °С в течение 1...4 ч с предварительной изотермической выдержкой при 750 °С, 1 ч. Насыщение проводилось в контейнерах, герметизируемых плавким затвором. Для проведения процесса использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Контроль температуры осуществляли при помощи потенциометра КСП-3П, градуировка ХА. Для проведения процесса диффузионного борирования использовали порошковую среду с высокой насыщающей способностью «besto-bor» [16].

Оценка влияния борирования на изменение размеров проводилась на образцах размером 10×10×20 мм. Оценка изменения размеров проводилась с использованием микрометра МК-25. В частности измерялась поверхность стальных образцов с номинальным размером 10-0,12 мм (12 квалитет).

### Результаты и обсуждение

По полученным эмпирическим данным рассчитаны уравнения множественной регрессии зависимости хрупкости компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А (уравнение 1) и 9ХС (уравнение 2) от температуры насыщения и времени выдержки при борировании в порошковой среде, что позволяет определить параметры проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeB/Fe<sub>2</sub>B:

$$Y = 886.7 - 0.95 \cdot X_1 - 47.1 \cdot X_2 + 1.63 \cdot X_3 \quad (1)$$

$$Y = 404.8 - 0.36 \cdot X_1 - 20.3 \cdot X_2 + 0.53 \cdot X_3 \quad (2)$$

где  $Y$  – напряжение скола на границе FeV/Fe<sub>2</sub>V, МПа;  $X_1$  – температура насыщения, °С;  $X_2$  – время выдержки, ч;  $X_3$  – толщина боридного слоя, мкм.

Построены трехмерные графики, отражающие зависимости толщины боридного слоя и напряжения скола на межфазной границе от режимов борирования для сталей У8А 9ХС (рисунок 1) и позволяющие определить оптимальные диапазоны параметров проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe<sub>2</sub>V для сталей У8А и 9ХС.

Установлено, что наименее хрупкими на стали У8А являются боридные слои, полученные в результате насыщения при 920...950 °С, 1...1,5 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч.

Для стали 9ХС наименее хрупкими оказываются слои, получаемые при 930...950 °С, 0,8...1,3 ч и 900 °С, 2...2,5 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч.

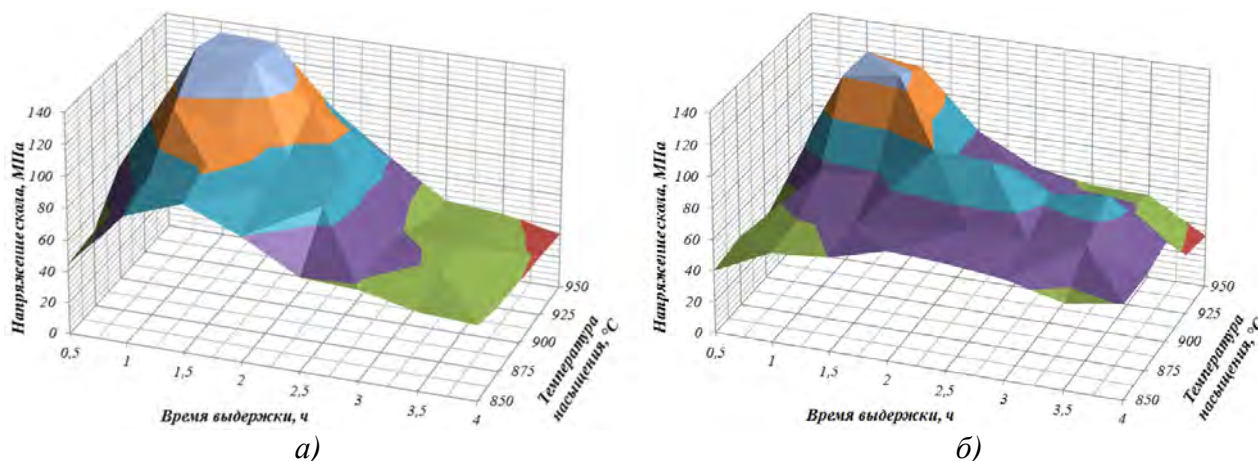


Рис. 1. Зависимости напряжения скола на межфазной границе от режимов борирования для сталей У8А (а) 9ХС (б)

Из полученных уравнений множественной регрессии и построенных зависимостей можно сделать вывод, что снижение температуры насыщения или повышение времени выдержки относительно выделенного оптимума для сталей У8А и 9ХС сопровождается повышением их хрупкости – снижается величина предельной нагрузки, приводящей к появлению трещин на межфазной границе.

