

УДК 621.785:669.14.08.29

*А.В. Ионина<sup>1</sup>, Е.С. Ващук<sup>1</sup>, С.В. Райков<sup>1</sup>, Ю.Ф. Иванов<sup>2</sup>,  
Е.А. Будовских<sup>1</sup>, В.Е. Громов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО БОРОАЛИТИРОВАНИЯ И БОРОМЕДНЕНИЯ\*

Электровзрывное легирование (ЭВЛ) [1] осуществляется с целью модификации структуры, фазового состава и функциональных свойств поверхностных слоев металлов и сплавов. Инструментом воздействия на поверхность при ЭВЛ являются импульсные многофазные плазменные струи, формируемые из продуктов электрического взрыва проводников. Обработка поверхности проводится с ее оплавлением. При этом вблизи поверхности образуется ударно-сжатый слой с высокими температурой и давлением, а в оплавляемой зоне легирования, которая насыщается компонентами плазмы, развиваются интенсивные процессы конвективного перемешивания, приводящие к перераспределению легирующих элементов по всей глубине расплава. Послойные электронно-микроскопические исследования показали [1], что при ЭВЛ в зоне легирования образуются наноразмерные упрочняющие фазы (карбиды, бориды, интерметаллиды и др.).

В работе [2] показано, что последующая электронно-пучковая обработка (ЭПО) с оплавлением поверхности электровзрывного алитирования стали 45 позволяет выгладить ее рельеф, при этом сохраняется высокий уровень микротвердости.

Целью настоящей работы является анализ влияния импульсно-периодической ЭПО на рельеф, структуру и фазовый состав поверхностных слоев стали 45 после электровзрывного бороалитирования и боромеднения.

В качестве материала подложки использованы образцы в виде шайб диам. 20 мм толщиной 3 мм. Исходная структура стали в отожженном состоянии представлена колониями перлита пластинчатой морфологии и зернами структурно-свободного феррита.

Электровзрывное легирование осуществляли на установке ЭВУ 60/10 [1]. Для формирования струи использовали алюминиевую и медную фольги толщиной 20 и 15 мкм и массой 40 и 35 мг, на которых размещали навески порошка аморфного бора массой 60 и 20 мг соответственно. Режимы ЭВЛ обеспечивали по-

глощаемую плотность мощности ( $q_p$ ) 4,7 и 8,6 ГВт/м<sup>2</sup> соответственно. При этом глубина зоны легирования достигала 20 – 25 мкм.

Электронно-пучковую обработку поверхности образцов после ЭВЛ осуществляли на лабораторной установке «Соло» Института сильноточной электроники СО РАН [3]. Импульсные плазменные струи, используемые при ЭВЛ, и низкоэнергетические сильноточные электронные пучки имеют сопоставимые значения времени импульсного воздействия на поверхность (приблизительно 10 – 100 мкс), диаметра зоны воздействия (несколько десятков мм) и поглощаемой плотности мощности (порядка 1 ГВт/м<sup>2</sup>), что дает возможность их эффективного совместного использования.

В настоящей работе на основании ранее выполненных исследований [2] выбраны режимы ЭПО поверхности стали после ЭВЛ, при которых поглощаемая плотность мощности  $q_e$  пучка электронов находилась в пределах 1,0 – 4,0 ГВт/м<sup>2</sup>, длительность  $\tau$  импульсов составляла 50, 100 и 200 мкс, частота их следования 0,3 Гц, число  $N$  импульсов составляло 5 и 10.

Исследования структуры и фазового состава поверхностных слоев стали после обработки проводили методами сканирующей, дифракционной электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Размеры структурных составляющих материала определяли с применением методов планиметрии.

Сканирующая электронная микроскопия показала, что электровзрывное бороалитирование и боромеднение сопровождаются формированием на поверхности высокоразвитого рельефа (рис. 1, а, б), что обусловлено, прежде всего, радиальным течением расплава от центра зоны легирования к ее периферии и осаждением на поверхности частиц капельной фракции продуктов взрыва из тыла струи [1]. Видны деформированные капли, образовавшиеся при разрушении фольги, и шарообразные частицы размерами от 1 до 10 мкм, которые могли образоваться в результате взаимодействия продуктов взрыва фольги с частицами порошковой навески бора. Размер деформированных капель достигает нескольких десятков микрометров. Хорошо различима сетка микротрещин, пронизывающая как частицы покрытия, так и поверхность зоны легирования. После-

\* Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.0813), грантами РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а, № 11-02-12091-офи-м-2011) и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

дующая ЭПО приводит к выглаживанию поверхности образцов (рис. 1, *в, з*). Вместе с тем сохраняются отдельно расположенные островки с рельефом, сформированным при ЭВЛ, по-видимому, с частицами бора (рис. 1, *в*). Их количество и размеры после обработки при  $q_e = 1,0 \text{ ГВт/м}^2$  меньше, чем после обработки при  $q_e = 4,0 \text{ ГВт/м}^2$ . Релаксация термических напряжений, возникающих в поверхностном слое стали в результате высоких скоростей нагрева и охлаждения при ЭПО, приводит к сохранению сетки микротрещин (рис. 1, *з*).

