



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-94-99>  
УДК 621.7

Поступила 14.04.2021  
Received 14.04.2021

## АКТИВАЦИЯ ДИФФУЗИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ БОРИДНЫХ СЛОЕВ

С. М. УШЕРЕНКО, В. Г. ДАШКЕВИЧ, Ю. С. УШЕРЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vladimir\_dvl@tut.by

*Исследованы особенности структурообразования диффузионных слоев, полученных по технологии, включающей предварительную обработку поверхности стальных изделий и последующее термодиффузионное борирование в порошковых средах. Предварительная обработка заключалась в активации поверхности способом сверхглубокого проникновения порошковой композицией на основе SiC стальных образцов из стали У8. Отмечены особенности зон активации, их распределение по поверхности. Проведен структурный анализ полученных диффузионных слоев для вариантов низкотемпературного (650 °С) и высокотемпературного (920 °С) борирования. Проанализированы химический состав слоя и распределение основных элементов в нем. В обоих случаях отмечено изменение морфологии, заключающееся в формировании более компактного диффузионного слоя и округлении боридных игол в зоне, примыкающей к основному металлу. Установлены увеличение толщины слоя на 20–50% и доли высокобористой фазы FeB относительно варианта борирования без предварительной активации.*

**Ключевые слова.** Борирование, активация, модификация диффузионного слоя, бориды железа.

**Для цитирования.** Ушеренко, С. М. Активация диффузии при формировании на поверхности стальных деталей боридных слоев / С. М. Ушеренко, В. Г. Дашкевич, Ю. С. Ушеренко // *Литье и металлургия*. 2021. № 2. С. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-94-99>.

## ACTIVATION OF DIFFUSION DURING THE FORMATION OF BORIDE LAYERS ON THE SURFACE OF STEEL PARTS

S. M. USHERENKO, V. G. DASHKEVICH, Yu. S. USHERENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vladimir\_dvl@tut.by

*The features of structure formation of diffusion layers obtained by the technology, including preliminary surface treatment of steel products and subsequent thermal diffusion boriding in powder media, have been investigated. Pretreatment consisted in surface activation by superdeep penetration with a powder composition based on SiC of steel samples made of У8 steel. The features of the activation zones and their distribution over the surface are noted. The features of the activation zones and their quantitative characteristics are noted. A structural analysis of the obtained diffusion layers for the variants of low-temperature (650 °C) and high-temperature (920 °C) boration has been carried out. The chemical composition of the layer and the distribution of the main elements in it are analyzed. In both cases, a change in morphology was noted, consisting in the formation of a more compact diffusion layer and rounding of boride needles in the zone adjacent to the base metal. An increase in the layer thickness by 20–50% and an increase in the proportion of the high-boron FeB phase relative to the variant of borating without preliminary activation were established.*

**Keywords.** Boriding, activation, modification of the diffusion layer, iron borides.

**For citation.** Usherenko S. M., Dashkevich V. G., Usherenko Yu. S. Activation of diffusion during the formation of boride layers on the surface of steel parts. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-2-94-99>.

### Введение

В современных условиях, когда вариантов выбора всевозможных высокотвердых покрытий и слоев на углеродистых сталях огромное количество, боридные слои, полученные химико-термической обработкой (ХТО), имеющие чрезвычайно высокую твердость (до 22 000 МПа) и износостойкость, по-прежнему актуальны как среди исследователей, так и производителей. Ученые и инженеры разных стран мира применяют различные способы борирования для защиты стальных изделий от механического и коррозионно-механического изнашивания [1–4].

С точки зрения повышения комплекса физико-механических характеристик уже существующих диффузионных слоев перспективным является предварительная обработка поверхности перед насыщением.

Известно, что активация сталей, происходящая под воздействием высокоэнергетического потока порошковых частиц в режиме сверхглубокого проникновения, приводит к значительным объемным изменениям структуры обработанного материала [5, 6]. Представляется важным исследование возможности совмещения такой активации и последующей ХТО, в частности борирования. Отметим, что воздействие предварительной активации на последующую диффузию при химико-термической обработке может оказаться возможным только в случае, когда структурные дефекты, возникающие в результате воздействия высокоэнергетического потока, частично или полностью сохраняют устойчивость в диапазоне условий термического воздействия при ХТО.