В результате диффузионного борирования стальные детали претерпевают значительный прирост в размерах. По разным данным прирост может составлять от 8 до 55 % [17-20] и зависит от состава стали и условий насыщения. Чтобы оценить, является ли прирост размеров образцов из сталей У8А и 9ХС для выбранных режимов упрочнения зависящим от толщины боридного слоя, проведен корреляционный анализ и получены уравнения парной регрессии зависимости прироста размеров образцов от толщины боридного слоя для стали У8А (уравнение 3) и стали 9ХС (уравнение 4).

$$Y = -47.85 + 0.54 \cdot X \quad (3)$$

$$Y = -27.95 + 0.38 \cdot X \quad (4)$$

где  $Y$  – величина прироста линейного размера на сторону образца, мм;  
 $X$  – толщина боридного слоя, мкм.

С использованием полученных уравнений регрессии 3 и 4 зависимости прироста размеров от толщины боридного слоя, а также рассчитанных построены номограммы для определения прироста размеров деталей из сталей У8А и 9ХС от времени выдержки при борировании в порошковой среде «besto-bog» в интервале температур 930...950 °С (рисунок 2).

В соответствии с построенными номограммами прирост размеров образцов сталей У8А и 9ХС, борированных при 930 °С, 1,2 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч, составил 21...22 и 17...18 мкм на сторону, что совпадает с реально измеренным приростом.

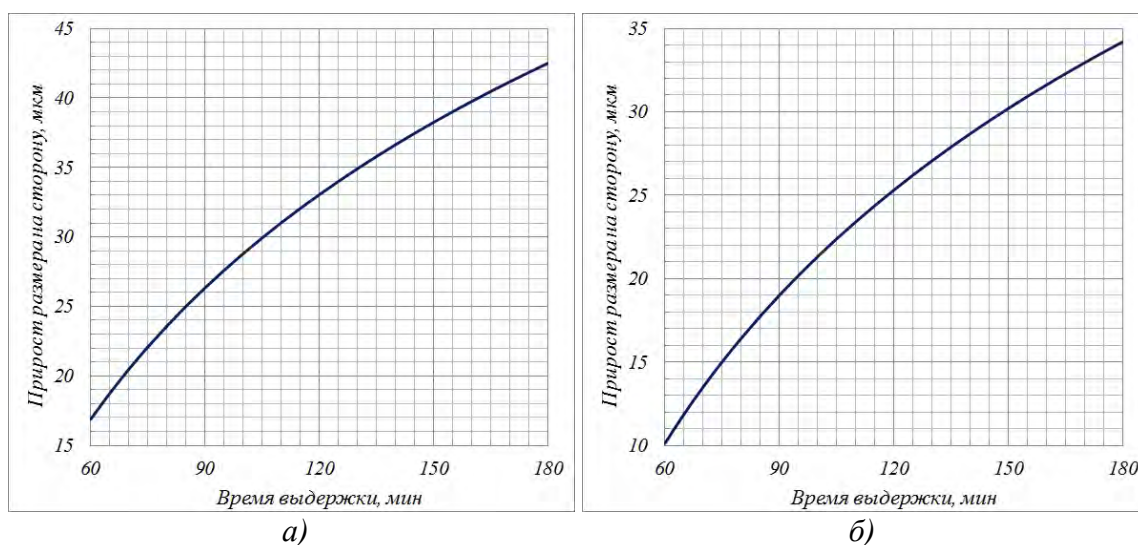


Рис. 2. Номограммы для определения прироста размеров деталей от времени выдержки при борировании в среде «besto-bog» при 930...950 °С для стали У8А (а) и 9ХС (б)

Установлено, что прирост линейных размеров для образцов из стали У8А при указанных параметрах проведения борирования составляет 14...25 % от толщины боридного слоя на сторону, для стали 9ХС – 10...21 %. Величина прироста хорошо согласуется с литературными данными о борировании углеродистых и низколегированных конструкционных и инструментальных сталей, где отмечается рост слоя наружу на 8...55 % от толщины боридного слоя [2, 13, 19].

