

УДК 537.5+661.8+669

doi: 10.18101/2306-2363-2017-2-3-30-35

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ  
БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА ШТАМПОВУЮ СТАЛЬ X12МФ  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ПУЧКОВ В ВАКУУМЕ**

© *А. С. Милонов*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
Институт физического материаловедения СО РАН  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: terwer81@mail.ru

© *Б. А. Данжеев*

аспирант, Институт физического материаловедения СО РАН  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: bel.tunka@mail.ru

© *Н. Н. Смирнягина*

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник,  
Институт физического материаловедения СО РАН  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

Исследованы и сопоставлены микроструктуры и микротвердость боридных слоев, сформированных на штамповой стали X12МФ, в результате электронно-лучевой обработки в вакууме. Слои боридов имеют неравномерное по толщине строение, содержат различные фазы и неоднородное распределение физико-механических свойств. Сформированные слои обладают гетерогенной структурой, сочетающей твердые и пластичные компоненты, приводящие к уменьшению хрупкости боридного слоя. Исследование микротвёрдости боридных слоёв после борирования импульсным и непрерывным электронными пучками позволяет сделать вывод о возможности использовании двух способов борирования для упрочнения режущих инструментов и других, испытывающих разогрев в процессе работы до высоких температур без существенного снижения эксплуатационных свойств.

**Ключевые слова:** термодинамика, электронно-лучевое борирование, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, переходные металлы, микротвердость, структура, строение, фазовый состав

На сегодняшний день в условиях постоянно развивающейся техники возрастают требования к прочности материалов деталей машин, приборов и инструментов, а особенно к их жаропрочности и жаростойкости. Бориды переходных металлов обладают высокими температурами плавления (свыше 2000 °С) и значениями твердости, достаточно устойчивы к окислению, поэтому представляют особый интерес для формирования покрытий на их основе. Боридные слои имеют высокие физико-механические характеристики. Микротвердость слоев достигает 20000 МПа, причем эти значения микротвердости могут сохраняться до температур ~ 600–700 °С, что позволяет применять борирование для повышения износостойкости изделий из штамповой стали X12МФ, работающих при высоких температурах [1–3].

X12MФ — штамповая сталь холодного деформирования с повышенным содержанием хрома и включениями молибдена (ср. 0,5%) и ванадия (ср. 0,2%). Сталь X12MФ обладает хорошей теплостойкостью и прочностью, высокой прокаливаемостью, закаливаемостью и износостойкостью. Микротвердость стали X12MФ 2560 МПа. Также эта сталь технологична, хорошо обрабатывается резанием и давлением, удовлетворительно шлифуется.

В настоящей работе получены слои в результате электронно-лучевого борирования (ЭЛБ) [4]. На предварительно подготовленную поверхность образцов наносили насыщающую обмазку толщиной 0,5-1 мм. В состав обмазки входили карбид бора  $B_4C$  и органическое связующее.

Синтез боридов ванадия осуществляли на поверхности штамповой стали X12MФ. Образцы готовили путем нанесения обмазки на предварительно подготовленную поверхность стали. В состав обмазки входили 1:1 по объему смеси оксида  $V_2O_5$ , бора аморфного и углерода, а также органическое связующее — раствор 1:10 клея БФ-6 в ацетоне.

Нагрев образцов осуществляли электронным пучком в импульсном режиме с параметрами: ускоряющее напряжение:  $U = 24$  кВ; ток пучка:  $I_r = 63$  А. Обработку проводили с длительностью одного импульса:  $t = 20$  мкс; количество импульсов:  $N = 1800$ ; частота следования импульсов тока пучка:  $f = 6$  Гц. Давление в вакуумной камере:  $5 \times 10^{-2}$  Па [5, 6].

Электронный нагрев непрерывным пучком в течение 2-5 мин при удельной мощности 2-2,5 Вт/см<sup>2</sup>. Остаточное давление в вакуумной камере не превышало:  $2 \times 10^{-3}$  Па [7].

#### Результаты и их обсуждение

Металлографическим анализом установлено, что структуры поверхностных слоев, полученных в результате борирования импульсным и непрерывным электронными пучками на стали X12MФ отличаются (рис. 1).

После ЭЛБ переходной зоны нет, видна чёткая граница между слоем и основным металлом. Слой состоит из округлых кристаллов, располагающихся на поверхности или в объеме и эвтектики. Толщина слоя составляет: после борирования импульсным электронным пучком 20–30 мкм, а после непрерывного пучка достигает 250–300 мкм. Малая толщина слоя после борирования импульсным электронным пучком объясняется тем, что пучок выбивает получившиеся СВС продукты до оплавления поверхности стали X12MФ.

