

3. **Лахтин, Ю.М.** Современное состояние процесса азотирования / Ю.М. Лахтин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1993. – № 7. – С. 17–21.

4. **Теория** и технология азотирования / Ю.М. Лахтин [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1991. – 320 с.

5. **Ионная** химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М.: *Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 1999. – 400 с.

6. **Бойназаров, У.Р.** Влияние предварительного окисления на процесс азотирования / У.Р. Бойназаров, А.А. Каримов // *Современные материалы, техника и технология : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 27 декабря 2013 г.; редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. В 3-х т.– Курск, 2013. Т. 1.* – С. 90–92.

7. **Будзыновский, Т.** Анализ влияния легирования и параметров процесса на структуру и свойства азотированных слоев сталей с целью оптимизации состава стали и технологии азотирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / Т. Будзыновский; СПбГТУ. – СПб., 2000. – 32 с.

8. **Using dynamic** pre-activation of steel surfaces for nitriding intensification / Y. Usherenko [et al.] // *11th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources : Proceedings, Rezekne, Latvia, 15–17 of June 2017.* – Rezekne, Latvia, 2017. – Vol. 3. – P. 321–324.

*УДК 621.785.5*

**В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОНИЦАЕМЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ**

**Введение.** Химико-термическая обработка применяется в различных отраслях машиностроения для повышения надежности и долговечности широкого ассортимента деталей машин и инструмента, позволяет получать на поверхности изделия слой, отли-

чающийся от сердцевины высоким комплексом физических, химических и механических свойств.

В настоящее время накоплен огромный опыт по применению различных видов химико-термической обработки (ХТО). Тем не менее, получение специальных диффузионных слоев с особой морфологией слоя по-прежнему является актуальной задачей.

Технология поверхностного легирования бором применима во многих отраслях промышленности, где речь идет, прежде всего, об абразивном изнашивании поверхностей деталей машин. К ним можно отнести: сельское хозяйство, производство строительных материалов, машиностроение и др. По данным ряда работ для инструментальных сталей, например, проведение борирования повышает стойкость инструмента в 1,5–8 раз [1, 2]. Существенная проблема боридных слоев – повышенная хрупкость.

Авторский опыт и известные положения ХТО позволяют выделить некоторые технологические приемы, способные изменить структуру и морфологию диффузионного слоя [2, 3–5]:

- предварительная обработка поверхности перед насыщением;
- управление температурно-временными параметрами и составом насыщающей среды;
- последующая после насыщения термическая и химико-термическая обработка.

В данной работе рассматривался вариант получения нетрадиционной морфологии слоя предварительной обработкой поверхности, в частности предварительным меднением.

**Материалы и методика исследований.** Меднение образцов из стали 10 проводилось электролитическим осаждением в растворе медного купороса, при температуре 20–25 °С и плотности тока 1–1,5 А/дм<sup>2</sup>.

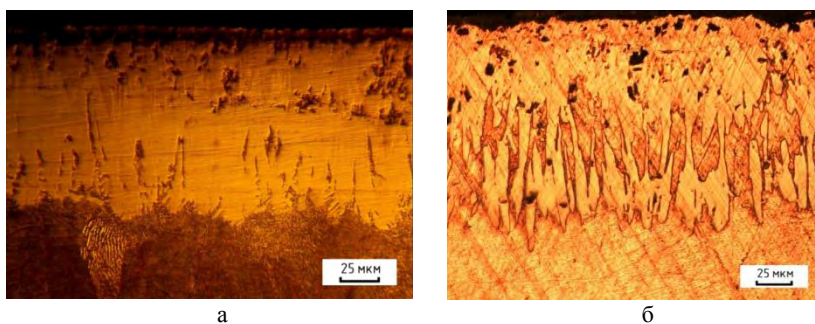
Борирование проводили в порошковых смесях при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором по причине простоты и доступности такого способа насыщения. Режим обработки был выбран традиционный: температура 920 °С, время 4 ч. Для проведения процесса использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Контроль температуры осуществляли при помощи потенциометра КСП-3П, градуировка ХА. Для проведения процесса диффузионного насыщения

использовали порошковую среду для однофазного борирования «besto-bor».

**Результаты исследований.** Основная цель предварительного меднения – создать условия, чтобы растущие боридные иглы распределялись по стальной матрице не сплошным слоем, а фрагментами. Получить такой слой можно разделив диффузионный поток путем создания пористого (полупроницаемого) медного слоя, который будет являться своего рода мембраной, пропуская через себя атомы бора только в местах пор. В результате получаемая боридная фаза будет чередоваться с мягкой, например, ферритной матрицей.

Одним из важнейших критериев, имеющих решающее значение для эффективного применения на производстве, является хрупкость полученных термодиффузионных боридных слоев. Очевидно, что получаемое строение диффузионного слоя будет способствовать снижению хрупкости и склонности к скалыванию диффузионного слоя при высоких контактных давлениях.

На рисунке 1 представлен вариант однофазного боридного слоя, полученный при традиционных условиях насыщения (а), и вариант боридного слоя, полученный после предварительного меднения (б).



