

## ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СТРУКТУРЫ БОРИРОВАННЫХ СЛОЕВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 08кп

Б.Д. Лыгденов, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев

Структура, возникающая при борировании, является типичной градиентной структурой, в которой значительный набор параметров меняется от поверхности к центру образца. Борирование стали привело к образованию большого количества границ в структуре переходной зоны. Были измерены расстояния между границами, созданными как в результате борирования, так и термообработкой стали (границами зерен) в зависимости от расстояния от поверхности образца до его центральной части, т.е. до 6,5 мм.

Как показали исследования, проведенные методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии, фазовый состав и объемная доля фаз по мере продвижения в глубь образца меняется. Количественные оценки и взаимное расположение фаз будут обсуждаться в следующем разделе. Здесь же, мы будем описывать фазовый состав стали 08кп после борирования, не привязываясь к месту исследования на образце. В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. В любой точке образца присутствуют зерна феррита  $\alpha$ -фаза (твердый раствор атомов внедрения и замещения на основе  $Fe_\alpha$ ) разной степени легированности. Причем в переходной зоне образца и в основном металле она составляет основную часть материала.

2. Кроме  $\alpha$ -фазы присутствует пластинчатый перлит в виде зерен или прослоек по границам зерен  $\alpha$ -фазы. Перлит представляет собой чередование практически параллельных между собой пластин  $\alpha$ -фазы и карбида железа - цементита  $Fe_3C$ . Цементит имеет орторомбическую решетку. Кроме того, цементит присутствует и в виде прослоек по границам зерен " $\alpha$ -фаза - цементит" (рисунок 6) и по границам зерен  $\alpha$ -фазы (рисунок 1).

3. Карбоцементит (борный цементит)  $Fe_3(C,B)$ , в котором часть углерода замещена бором. Разделение цементита  $Fe_3C$  и борированного цементита  $Fe_3(C,B)$  может быть выполнено по различию параметра решетки. Эта разница составляет:

$$\nabla a = +0,036\text{нм}, \quad \nabla b = -0,0134\text{нм}, \quad \nabla c = -0,0094\text{нм}.$$

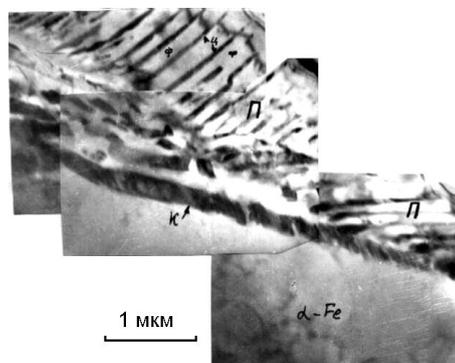
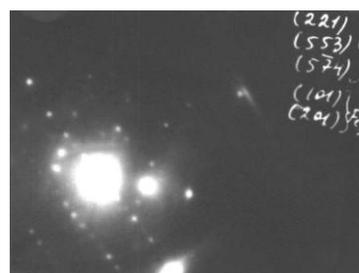


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали 08кп П – перлитная колония: пластины цементита (Ц) и феррита (Ф); К – прослойки цементита по границам зерен " $\alpha$ -фаза - цементит"



а



б

Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали 08кп. К – прослойки цементита по границам зерен  $\alpha$ -фазы (а) и микродифракционная картина (б), подтверждающая наличие цементита

Это достаточно, чтобы разделить дифракции  $Fe_3C$  и  $Fe_3(C,B)$  по данным электронной микроскопии. На рисунке 3. приведена дифракционная картина и ее расшифров-

**ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СТРУКТУРЫ БОРИРОВАННЫХ СЛОЕВ  
МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 08кп**

ка с участка, содержащего как фазу  $Fe_3C$ , так и фазу  $Fe_3(C,B)$ .

Присутствует борный цементит в основном в переходной зоне. Карбоцементит  $Fe_3(C,B)$  присутствует как в виде отдельных частиц (рисунок 4), так и в перлитных колониях (рисунок 5). При этом перлитные колонии имеют вид частично разрушенных и "изъеденных" образований.