В отличие от результатов работ [20-23], где установлено уменьшение доли боридного слоя, растущего наружу и уменьшение приращения размеров образцов доэвтектоидной стали с повышением времени выдержки, полученные результаты свидетельствуют об увеличении приращения размеров образцов сталей У8А и 9ХС и доли слоя, растущего наружу. Это может быть связано с большей дисперсностью компонент используемой насыщающей смеси, а также с большим содержанием углерода в сталях У8А и 9ХС, что затрудняет диффузию железа и бора и предполагает более длительное перераспределение углерода и повышенную его концентрацию в переходной зоне [24, 25].

## Заключение

Получены новые уравнения регрессии зависимости хрупкости компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А и 9ХС от температуры насыщения и времени выдержки при борировании в порошковой среде, что позволило определить параметры проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких (более работоспособных) боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeB/Fe<sub>2</sub>B на уровне 120...140 МПа.

Уточнены данные об изменении геометрических характеристик поверхности сталей У8А и 9ХС в результате борирования в порошковой среде и построены новые номограммы для определения прироста линейных размеров деталей из указанных сталей от времени выдержки при борировании в диапазоне температур 930...950 °С. Установлено, что при толщине боридных слоев 100...160 мкм и относительном объемном количестве фазы FeB 50±5 % прирост линейных размеров образцов составляет 14...25 % и 10...21 % соответственно для сталей У8А и 9ХС от общей толщины боридного слоя.

## Список литературы

1. *Mittemeijer E.J., Somers M.A.J.* Thermochemical surface engineering of steels: improving materials performance. – 2<sup>nd</sup> ed. – Oxford: Elsevier, 2014. – 816 p.
2. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2013. – 672 с.
3. *Budinski K.G.* Friction, wear, and erosion atlas. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 309 p.
4. *Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г.* Пластичность борированных слоев. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
5. *Hausner H.H.* Coatings of high-temperature materials. – New York: Springer Science & Business Media, 2013. – 296 p.
6. *Shadrichev E.V., Ivanov A.E.* Relative wear-resistance of single-phase and two-phase boride layers // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1984. – Vol. 26, N 3. – P. 235–239.
7. *Matijevic B.* Evaluation of boride layer growth on carbon steel surfaces // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2014. – Vol. 56, N 5–6. – P. 269–273.
8. Boron and refractory borides / eds. V.I. Matkovich. – New York: Springer Science & Business Media, 2012. – 656 p.
9. *Gunes I., Kayali Y., Ulu S.* Investigation of surface properties and wear resistance of borided steels with different B<sub>4</sub>C mixtures // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2012. – Vol. 19. – P. 397–402.
10. Особенности формирования боридных покрытий из композиционных металлотермических порошковых сред / Н.А. Галынская, Н.Г. Кухарева, В.С. Нисс, С.Н. Петрович // *Вестник БНТУ*. – 2011. – № 4. – С. 15–20.
11. Low-temperature boriding of high-carbon steel / X. Hea, X. Huaping, M.F. Ozaydina, K. Balzuweitb, H. Lianga // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 263. – P. 21–26.
12. Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel / S. Sen, I. Özbek, U. Sen, C. Bindal // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 135, N 2–3. – P. 173–177.
13. *Крукович М.Г.* Разработка теоретических и прикладных аспектов управления структурой и свойствами борированных слоев и их использование при производстве транспортной техники: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01. – М., 1995. – 416 с.