В настоящей работе рассматривается процесс предварительной активации сверхглубоким проникновением порошковых частиц в стальную матрицу и последующее термодиффузионное низкотемпературное и высокотемпературное борирование в порошковых средах. Сам способ борирования в порошковой насыщающей среде был выбран из-за своей универсальности, удобства обработки малых партий деталей и варьирования состава среды, что позволяет существенно изменять условия насыщения. Борирование в таких смесях проводится при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором.

В качестве модельного материала была использована углеродистая инструментальная сталь. Углеродистые инструментальные стали марок У7, У8 и др., упрочненные борированием, представляют интерес для изготовления, например, деталей золотниковой группы гидрораспределителей, различных накатных роликов, пил и т. д. Однако повышенный фактор хрупкости диффузионных слоев, низкая кинетика роста слоя сдерживают широкое применение стали с рассматриваемым упрочнением [2].

### Материалы и методика исследований

Для исследования использована углеродистая инструментальная сталь У8 (ГОСТ 1435) в равновесном состоянии, со структурой перлита пластинчатого.

Предварительная активация образцов из стали У8 была выполнена в режиме сверхглубокого проникновения (СПП). Динамическую обработку в режиме СПП [7] проводили с помощью пушечного ускорителя в следующих условиях: скорость частиц – 300–1000 м/с, время воздействия – 100 мкс, материал ударников: 50% – порошок SiC (99% SiC, гранулометрический состав 63–70 мкм), 35% – порошок алюминия ПА-4 (98% Al, гранулометрический состав 15–100 мкм); 15% – порошок ПГ10Н01 (С – 0,6–1,0%; Cr – 14–20; Ni – основа; Si – 4,0–4,5; Fe – 3,0–7,0; В – 2,8–4,5; гранулометрический состав 40–100 мкм).

Диффузионное насыщение проводили в порошковой среде в объеме контейнера, герметизируемого плавким затвором. Контроль температуры осуществляли при помощи потенциометра ПСР-01, градуировка ХА. В качестве насыщающей среды использовали порошковую смесь «Besto-bor» – синтезированная порошковая среда для борирования, обладающая высокой насыщающей способностью, разработанная сотрудниками научно-исследовательской лаборатории упрочнения стальных изделий филиала БНТУ «НИПИ». В состав смеси в качестве основного компонента входил оксид бора, восстановитель – порошок алюминия. Восстановленную смесь размалывали, просеивали, обеспечивая требуемый гранулометрический состав (0,3–0,5 мм), и для дальнейшего использования при термодиффузионном насыщении добавляли активатор AlF<sub>3</sub>. Режимы борирования: высокотемпературное борирование – 4 ч при 900–920 °С, низкотемпературное – 4 ч при 640–650 °С.

Исследование морфологии поверхности и элементного состава проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira 3» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода и представленных данных составляет 3–5 отн. %. Микрорентгеноспектральный анализ образцов выполняли как по линии (концентрационные кривые распределения элементов), так и по площади (карты характеристического рентгеновского излучения).

### Результаты и обсуждение

В результате процесса активации формируются канальные зоны, которые являются ничем иным как дефектом кристаллической структуры, способным интенсифицировать диффузию по телу зерна, т.е. развить объемную диффузию.

В нашем случае в порошковой композиции присутствовало небольшое количество порошка никелевого сплава, он выступал в качестве маркера, характеризующего распределение активированных зон по поверхности образца (рис. 1). На микроструктуре вокруг каналов от этого порошкового компонента формировалась зона пониженной травимости размером около 5–10 мкм, поскольку никель

изменяет коррозионную стойкость образующихся участков микрошлифа. В результате, косвенно, по маркеру можно сделать вывод, что распределение активированной зоны у полученных образцов достаточно равномерное.

