

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ БОРИРОВАННОЙ СТАЛИ 55Л

В.И. Мосоров, А.Д. Грешилов, Б.Д. Лыгденов

Химико-термическая обработка является упрочняющей технологией при поверхностном упрочнении углеродистых сталей. В данной работе проводили процесс борирования на стали 55Л при режимах соответствующих в монографии[1].

Методика исследования

Исследования проводились тремя методами: методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), методом электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) и методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Исследование поверхности, выполненное методом РЭМ, проведено с помощью электронного микроскопа Tesla BS-301. Электронно-микроскопические исследования проведены на электронном микроскопе ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ. Идентификация фазового состава и определение размеров и объемной доли выделений проводилось по изображениям, подтвержденным микродифракционными картинками и темнопольными изображениями, полученными в соответствующих рефлексах.

Съемки рентгенограмм проводили на дифрактометре ДРОН-3 в монохроматическом Fe-K α излучении с автоматической записью на диаграммную ленту.

Для приготовления фольг для просмотра в электронном микроскопе из образцов на различных глубинах вырезались тонкие пластинки толщиной 0.2 – 0.3 мм на электроискровом станке. Режим вырезки был подобран таким образом, что не вносил дополнительной деформации и, следовательно, не влиял на структуру образца. Фольги полировались электролитически. Состав электролита: пересыщенный раствор ортофосфорной кислоты хромовым ангидридом. Температура электролита при приготовлении фольг составляла 30-50 $^{\circ}$ C.

По снимкам, полученным в электронном микроскопе, измерялись следующие параметры: средние размеры зерен; размеры, плотность и объемные доли выделений; скалярная плотность дислокаций, амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки [2].

Фазовый состав диагностировался по дифракционным картинкам, полученным двумя способами: 1) рентгеновскому дифракционному анализу и 2) дифракционной электронной микроскопии.

Результаты изучения фазового состава и структуры борированных слоев

Всю картину воздействия бора на структуру стали можно разделить на 4 слоя. Во-первых, это борированный слой, который, в свою очередь, делится на два слоя I (верхний или приповерхностный) и II (нижний или подповерхностный). Во-вторых, это переходной слой, названный нами как слой III. И, в-третьих, это слой основного металла – слой IV. На рисунке 1 указана структура слоев по глубине материала и концентрация бора в них. Для разных сталей картина слоев по глубине различная, однако принципиальная структура слоев I – IV сохраняется.

Глубина борированного слоя составляла 170 мкм. Следующие слои были просмотрены на больших расстояниях от поверхности борирования. С целью достижения большего объема информации исследования, как правило, глубины изучаемых слоев методами ПЭМ и РСА не совпадали.

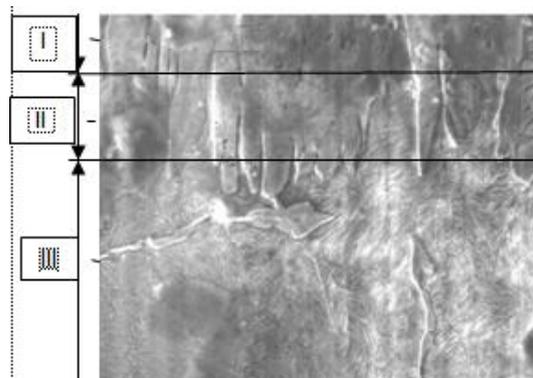


Рисунок 1 – Структура слоя по глубине на стали 55Л

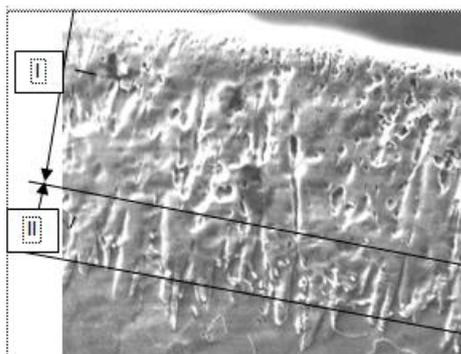


Рисунок 2 – Борированный слой на стали 55Л

Таблица 1 - Толщина борированного слоя в исследуемой стали

Марка стали	Размер образца $\frac{1}{2}H$ (мм)	Толщина борированного слоя (мкм)	толщина слоя I (мкм)	толщина слоя II (мкм)
Сталь 55Л	3.8	170	130	40

Примечание: Размер слоев определялся по микрофотографиям, полученным по изображениям в растровом электронном микроскопе при рабочем увеличении 1000 крат.

В слое I возникают только бориды железа, которые и составляют его структуру (см. рис.2, на котором приведен пример разделения на слои I и II). В слое II наряду с боридом железа обнаруживается α -фаза, доля которой в этом слое постепенно возрастает и, тем не менее, к концу слоя её доля составляет не более 50% от объема материала слоя. В слое III в отдельных местах еще встречаются бориды железа, а также в значительных количествах возникают карбобориды $Fe_3(C,B)$ и $Fe_{23}(C,B)_6$, и морфология слоя кардинально изменяется. Поскольку бора поступает много, то объемная доля образующихся карбоборидов оказывается выше, чем карбидов. Нередко и размеры частиц также выше. В слое IV структура стали в основном сохраняется такой, какой она была в стали до борирования.