14. *Konstantinov V.M., Dashkevich V.G., Kovalchuk A.V.* Surface engineering of slider valves of fluid power motors made of tool steels by using boriding saturation mixture // *Agricultural Engineering*. – 2015. – Vol. 47. – P. 1–6.
15. *Григоров П.К., Катханов Б.Б.* Методика определения хрупкости борированного слоя // *Повышение надежности и долговечности деталей машин*. – Ростов н/Д., 1972. – Вып. 16. – С. 97–98.
16. BESTO: Белорусские среды для термодиффузионной обработки [Электронный ресурс]. – URL: <http://besto.by/vidy-obrabotok/borirovanie> (дата обращения: 02.03.2017).
17. *Дукаревич И.С., Можаров М.В., Шигаев А.В.* Перераспределение элементов в борированном слое // *МиТОМ*. – 1973. – № 2. – С. 64–66.
18. *Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Трушина Е.Б.* Влияние состава стали-основы на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 4. – С. 3–7.
19. Восстановление размеров деталей машин и инструмента способом диффузионного борирования / В.И. Голубев, В.П. Сытов, В.А. Рогов, Е.Н. Александров // *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: сборник докладов III Всесоюзной научной конференции, Минск, 30 мая – 1 июня 1977 г.* / Л.С. Ляхович (гл. ред.). – Минск, 1977. – С. 226–227.
20. *Karpenko G.V., Aladjem A.* Influence of diffusion coatings on the strength of steel. – 2<sup>nd</sup> ed. – Aedermannsdorf: Freund Publ. House, 1979. – 199 p.
21. *Şahin S.* Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714 // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, N 4. – P. 1736–1741.
22. *Куркина Л.А., Хараев Ю.П.* Влияние температуры диффузионного насыщения на изменение размеров образцов из стали 45 при борировании // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2014. – Т. 11, № 2. – С. 201–205.
23. Влияние борирования на изменение размера образцов из штамповой стали / Л.А. Куркина, Ю.П. Хараев, А.Д. Грешилов, Н.И. Федотов, В.А. Бутуханов // *Проблемы механики современных машин: материалы 5 международной конференции / ВСГУТУ*. – Улан-Удэ, 2012. – Т. 3. – С. 164–167.
24. *Gunes I.* Tribological behavior and characterization of borided cold-work tool steel // *Materials and Technology*. – 2014. – Vol. 48, N 5. – P. 765–769.
25. *Erdogan M., Gunes I.* Corrosion behavior and microstructure of borided tool steel // *Revista Materia*. – 2015. – Vol. 20, N 2. – P. 523–529.

## INFLUENCE OF BORIDING ON DIMENSIONAL ACCURACY AND FRAGILITY OF SURFACE PRECISION PARTS MADE OF COLD WORK TOOL STEELS

**Konstantinov V.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: v\_m\_konst@mail.ru  
**Dashkevich V.G.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: vladimir\_dvl@tut.by  
**Kovalchuk A.V.**, Post-graduate Student, e-mail: a-v-kov@yandex.com

Belorussian National Technical University, ave. Nezavisimosty, 65, Minsk, 220013, the Republic of Belarus

### Abstract

The estimation of factor of the fragility of the two-phase boride layers obtained on steels «У8А» and «9ХС», depending on the saturation temperature and exposure time. The regression equations that allowed to define more efficient modes boriding process and provide a measure of phase boundary at the interface FeB / Fe<sub>2</sub>B at 120 ... 140 MPa. Refined data on changes in the geometric characteristics of the surface of the product resulting in a powder boriding environment. Constructed a nomogram for determining the gain of the linear dimensions of parts of cold work tool steels «У8А» and «9ХС» the holding time at boriding in the temperature range 930 ... 950 ° C. To study the value of growth options boriding linear dimensions were as follows: steel «У8А» – 14 ... 25% of the thickness of the boride layer on the side, for steel «9ХС» – 10 ... 21%.

### Keywords

thermochemical treatment, boriding, diffusion layer, fragility, precision details, dimensional accuracy