

УДК 539.519

Г.А. Мишаков<sup>1</sup>, А.И. Родионов<sup>2</sup>**ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ  
ПОСЛЕ ДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Дзержинский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева)<sup>2</sup>

Изучено распределение микротвердости на глубине в образцах из различных конструкционных сталей, подвергнутых диффузионному борированию и последующей лазерной обработке. Исследованы режимы лазерного облучения, позволяющие частично или полностью растворять боридные слои в ванне расплава. Показана возможность полного сохранения боридного слоя с получением под ним закалочной зоны из жидкой ванны расплава.

*Ключевые слова:* диффузионное борирование, лазерная обработка, закалочная зона.

Известно, что полученные диффузионными методами боридные слои на сталях обладают высокой твердостью и хорошо работают в парах трения [1]. Основными недостатками боридных слоев являются низкая скорость роста и склонность к растрескиванию с увеличением их толщины. Высокие эксплуатационные качества достигаются лишь в том случае, когда под слоем прочих боридов имеется достаточно твердая основа. Физические процессы, протекающие при лазерном борировании металлов из боросодержащих обмазок, достаточно подробно исследованы в работах [2, 3], но микротвердость поверхностного слоя, полученного этими методами, значительно ниже микротвердости после диффузионного борирования.

Таким образом, представляется целесообразной разработка методов комплексной химико-термической и лазерной обработки как инструментальных, так и конструкционных сталей с целью увеличения рабочего ресурса деталей машин и механизмов. Особенно эффективны эти методы для изделий, имеющих области интенсивного локального износа.

В настоящей работе исследована возможность создания закалочной зоны под слоем боридов, полученных диффузионными методами, путем их последующей обработки излучением технологического СО<sub>2</sub>-лазера. Особое внимание уделено поиску режимов лазерной обработки, не приводящих к заметному разрушению боридного слоя, но создающего под ним закалочную зону из жидкой ванны лазерного расплава.

Для экспериментов были выбраны стали 40Х, 20Х, 9Х, Ст.20, Ст.3, Ст.45. Жидкостное безэлектродное борирование проводили в течение 2÷8 часов в боризаторе, содержащем 35% В<sub>4</sub>С 75% NaВ<sub>4</sub>О<sub>7</sub> при T = 1050°С. Борирование из твердой фазы осуществляли в герметичном контейнере с В<sub>4</sub>С и AlF<sub>3</sub> (1,5%) при 1000 °С в течение 9 часов. После химико-термической обработки образцы обрабатывали излучением СО<sub>2</sub>-лазера «Комета-2» с длиной волны 10,6 мкм и плотностью мощности ~ 5 · 10<sup>4</sup> Вт/см<sup>2</sup> при скорости сканирования 1,5÷3,0 мм/с. Лазерный луч фокусировали на поверхность металла фокусирующей системой на основе полированных медных зеркал с водяным охлаждением. В результате на поверхности образца формировалось пятно диаметром d = 2,3 мм. Специального поглощающе-легирующего покрытия не использовали.

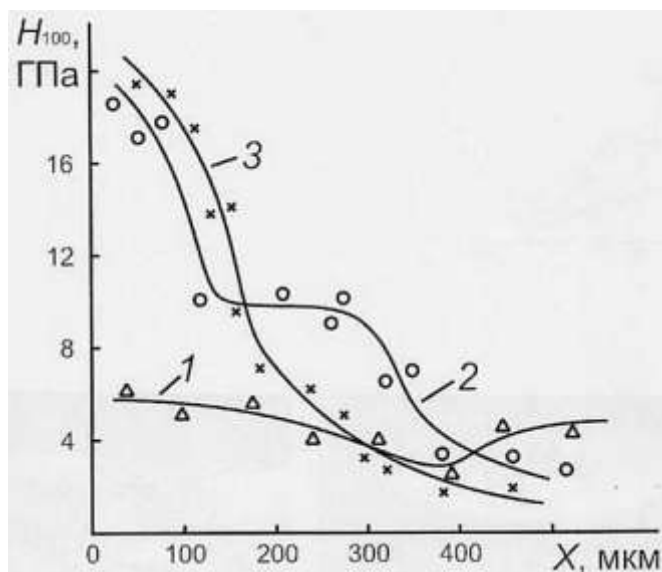
Из обработанных таким образом образцов готовили поперечные металлографические шлифы, которые протравливали в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микротвердость боридных слоев и закалочной зоны под ними измеряли микротвердомером ПМТ-3.