Детальный анализ структуры поверхности после электровзрывного бороалитирования и ЭПО выявил декорирование границ зерен частицами вторых фаз (рис. 2). Их размеры изменяются в пределах  $0,25 - 0,50 \text{ мкм}$ . Включения второй фазы обнаруживаются и в объеме зерен (рис. 2, *б*). В этом случае размеры частиц изменяются в пределах  $0,15 - 0,17 \text{ мкм}$ .

Электровзрывное боромеднение и последующая ЭПО приводят к формированию на поверхности структуры дендритной и ячеистой кристаллизации (рис. 3). При плотности мощности пучка электронов  $2,0$  и  $2,5 \text{ ГВт/м}^2$  и длительности импульсов  $100$  и  $200 \text{ мкс}$  количество зерен с дендритной кристаллизацией заметно

больше, чем с ячеистой, а при  $q_e = 3,0 \text{ ГВт/м}^2$  формируется только структура дендритной кристаллизации. С ростом значений  $q_e$  и  $\tau$  среднее расстояние  $\lambda_1$  между ячейками и осями первого порядка дендритов и средний диаметр  $D$  зерен увеличиваются в  $1,5 - 2,0$  раза. При плотности мощности пучка электронов  $2,0, 2,5$  и  $3,0 \text{ ГВт/м}^2$  и  $\tau = 100 \text{ мкс}$  значения  $\lambda_1$  составляют  $0,51, 0,66$  и  $1,00 \text{ мкм}$ , а значения  $D - 5,8, 9,0$  и  $10,7 \text{ мкм}$  соответственно. При тех же значениях  $q_e$  и длительности импульсов  $200 \text{ мкс}$  значения  $\lambda_1$  увеличиваются до  $0,84, 1,18$  и  $1,50 \text{ мкм}$ , а значения  $D -$  до  $10,5, 12,8$  и  $13,5 \text{ мкм}$  соответственно. С учетом ошибок измерений можно говорить о линейном характере этих зависимостей. Особенностью дендритов является то, что они имеют только слабо выраженные оси второго порядка, которые соприкасаются друг с другом.

Просвечивающая электронная микроскопия зоны электровзрывного бороалитирования в слое на глубине  $10 - 15 \text{ мкм}$  после обработки при  $q_e = 4,0 \text{ ГВт/м}^2$  и длительности импульсов  $50 \text{ мкс}$  выявила многофазную структуру. Эта структура представлена кристаллами мартенсита пакетной и пластинчатой морфологии, прослойками остаточного аустенита (рис. 4, *а - в*), зернами

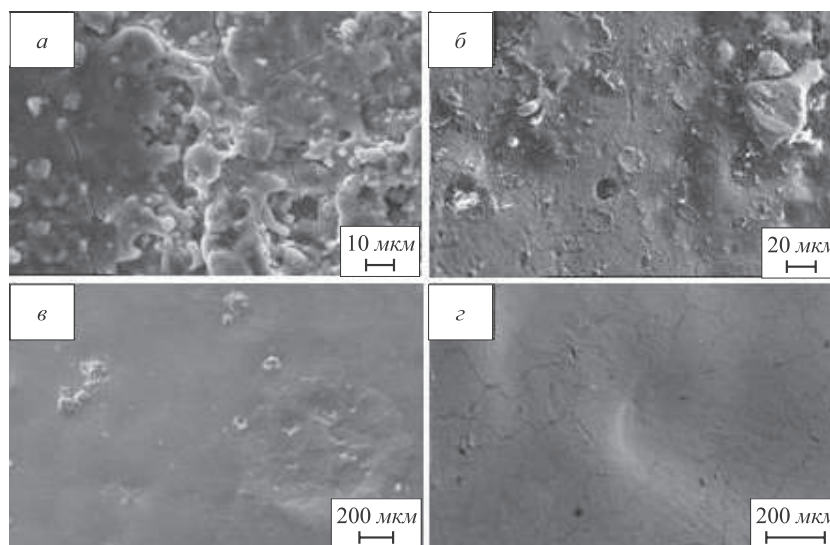


Рис. 1. Структура поверхности стали 45 после электровзрывного боромеднения (*а*), бороалитирования (*б*) и последующей электронно-пучковой обработки соответственно (*в, з*) (сканирующая электронная микроскопия)

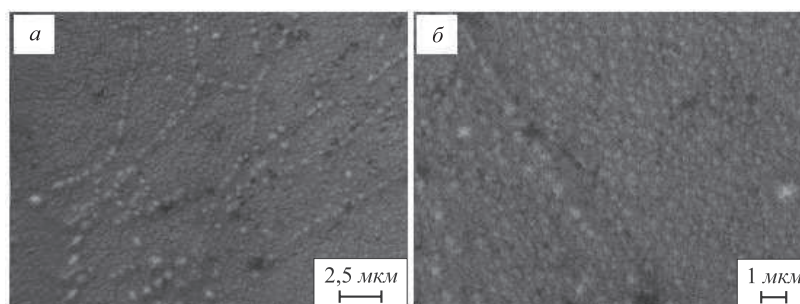


Рис. 2. Структура поверхности образца стали 45 после электровзрывного бороалитирования и последующей электронно-пучковой обработки (сканирующая электронная микроскопия)