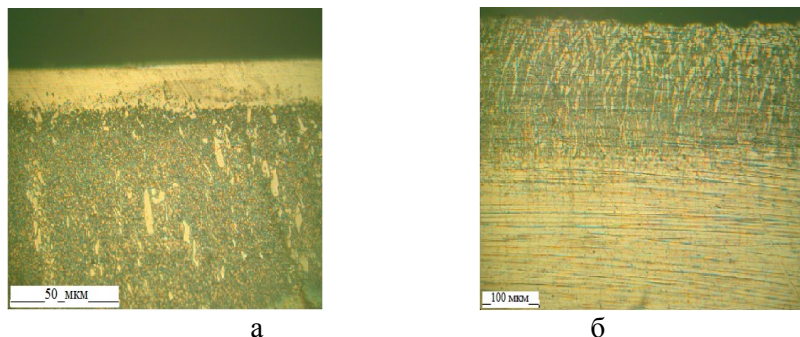


Рис. 1. Структура слоя на основе  $VB_2$  на стали X12MФ (а — импульсный электронный пучок), (б — непрерывный электронный пучок)

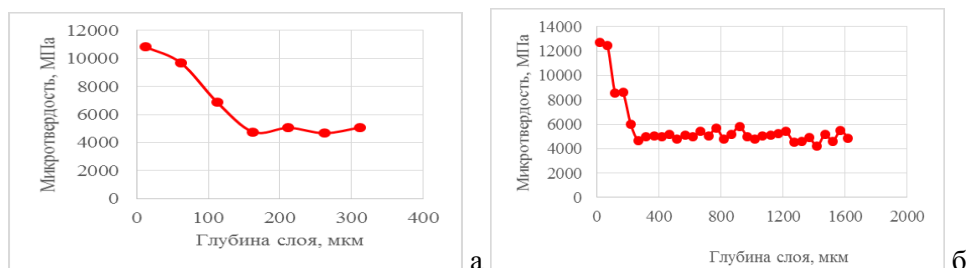


Рис. 2. Микротвердость слоя  $VB_2$  на стали X12MФ  
(а — импульсный электронный пучок, б — непрерывный электронный пучок)

При измерении микротвердости слоев боридов ванадия с шагом 30-50 мкм обнаружено неравномерное распределение ее по толщине (рис. 2). Однако, во всех исследованных образцах наблюдалось закономерное распределение микротвердости в зависимости от толщины слоя. Отдельные очень редкие включения имеют  $HV \approx 20000$  МПа и располагаются в приповерхностных зонах слоя. Слои характеризуются наиболее сложной неупорядоченной структурой. Увеличение микротвердости основы до  $HV \approx 5000$  МПа объясняется тем что, она прошла закалку электронным пучком.

Боридные слои испытывали на термическую устойчивость и жаропрочность. Для этого все образцы нагревали в печи сопротивления КО-14 до определенных температур и выдерживали в течение 2 ч для установления равновесия.

На рис. 3 приведен график изменения массы с ростом температуры. Видно, что при увеличении температуры от  $900^{\circ}C$  и более идет потеря массы. Это связано с тем, что слой окислился и разрушился, что подтверждается исследованиями микроструктуры и микротвердости (рис. 4, 5).

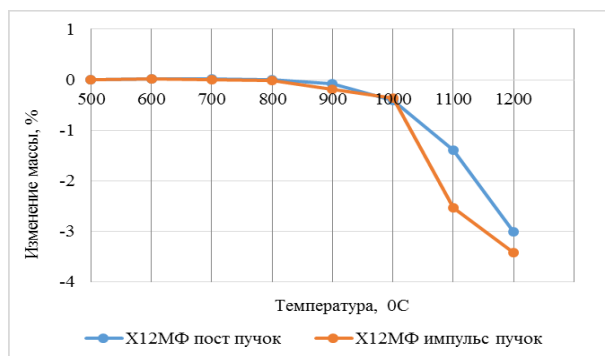


Рис. 3. Изменение массы с ростом температуры

Исследования позволяют сделать вывод об использовании ЭЛБ для упрочнения режущих инструментов и др., испытывающих разогрев в процессе работы до высоких температур без существенного снижения эксплуатационных свойств.