а – традиционный слой; б – диффузионный слой, полученный после предварительного меднения

Рисунок 1 – Микроструктуры термодиффузионных однофазных боридных слоев

При предварительном меднении и выбранных режимах насыщения сформировался диффузионный слой с двумя характерными

зонами. На рисунке 1, б верхний участок слоя сплошной, в нижней части сохранилась раздробленность боридных игл. Раздробленность и образование двух зон свидетельствует не только о происшедшем разделении диффузионного потока, но также о существовании периода «работы» медного слоя, который в результате термодиффузионной обработки постепенно разрушался, переходя в диффузионный слой и в переходную зону.

Отметим, что полученная нетрадиционная структура слоя, кроме снижения хрупкости, может способствовать, например, улучшению антифрикционных свойств диффузионного слоя. Известно, что растворимость меди в железе и боре при комнатной температуре ничтожно мала, большая часть меди при формировании слоя должна распределяться собственными включениями в структуре. Проведенными экспериментами подтверждается наличие меди в структуре в виде обособленных дисперсных включений округлой и продолговатой формы с размерами порядка 1–10 мкм (рисунок 2).



Рисунок 2 – Микроструктуры термодиффузионного однофазного боридного слоя с включениями меди,  $\times 1000$

Такая структура достаточно перспективна для деталей, работающих в парах трения, в этом случае включения меди могут частично выполнять роль смазки [4, 5]. Кроме того, микротвердость диффузионных слоев (низкобистой фазы) получается несколько выше традиционной и достигает значений 14 000–15 000 МПа (рисунок 3). Авторские данные косвенно подтверждаются данными других исследователей, которые получены при боромеднении [1, 2].

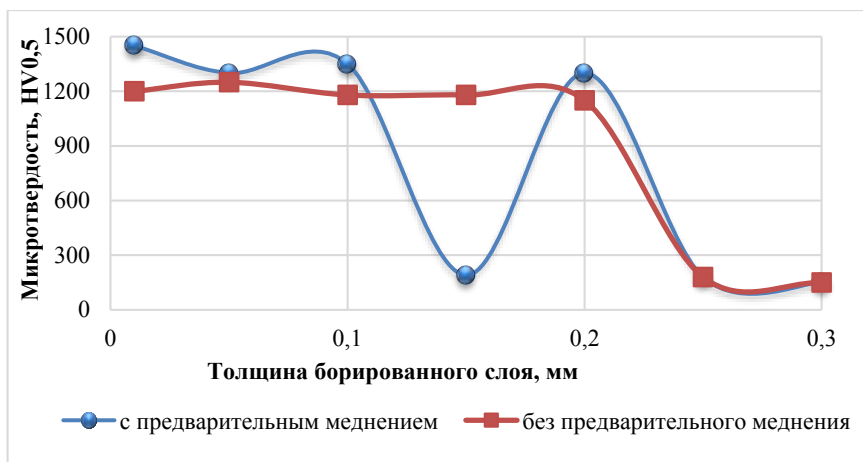


Рисунок 3 – Распределение микротвердости по толщине боридного слоя

Отметим еще одну особенность получаемых структур. Как известно, боридные слои при высоких контактных нагрузках могут выкрашиваться из-за отсутствия возможности пластически деформироваться [2, 5]. В нашем случае, в связи с появлением в структуре включений меди, у которой модуль упругости значительно меньше, чем у боридов, предполагается некоторое снижение и релаксация внутренних напряжений на межфазной границе и в структуре слоя, что в свою очередь должно привести к снижению хрупкости боридного слоя.

**Заключение.** Показано, что предварительное меднение не всегда является барьерным слоем для формирования и роста боридов при ХТО. В определенных условиях такой слой является полупроницаемым, в этом случае он значительно меняет морфологию диффузионного боридного слоя, формируется структура с несколькими характерными зонами, в частности, зонами сплошных и раздробленных боридных игл.

Установлено, что в процессе такой двухстадийной обработки (меднение + борирование) в структуре диффузионного слоя формируются обособленные дисперсные включения меди с размерами порядка 1–10 мкм.

Также отмечается, что микротвердость получаемых диффузионных слоев несколько выше, чем при традиционных режимах борирования. В частности на стали 10 микротвердость низкобористой фазы составляет 14 000–15 000 МПа.

## Литература

1. **Минкевич, А.Н.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
2. **Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.
3. **Matijevic, B.** Evaluation of boride layer growth on carbon steel surfaces / B. Matijevic // Metal science and Heat treatment. – 2014. – Vol. 56. – № 5-6. – P. 269–273.
4. **Дукаревич, И.С.** Перераспределение элементов в борированном слое / И.С. Дукаревич, М.В. Можаров, А.В. Шигаев // МиТОМ, 1973. – № 2. – С. 64–66.
5. **Константинов, В.М.** Изменение морфологии термодиффузионного боридного слоя при предварительном меднении основы / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, М.А. Судников // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 17-й Международ. науч.-техн. конф., Одесса, 29 мая–2 июня 2017 г. – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 65–68.

УДК 620.181

**А.Н. ГРИГОРЧИК**, канд. техн. наук  
(ОИМ НАН Б),  
**Е.В. АСТРАШАБ** (БНТУ)

### **СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 40X13, НАПЫЛЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ГАЗА МАФ**

**Введение.** Метод газотермического напыления (ГТН) покрытий с использованием проволочных материалов относится к аддитивным технологиям и основан на использовании продуктов сгорания горючих газов для распыления расплавленных частиц, что позволяет формировать поверхностные слои деталей машин и механизмов машиностроительного профиля с требуемыми физико-