4. Карбоборид  $Fe_{23}(C,B)_6$  имеет кубическую решетку. Частицы  $Fe_{23}(C,B)_6$  имеют вытянутую форму, размер их меняется слабо и составляет в среднем  $0,02 \times 0,01$  мкм. Располагаются они, как правило, в теле зерна  $\alpha$ -фазы на дислокациях (рисунок 6) или в виде скоплений (рисунок 7). Скорее всего расположенные в объеме частицы  $Fe_{23}(C,B)_6$  образовались с частичным использованием атомов углерода, расположенных в дислокационных дисках и кластерах исходного образца (см. предыдущий раздел). Частицы  $Fe_{23}(C,B)_6$  на дислокациях также при их образовании могли изъять часть атомов углерода с дислокаций, т.е. из ядер дислокаций и атмосфер Коттрелла вокруг них. По-видимому, карбиды на границах зерен также формируются за счет двух источников атомов углерода: 1) пришедших с поверхности по каналам диффузии и 2) ранее присутствовавших на границах зерен.

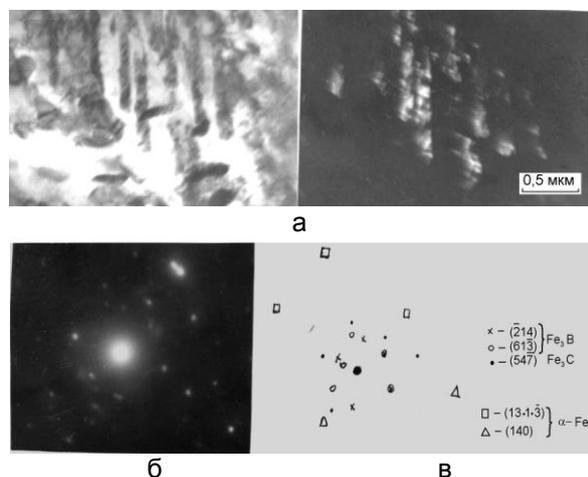


Рисунок 3 – Электронно-микроскопическое изображение участка структуры, содержащего борированный  $Fe_3(C,B)$  и углеродистый  $Fe_3C$  цементит. Микродифракционная картина (б), полученная с этого участка, и ее индцированная схема (в) подтверждают наличие обеих фаз

5. Карбид бора  $B_4C$  - равновесная фаза тройной диаграммы Fe - B - C.  $B_4C$  имеет гексагональную решетку. Фаза  $B_4C$  присутствует в стали только на поверхности боридного слоя. На присутствие этой фазы на поверхности образца указывают данные рентгеноструктурного анализа и присутствие на микродифракционной картине четких рефлексов (рисунок 8 б). К сожалению, по такой сложной картине (рисунок 8 а), где присутствуют одновременно фазы  $Fe_3(C,B)$ ,  $Fe_{23}(C,B)_6$  и  $B_4C$  (о чем свидетельствует полученная с этого участка микродифракционная картина) сказать, что представляют из себя выделения  $B_4C$ , затруднительно. Скорее всего, это небольшие вкрапления, которые оказываются на поверхности образца вследствие переноса их из обмазки.

Выделения борного цементита  $Fe_3(C, B)$  внутри зерен  $\alpha$ -фазы (а), микродифракционная картина, подтверждающая наличие борного цементита (б), и темнопольное изображение, полученное в рефлексе  $[021]_c$ .