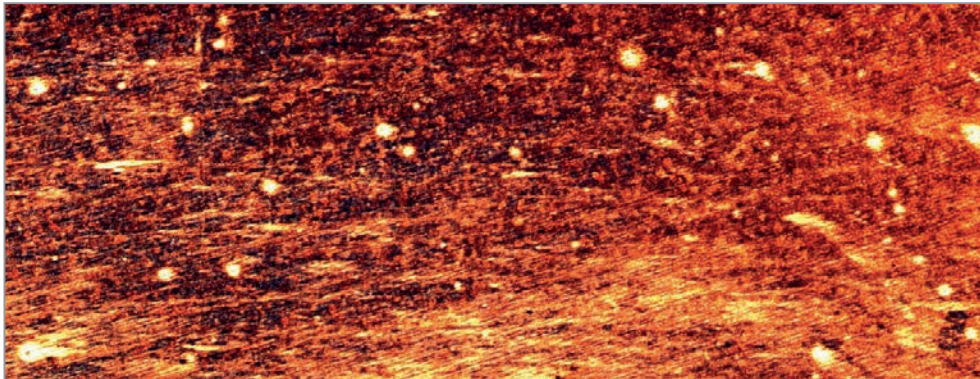


Рис. 1. Микроструктура активированной матрицы из стали У8.  $\times 200$

Известно, что при борировании реализуется, прежде всего, зернограничная диффузия, т.е. бор выступает как гомофильный элемент, поэтому появление в структуре дефектов, интенсифицирующих объемную диффузию, будет способствовать увеличению кинетики роста слоя. В общем случае структура традиционного слоя при борировании иглоподобная, состоящая из зон низкобористой ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) и высокобористой ( $\text{FeB}$ ) фаз. Характерным является присутствие пористости, как правило, на межфазной границе, что способствует описанной ранее высокой хрупкости и низкой адгезии. Природа этой пористости – вакансионный механизм диффузии и затруднительная встречная диффузия железа [2]. Для исследуемого процесса низкотемпературного борирования иглоподобность слоя практически отсутствует, однако присутствует пористость (рис. 2).

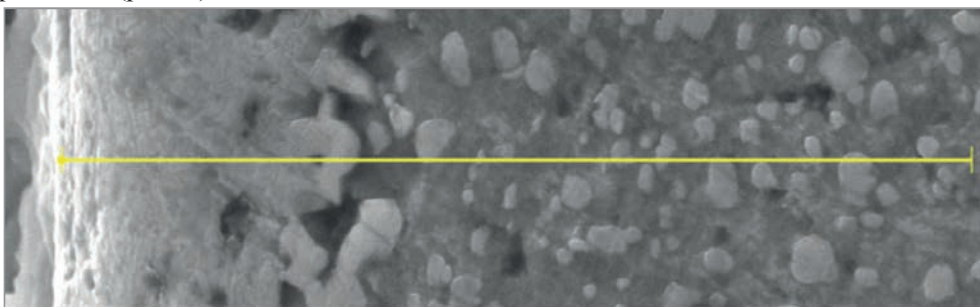


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стали У8 после низкотемпературного борирования без предварительной активации

Исследование структуры образцов после низкотемпературного борирования показало появление в поверхностных слоях предварительно активированных слоев внедренных элементов материалов ударников – Al, Si, но не было продемонстрировано значительное изменение концентрации бора по сравнению с образцом без предварительной активации (рис. 3). Также следует обратить внимание на снижение пористости диффузионного слоя и переходной зоны. Вероятнее всего, сформированные каналные зоны в результате процесса активации способствуют интенсификации диффузии, что приводит к формированию более компактного слоя. Сами зоны активации после СГП порошковой композицией частично сохраняются, поскольку температура борирования только приближается к температуре рекристаллизации.

Исследование структуры образцов после высокотемпературного борирования также позволило выявить появление в поверхностных слоях предварительно активированных элементов материала ударников – Al, Si (рис. 4, 5) и продемонстрировало увеличение концентрации бора в поверхностных слоях по сравнению с образцом без предварительной активации (рис. 5).

В результате того, что температура насыщения более высокая, образуется большая толщина слоя, соответственно более развитая структура слоя, поэтому зафиксированы более подробно ее изменения. В частности, изменилась морфология слоя, иглоподобность практически исчезла (рис. 6, б, в), изменилось соотношение высоко- и низкобористой фаз, что видно на микроструктуре (рис. 6, а): более темный участок от поверхности микрошлифа – высокобористая фаза  $\text{FeB}$ , а светлый участок ниже – низкобористая фаза  $\text{Fe}_2\text{B}$ .