Отметим, что, так как борирование образцов осуществлялось по всем граням, то и проникновение бора в глубь материала на

всех гранях было одинаковым. В связи с этим для исследования выбиралась какая-либо одна грань образца, по мере удаления от которой производилась вырезка образцов. Четыре боковые грани, ей перпендикулярные, отрезались. Таким образом, борированными поверхностями оказывались две противоположные грани образца. Считая, что влияние бора от обеих граней одинаково, образец разрезался по высоте (H) на две равные части. Затем одна часть ($\frac{1}{2}H$) нарезалась на фольги. И именно в этой части образца было выявлено разделение материала на четыре слоя. Основу слоев I и II составляют бориды, а именно, FeB , Fe_2B и ещё Fe_8B , причем слой I состоит исключительно из этих боридов.

Дефектная структура

Как мы отмечали ранее, бориды FeB , которые представляют собой крупные кристаллы и составляют основу слоя, являются бездефектными, поэтому слой I – это бездефектный слой.

В слое II, помимо боридов FeB и Fe_2B присутствует α -фаза, обладающая дефектной (дислокационной) структурой. Скалярная плотность дислокаций (измерения выполнены методом секущих [3]) в этом слое достаточно велика и составляет величину $\sim 4.5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. По мере удаления от борированной поверхности плотность дислокаций в стали 55Л возрастает с выходом на насыщение (см. табл.2).

Таблица 2 – Количественные параметры структуры (данные ПЭМ)

Слои (мкм)	Сталь 55Л	
	$\rho \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$	$\chi, \text{ см}^{-1}$
Борированный слой	I	
	II	
Промежуточный слой	III	1.6
Слой основного металла	IV	3.8
		260
		300

Можно констатировать, что борирование формирует своеобразный особый вариант дислокационной структуры по слоям. В слое I, и в слое II почти так же, крупные бориды железа бездефектны.. В α -фазе дислокации

всегда присутствуют, и их скалярная плотность дислокаций увеличивается при удалении от борированного слоя. Соответствующий рост скалярной плотности дислокаций (ρ) с удалением от борированной поверхности (X) представлен на рис.3. Совершенно очевидно, что зависимость $\rho = f(X)$ представляет собой зависимость, обратную зависимости $C_B = f(X)$. Этому можно дать объяснение. Наиболее равновесная структура – это бориды железа. Они практически не напряжены и не генерируют дислокации. Поскольку бор не растворяется в кристаллической решетке α -фазы, он осаждается на дефектах кристаллического строения – дислокациях, границах зерен и может оказаться даже в вакансиях.

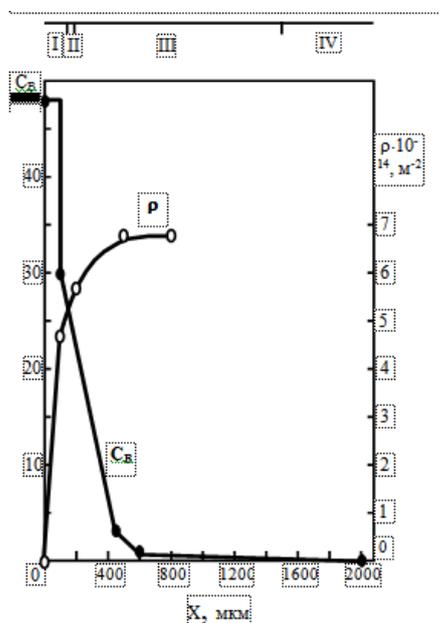


Рисунок 3 – Изменение концентрации бора (C_B) и скалярной плотности дислокаций (ρ) по мере удаления от борированной поверхности (X). Римскими цифрами отмечены границы слоев (Представленные данные – есть усреднение по всем исследуемым сталям)

Растворенные таким образом атомы бора создают внутренние напряжения и генерируют дислокации. Другое место локализации атомов бора – мелкие частицы карбоборидов $Fe_3(C,B)$ и $Fe_{23}(C,B)_6$.

Рост этих частиц создает внутренние напряжения и генерирует дислокации. Поэтому зависимости $C_B = f(X)$ и $\rho = f(X)$ прямо противоположные.

Заключение

В этом разделе детально исследована структура борированного слоя на стали 55Л, фазовый состав и плотность дефектов. Исследования показывают борированный слой на расстоянии 130 мкм от поверхности состоит почти полностью из борида железа FeB . В небольших количествах присутствуют бориды Fe_2B и в отдельных случаях Fe_3B . Остальная часть слоя состоит из борида железа и наряду с ними присутствуют α -фаза и карбобориды $Fe_3(C,B)$ и $Fe_{23}(C,B)_6$. В работе детально исследован фазовый состав и дефектное строение слоев. Установлено, что, во-первых, по мере удаления от поверхности борирования концентрация атомов бора уменьшается, в то время как плотность дефектов кристаллической решетки возрастает. Это связано с удалением от равновесной структуры по мере удаления от борированной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования сталей. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 177с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. Т.1 /Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992с.
3. Хирш П., Хови А., Николсон Р. и др. Электронная микроскопия тонких кристаллов. – М.: Мир, 1968. – 574с.

Мосоров В.И., аспирант,
e-mail: vlmosorov@yandex.ru
Грешилов А.Д., к.т.н., доцент, декант
Машиностроительного факультета,
e-mail: agreshilov@mail.ru.
Лыгденов Б.Д., д.т.н., доцент,
зав.кафедрой «Металловедение и технологии обработки материалов»,
e-mail: maydarka@mail.ru
ФГБОУ ВПО "Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления", г. Улан-Удэ