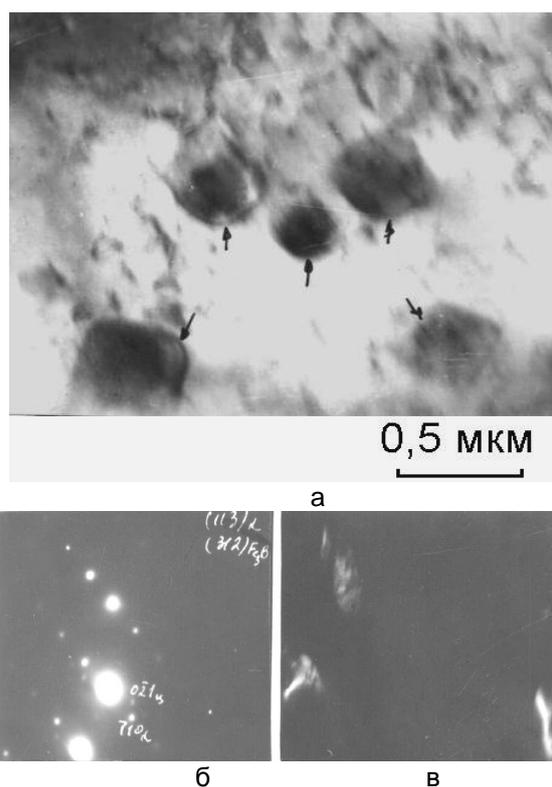
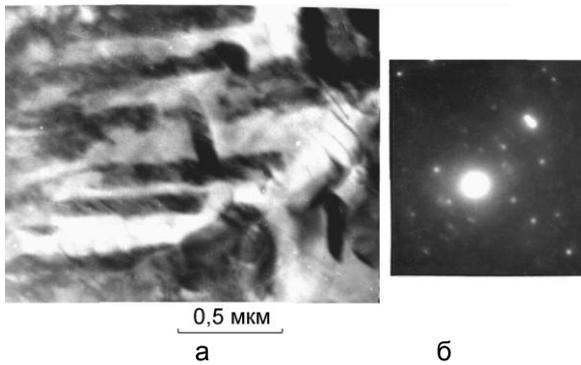
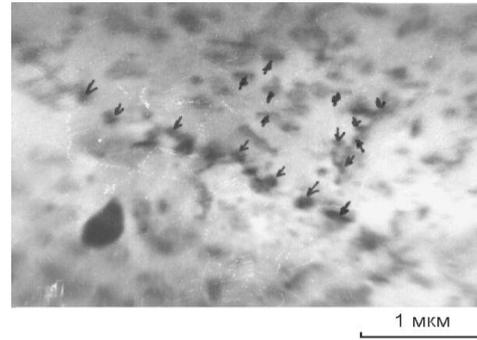
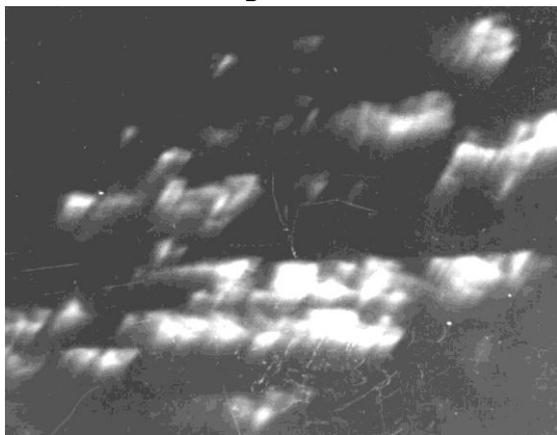


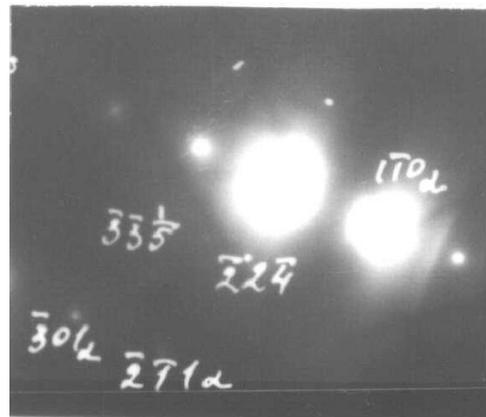
Рисунок 4 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали



в



а



б

Рисунок 5 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали 08кп. Превращение пластинчатого цементита  $Fe_3C$  в выделения борного цементита  $Fe_3(C,B)$  внутри зерен перлита на глубине 200 мкм от поверхности образца: а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина; в – темнопольное изображение, полученное в рефлексе [131]