Для анализа концентрации бора в зоне обработки использовался метод α-трековой автордиографии. Метод основан на фиксации твердотельными детекторами следов

$\alpha$ -частиц, являющихся продуктами расщепления естественного изотопа  $B^{10}$  тепловыми нейтронами. Образцы с плотно прижатыми детекторами облучали нейтронами в канале реактора ВВР-СМ при плотности потока  $2 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в течении  $20 \div 1200 \text{ с}$ . Треки  $\alpha$ -частиц выявляли с помощью травления детекторов. Плотность треков анализировалась на металлографическом микроскопе.

Проведенные исследования показали, что при указанных выше режимах химико-термической и лазерной обработки в образцах с тонкими боридными слоями (до 50 мкм) происходит чаще полное, реже частичное их разрушение, а в образцах с боридными слоями  $\sim 100 \text{ мкм}$  и выше возможно полное их сохранение. Так, на стали 9Х с боридным слоем 20 мкм после облучении наблюдали полное растворение боридов в ванне расплава. Зона упрочнения с микротвердостью  $H=10 \div 12 \text{ ГПа}$  сформировалась до глубины 400 мкм (рис. 1, кривая 1).

На образцах из Ст.45 также наблюдали расплавление тонких  $\sim 50 \text{ мкм}$  боридных слоев, однако между расплавом боридов и зоной проплава матрицы основного металла наблюдали четкую границу (рис. 2, а). Перемешивание ванн расплавов не произошло. Микротвердость в зоне расплава боридов достигала величины  $H=19 \text{ ГПа}$ , а в зоне лазерной закалки из жидкой ванны  $\sim 10 \text{ ГПа}$ . Общая глубина зоны упрочнения  $\sim 350 \text{ мкм}$  (рис. 1, кривая 2).



**Рис. 1. Распределение микротвердости в образцах с полным (1) или частичным (2) проплавлением боридного слоя, а также его полным сохранением (3)**

После лазерной обработки боридных слоев толщиной  $220 \div 230 \text{ мкм}$  наблюдали либо частичное разрушение боридного слоя, либо полное его сохранение. На Ст.3 при скорости сканирования лазерного луча  $1,5 \text{ мм/с}$  толщина боридного слоя уменьшилась до  $150 \text{ мкм}$ . Микротвердость сохранившегося боридного слоя убывает от  $19$  до  $14 \text{ ГПа}$ . В закалочной зоне под боридами микротвердость составила  $H=6 \div 7 \text{ ГПа}$ . Закалка произошла из жидкой ванны лазерного расплава на что указывает четкая граница закалочной зоны. Микротвердость на основе  $H=3 \text{ ГПа}$  (рис. 1, кривая 3).

Типичные концентрационные профили бора, сформировавшегося в результате последовательного химико-термической и лазерной обработки Ст.3, приведены на рис. 2.

В зоне расплава наблюдали равномерное распределение концентрации бора, хотя на трекограммах наблюдали отдельное его скопление. Возможно, эти скопления соответствуют фазе FeB. Равномерное распределение бора в ванне расплава согласуется с моделью термо-

капиллярного массопереноса, согласно которой скорость движения частиц расплава велика и перемешивание ванны расплава достаточно интенсивное.