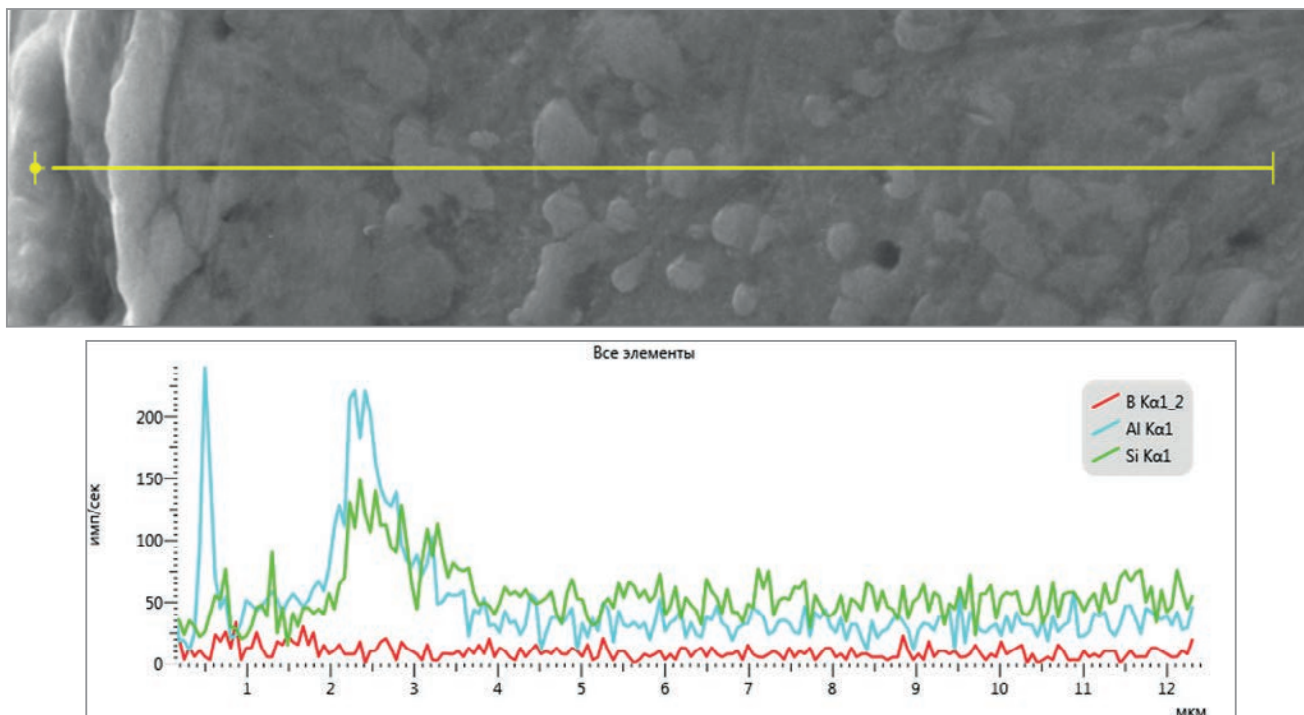


Рис. 3. Структура и анализ состава поверхностного слоя стали У8 после низкотемпературного борирования с предварительной активацией в режиме СГП