Известно, что наряду с высокой твёрдостью и износостойкостью, боридные слои обладают и существенным недостатком — повышенной хрупкостью. Проведенные исследования показали, что использование электронного нагрева позволяет снизить хрупкость и повысить пластичность.

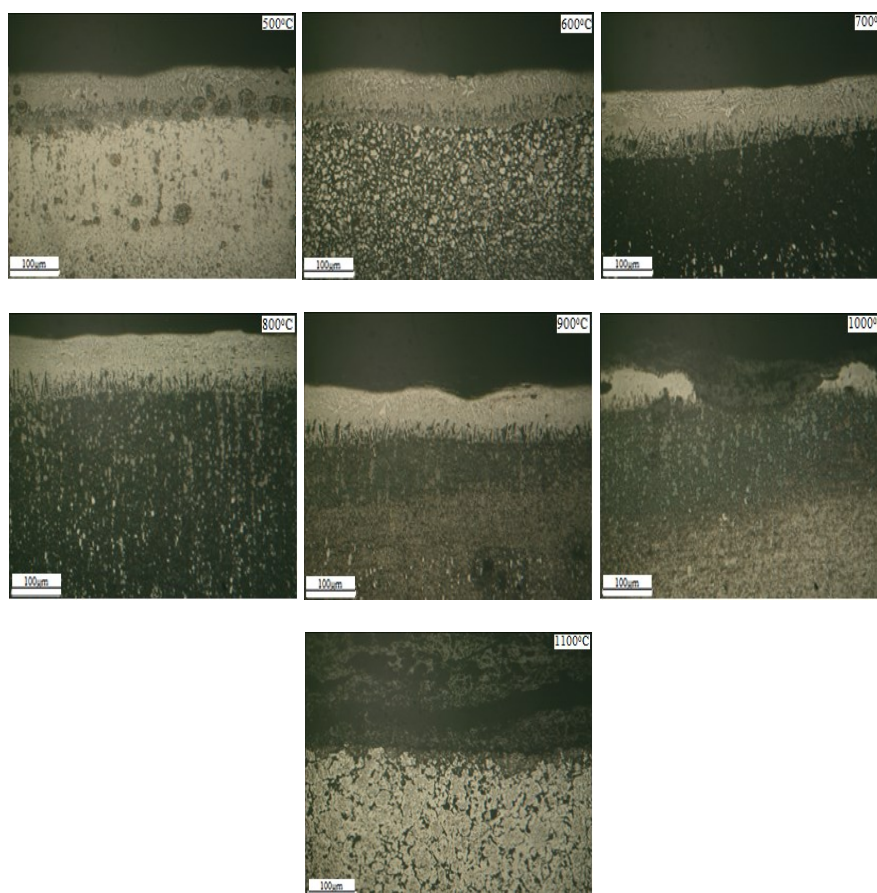


Рис. 4. Термическая стабильность боридных слоев после обработки непрерывным пучком на стали Х12МФ при нагреве на воздухе

После электронно-лучевого борирования слои более пластичны, чем после твердофазного. Кроме того, слои после электронно-лучевого борирования имеют гетерогенную структуру, сочетающую твёрдые (хрупкие) и более пластичные структурные составляющие. Такое сочетание отчасти объясняет отсутствие термических трещин при нагреве боридных слоёв до высоких температур.

После электронно-лучевого борирования слои более пластичны, чем после твердофазного. Кроме того, слои после электронно-лучевого борирования имеют гетерогенную структуру, сочетающую твёрдые (хрупкие) и более пластичные структурные составляющие. Такое сочетание отчасти объясняет отсутствие термических трещин при нагреве боридных слоёв до высоких температур.