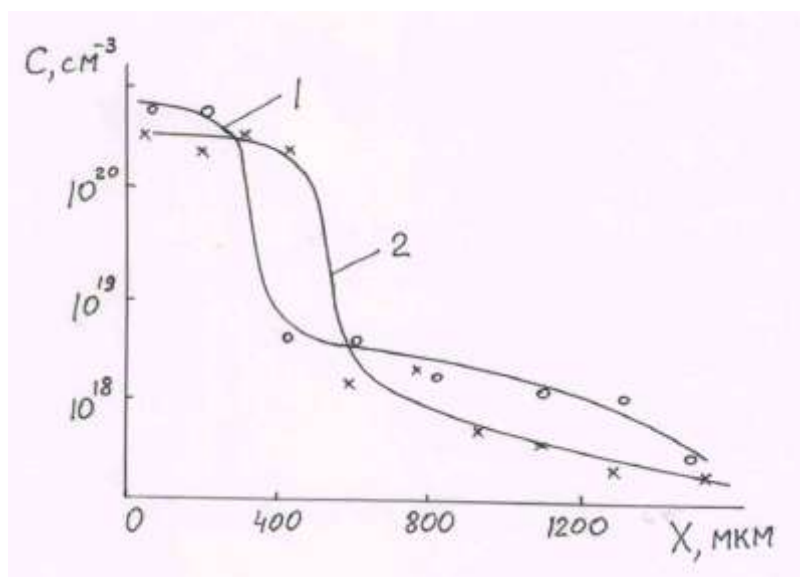


Рис. 2. Распределение содержания бора в Ст.3 при частичном (1) и полном (2) проплавлении боридного слоя

В твердой фазе под ванной расплава концентрации бора  $10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что указывает на ускоренную диффузию бора по границам зерен. Некоторые закономерности этого массопереноса обсуждались нами в работе [3].

При скорости сканирования лазерного луча менее 2 мм/с наблюдали появление небольшого числа микротрещин в боридном слое. При скорости сканирования 1,5 мм/с наблюдалось частичное разрушение боридных слоев даже значительной толщины (рис. 3).

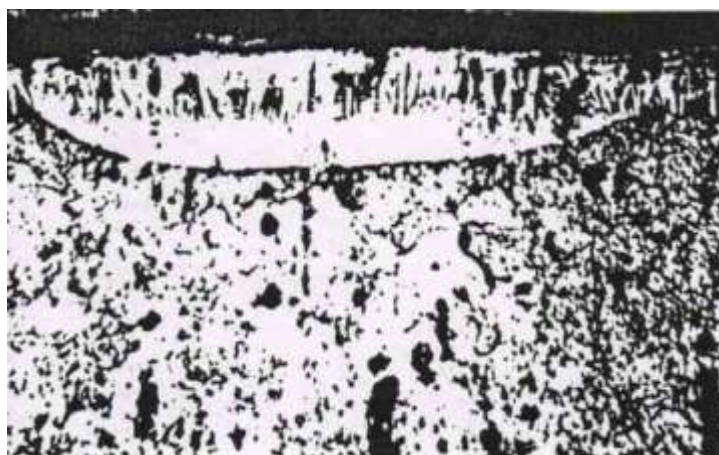


Рис. 3. Фотография микрошлифа с частичным разрушением боридного слоя (~230 мкм) при скорости сканирования лазерного луча ~ 1,5 мм/с (Ст.3)

С увеличением скорости сканирования до 3,0 мм/с толстые боридные слои полностью сохранялись. Под слоем боридов на стали 40Х металл расплавился на глубину до 200 мкм (рис. 4, б). Содержание бора в ванне расплава, полученное с помощью  $\alpha$ -трековой автордиографии, составило не более  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует примерно 0,1 %. Это подтверждает практически полное сохранение боридного слоя. Лазерное облучение боридного слоя не привело к заметному изменению его микротвердости, которая осталась достаточно высокой

$H=20\div 22$  ГПа. В затвердевшей ванне расплава под боридами микротвердость была  $H=8\div 9$  ГПа. Общая протяженность зоны упрочнения составила  $\sim 450$  мкм.

Можно предположить, что сохранение боридного слоя связано с кинетикой его растворения в ванне расплава матрицы металла. Несмотря на то что температуры плавления боридов FeB ( $1650^\circ\text{C}$ ) и  $\text{Fe}_2\text{B}$  ( $1410^\circ\text{C}$ ) сравнимы с температурой плавления стали, за время существования жидкой ванны расплава ( $\sim 1$  с) они не успевают раствориться и сохраняются на поверхности, а процесс кристаллизации матрицы не приводит к заметному их разрушению.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что лазерная обработка боридных слоев толщиной более 200 мкм, полученных на поверхности металла диффузионными методами, может быть проведена с полным или частичным сохранением боридного слоя. Выбором оптимального режима лазерной обработки можно сохранить высокую микротвердость в боридном слое и в тоже время создать под слоем боридов достаточно твердую основу, полученную из жидкой ванны лазерного расплава. Сохранение боридных слоев толщиной менее 50 мкм после лазерной обработки не представляется возможным.