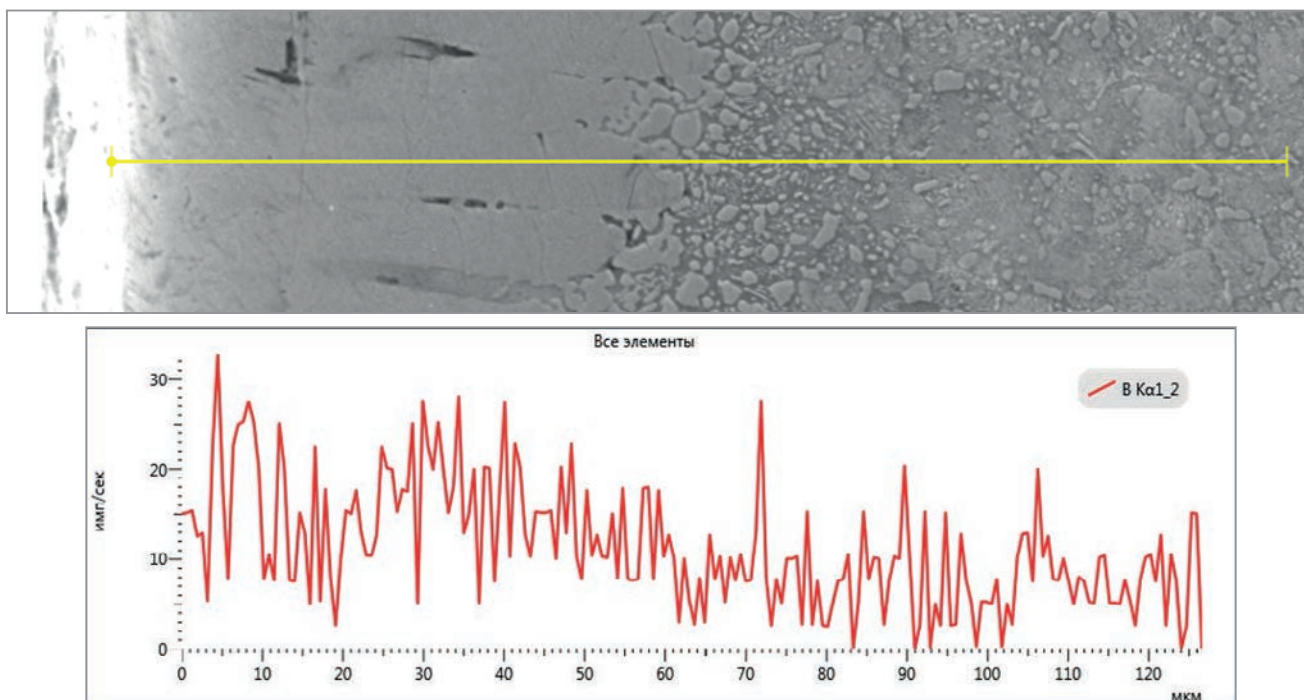


Рис. 4. Структура и анализ состава поверхностного слоя стали У8 после высокотемпературного борирования без предварительной активации

Если при традиционной обработке соотношение высоко- и низкособористой фаз составляет, как правило, 30 и 70% соответственно, то после активации и последующего борирования соотношение выравнивается и становится близким к 50:50. Микродюрометрический анализ, проведенный на исследуемых образцах, такой вывод полностью подтверждает (рис. 7).

Важным результатом активации является увеличение толщины слоя относительно образцов без предварительной обработки СГП и происходящее легирование боридов. Установлен прирост толщины диффузионного слоя, который после высокотемпературного борирования с предварительной активацией составил 20–50%.