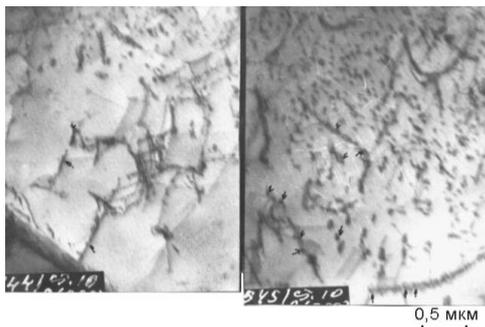
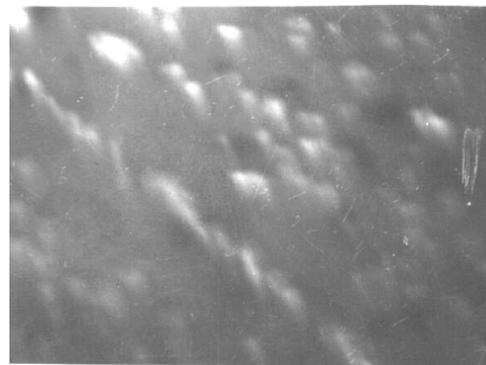


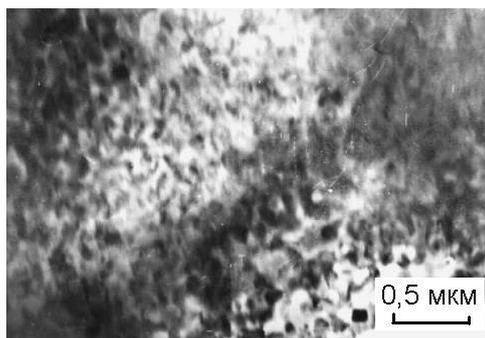
Рисунок 6 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали 08кп. Выделения карбоборида  $Fe_{23}(C,B)_6$  внутри зерен  $\alpha$ -фазы на дислокациях



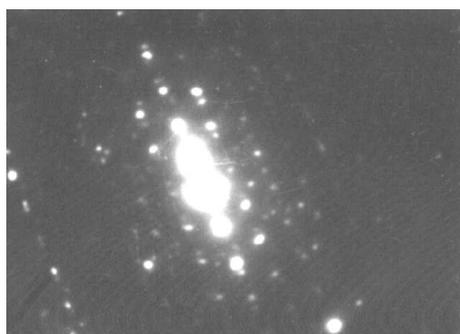
в

Рисунок 7 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали 08кп. Выделения карбоборида  $Fe_{23}(C,B)_6$  внутри зерен  $\alpha$ -фазы в виде скоплений на глубине 2,5 мм от поверхности образца: а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина; в – темнопольное изображение, полученное в рефлексе [161]

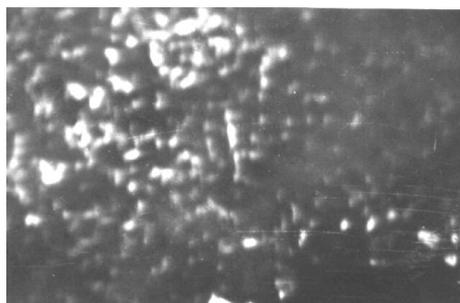
## ГЕТЕРОГЕННОСТЬ СТРУКТУРЫ БОРИРОВАННЫХ СЛОЕВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 08кп



а



б



в

Рисунок 8 – Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры борированной стали 08кп. Выделения карбоборида  $Fe_{23}(C,B)_6$  внутри зерен  $\alpha$ -фазы в виде скопления на глубине 2,5 мм от поверхности образца: а – светлопольное изображение; б – микродифракционная картина содержит плоскости (102) фазы  $Fe_3(C,B)$ , (113) и (115) фазы  $Fe_{23}(C,B)_6$ , (021) фазы  $B_4C$  и (320)  $\alpha$ -фазы; в – темнопольное изображение

6. Борид  $Fe_2B$  - фаза, имеющая тетрагональную решетку. Как мы уже сообщали выше, эта фаза при наблюдении в оптическом микроскопе имеет иглообразную форму. В электронном микроскопе она представляет собой зерна вытянутой формы. Плотность дислокаций внутри зерен фазы  $Fe_2B$  очень низкая ( $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$ ).

7. Борид  $FeB$  – фаза с орторомбической решеткой. Эта фаза присутствует в боридном слое в виде частиц округлой формы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-50241)*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования.- Барнаул, Изд-во АлтГТУ.-2000.-216 с.

2. Лыгденов Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: Дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2004. 222 с.

*Восточно-Сибирский государственный технологический университет*

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*