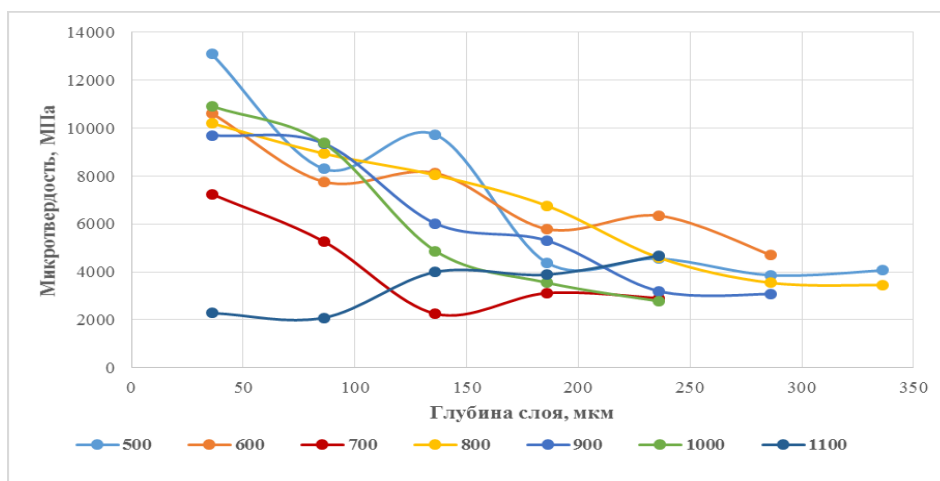


Рис. 5. Микротвердость боридных слоев при нагреве на воздухе

### Выводы

1. Таким образом, в результате электронно-лучевой обработки в вакууме удалось сформировать слои боридов ванадия. Слои боридов ванадия имеют неравномерное по толщине строение, содержат различные фазы и, как следствие, неоднородное распределение физико-механических свойств (например, микротвердости). Твердые частички размером 5–7 мкм находятся в пластичной эвтектике. Поверхность слоя имеет максимальные величины микротвердости.

Исследование микротвёрдости боридных слоёв после борирования импульсным и непрерывным электронными пучками позволяет использовать оба способа борирования для упрочнения режущих инструментов и др., испытывающих разогрев в процессе работы до высоких температур без существенного снижения эксплуатационных свойств.

### Литература

1. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение. — М.: Мир, 2000. — 518 с.
2. Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндарчук М. В. Износостойкость боридных покрытий. — Киев: Техніка, 1989. — 204 с.
3. Колубаев А. В., Тарасов С. Ю., Трусова Г. В. и др. Структура и свойства боридных покрытий // Изв. ВУЗов. Черные металлы. — 1994. — № 7. — С. 49–51
4. Семенов А. П., Смирнягина Н.Н., Сизов И. И. Установка для электронно-лучевой химико-термической обработки // Технология металлов. — 2001. — № 4. — С. 32–34.
5. Коваль Н. Н., Щанин П. М., Винтизенко Л. Г., Толкачев В. С. Установка для обработки поверхности металлов электронным пучком // Приборы и техника эксперимента. — 2005. — № 1. — С. 135–140
6. Коваль Н. Н., Девятков В. Н., Григорьев С. В., Сочугов Н. Ч. Плазменный источник электронов «Соло» // Труды II межд. Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». — Улан-Удэ, 2006. — С. 79–85.

*A. С. Милонов, Б. А. Данжеев, Н. Н. Смирнягина. Особенности формирования наноструктурированных боридных слоев на штамповую сталь X12МФ...*

---

7. Milonov A. S., Danzheev B. A., Smirnyagina N. N. and al. Synthesis of transition metal borides layers under pulsed electron-beams treatment in a vacuum for surface hardening of instrumental steels // Journal of Physics: Conf. Ser. — 2015. — V. 652.

FEATURES OF THE FORMATION OF NANOSTRUCTURED BORIDE LAYERS  
ON THE DIE D2 STEEL UNDER THE INFLUENCE  
OF INTENSIVE ELECTRON BEAMS IN THE VACUUM

*A. S. Milonov*

candidate of Technical Sciences, senior researcher,  
Institute of Physical Materials Science SB RAS  
Russia, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi, Str., 6  
E-mail: terwer81@mail.ru

*B. A. Danzheev*

postgraduate, Institute of Physical Materials Science SB RAS  
Russia, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi, Str., 6  
E-mail: bel.tunka@mail.ru

*N. N. Smirnyagina*

Doctor of Technical Sciences, associate Professor, chief researcher  
Institute of Physical Materials Science SB RAS  
670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi, Str., 6  
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

Investigated and compared are the microstructure and microhardness of the boride layers formed on the die steel X12MF, as a result of electron beam processing in vacuum. Layers of borides have uneven structure, they contain different phases and inhomogeneous distribution of physico-mechanical properties. The formed layers have heterogeneous structure combining solid and plastic components that reduce fragility of the boride layer. The study of the microhardness of the boride layers after pulsed and continuous electron beams boriding allows to make a conclusion about the possibility of using two methods of boriding for hardening cutting tools and other, experiencing a warm-up while operation process up to high temperatures without significant reduction in performance properties.

*Keywords:* thermodynamics, electron-beam boriding, self-spreading high-temperature synthesis, transition metals, microhardness, structure, building, phase composition.