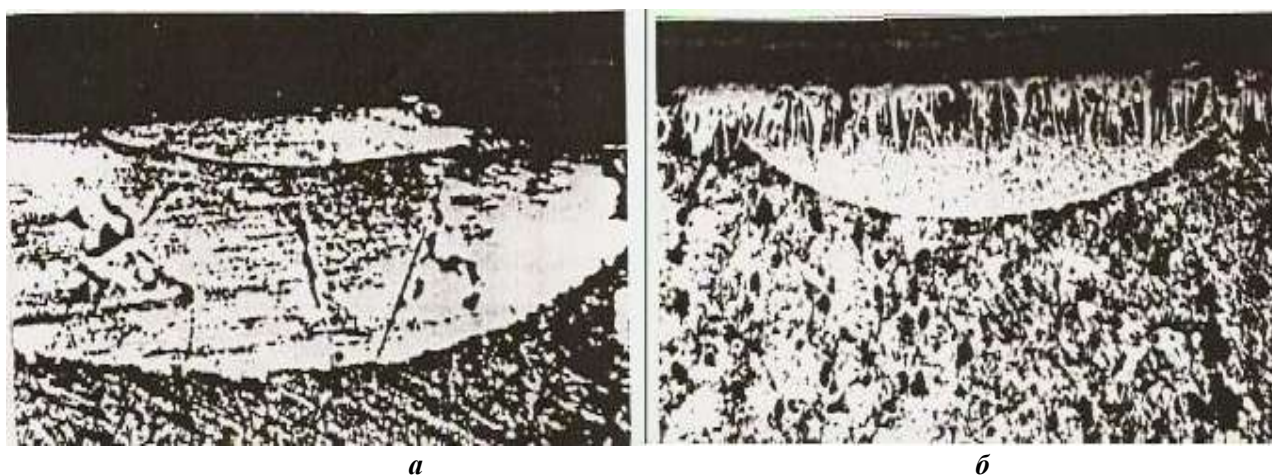


Рис. 4. Фотографии с микрошлифов, полученных после диффузного борирования и лазерной обработки с оплавлением (а) и сохранением (б) боридного слоя

Дополнительную лазерную обработку деталей, подвергнутых диффузионному борированию, можно рекомендовать в том случае, когда детали машин и механизмов имеют зоны локального износа, и именно они определяют конечную эксплуатационную стойкость изделия. Лазерная обработка борированных поверхностей большой площади экономически нецелесообразна.

Практическая реализация рассмотренной технологии лазерной обработки боридных слоев, полученных диффузионными методами, была выполнена на штоках плунжерных насосов высокого давления. Лазерная обработка была проведена в местах наиболее интенсивного износа. Эксперимент был проведен на 20 штоках. Достигнуто увеличение эксплуатационной стойкости примерно в два раза.

#### Библиографический список

1. Химико-термическая обработка металлов и слоев / под ред. М.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Лахтин, Ю.М. Поверхностное насыщение стали бором при воздействии излучения лазера / Ю.М. Лахтин, Я.Л. Коган, А.Н. Бурякин // Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 11. С. 9–11 с.

3. **Мишаков, Г.А.** О массопереносе бора в зону термического влияния под жидкой ванной лазерного расплава металла / Г.А. Мишаков, А.И. Родионов, Ю.Ф. Симахин // Физика и химия обработки материалов. 1991. №5. С. 100–103 с.

*Дата поступления  
в редакцию 21.05.2010*

**G.A. Mishakov, A.I. Rodionov**

### **LASER TREATMENT OF STRUCTURAL STEELS AFTER DIFFUSION BORONIZING**

The research has studied microhardness distribution by depth in samples from different structural steels that have been exposed to diffusion boronizing and the following laser treatment. Laser irradiation conditions allowing partially or fully to dissolve boride layers in a flux tank have been analyzed. The research has proved the possibility of absolute boride layer conservation with the formation of a quenching zone under it from a liquid flux tank.

*Key words:* Diffusion boronizing, laser treatment, quenching zone.