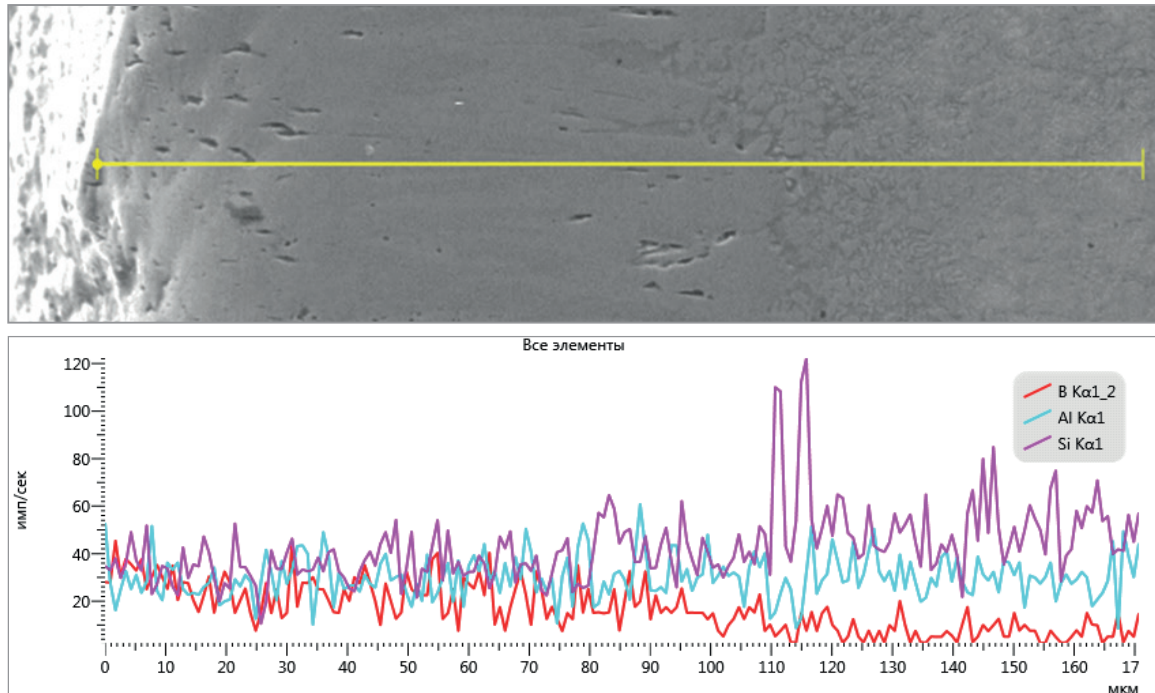


Рис. 5. Структура и анализ состава поверхностного слоя стали У8 после высокотемпературного борирования с предварительной активацией в режиме СГП

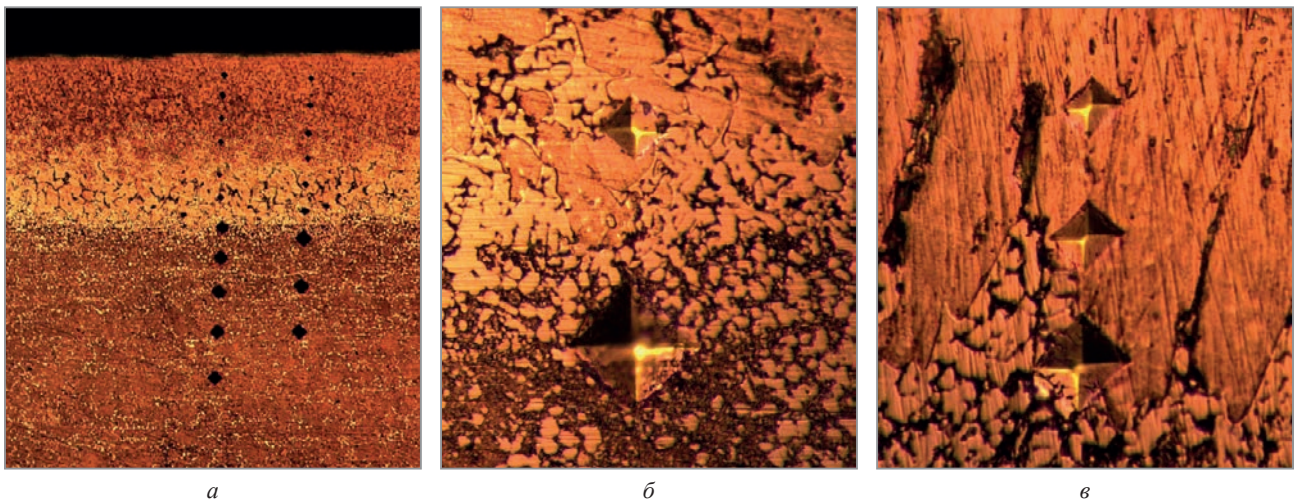


Рис. 6. Микроструктура образцов стали У8 после высокотемпературного борирования с предварительной активацией (а, б) и без предварительной активации (в). а –  $\times 100$ ; б, в –  $\times 1000$

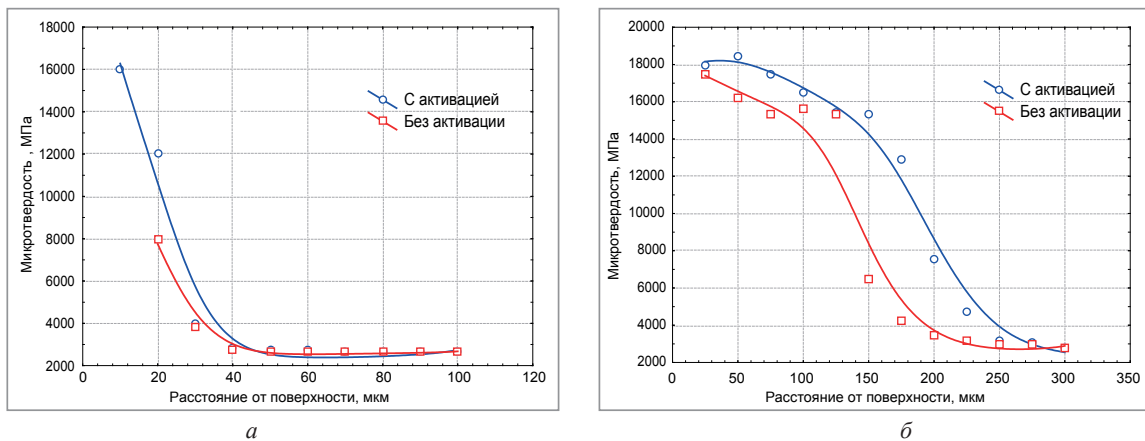


Рис. 7. Распределение микротвердости по толщине слоя после низкотемпературного борирования (а) и высокотемпературного борирования (б)

### Выводы

В результате выполненной работы исследованы особенности структурообразования диффузионных боридных слоев, которые были получены после активации поверхности. Активацию проводили при воздействии высокоэнергетического потока порошковых микрочастиц в режиме сверхглубокого проникновения, что привело к существенным объемным изменениям структуры обработанного материала.

Отмечено, что в обоих вариантах борирования (низкотемпературное и высокотемпературное) при проведении предварительной активации происходит изменение морфологии термодиффузионного слоя, что проявляется в снижении пористости, в частности в подборидном слое, и уменьшении традиционной для борирования иглоподобности структуры.

Установлено, что в результате предварительной обработки происходит увеличение толщины диффузионного слоя на 20–50%. Этот результат особенно ощутим для высокотемпературного борирования. Увеличивается доля высокобористой фазы FeB в слое, что свидетельствует об интенсификации стадий диффузии и реакций в металле.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Eric J. Mittemeijer.** Thermochemical surface engineering of steels / Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers // Woodhead publishing series in metals and surface engineering: 2015. No 62. 792 p.
2. **Крукович, М. Г.** Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 84 с.
3. **Kulka, M.** Current trends in boriding: Techniques: Springer Nature, Switzerland, 2019. 282 с.
4. **Ворошнин, Л. Г.** Борирование стали / Л. Г. Ворошнин, Л. С. Ляхович. М.: Металлургия, 1978. 240 с.
5. **Usherenko Yu.** Composite Materials for Steel Cutting and Concrete Crushing / Yu. Usherenko, S. Usherenko, J. Yazdani // Procedia Engineering. 2017. No 172. P. 1198–1203.
6. **Petrov E.V.** Study of the high-velocity impact of tungsten particles with a steel target / E.V. Petrov, V S. Trofimov, V.O. Kopytskiy // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. No 1431.

### REFERENCES

1. **Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers.** Thermochemical surface engineering of steels. *Woodhead publishing series in metals and surface engineering*. 2015. No 62, Elsevier. 792 p.
2. **Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G.** *Plastichnost' borirovannyh sloev* [Plasticity of borated layers]. Moscow Publ., Fizmatlit, 2010, 384 p.
3. **Kulka M.** Current trends in boriding. Techniques: Springer Nature, Switzerland, 2019, 282 p.
4. **Voroshnin L.G., Lyakhovich L.S.** *Borirovanie stali* [Boring steel] Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 240 p.
5. **Usherenko Yu., Usherenko S., Yazdani J.** Composite Materials for Steel Cutting and Concrete Crushing. *Procedia Engineering*, 2017. No 172. P. 1198–1203.
6. **Petrov E.V., Trofimov V.S., Kopytskiy V.O.** Study of the high-velocity impact of tungsten particles with a steel target. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2020. No 1431.