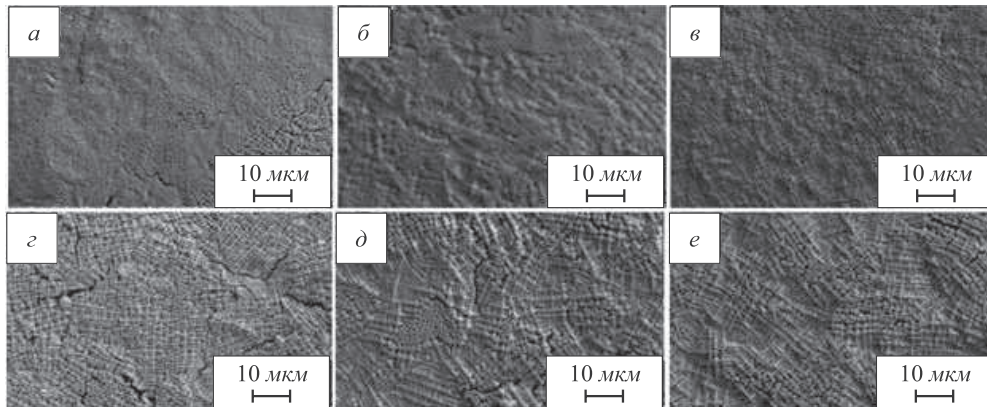


Рис. 3. Структура поверхности после электровзрывного боромеднения и электронно-пучковой обработки  $N = 10$  имп., при плотности мощности пучка электронов 2,0 (а), 2,5 (б) и 3,0 (в) ГВт/м<sup>2</sup>,  $\tau = 100$  мкс (а – в) и 200 мкс (г – е) (сканирующая электронная микроскопия)

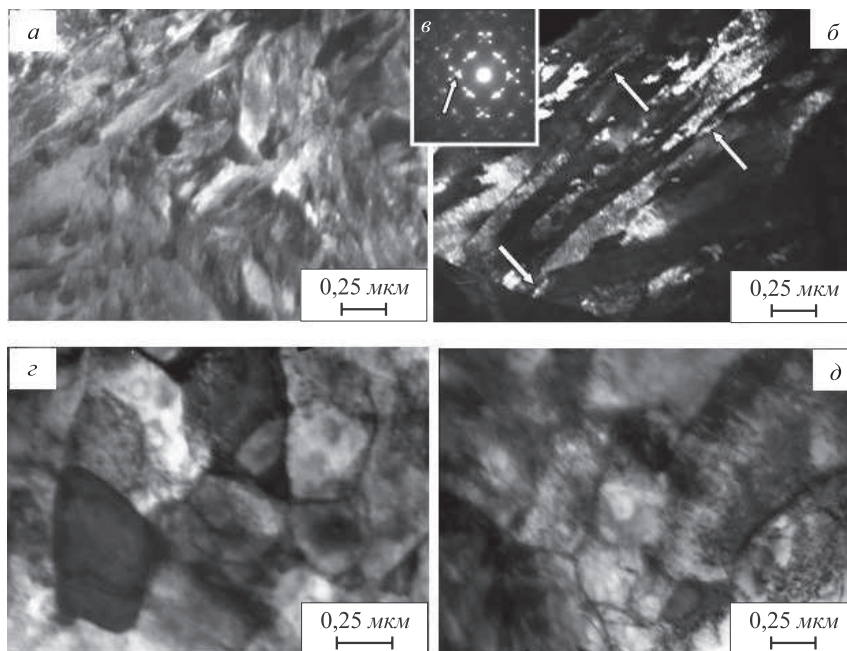


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя стали, расположенного на глубине 10 – 15 мкм: а, г и д – светлое поле; б – темное поле в рядом расположенных рефлексах  $[110]\alpha\text{-Fe} + [002]\gamma\text{-Fe}$ ; в – микроэлектроннограмма (стрелками на поз. б показаны прослойки остаточного аустенита; на поз. в – рефлекс, в котором получено темное поле)

и субзернами феррита (рис. 4, г, д). Присутствие зерен структурно-свободного феррита свидетельствует о том, что ЭПО в этом режиме обработки не приводит к полной гомогенизации стали. Сохраняются объемы стали как обогащенные, так и обедненные углеродом. Первые из них закаляются с образованием мартенсита, вторые – с образованием зерен феррита. Обнаруживаются также выделения частиц вторых фаз – алюминидов железа и бора, расположенные вдоль границ зерен и в объеме зерен феррита соответственно (рис. 5).

Рентгеноструктурный анализ показал, что в результате электровзрывного боромеднения на поверхности стали сформировалась смесь, состоящая из  $\alpha\text{-Fe}$  и  $\gamma\text{-Fe}$ , меди, упрочняющих субмикроструктурных частиц боридов  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{FeB}_2$ , метастабильной фазы

$\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  и карбида  $\text{V}_4\text{C}$ . С увеличением поглощаемой плотности мощности  $q_p$  наблюдается уменьшение содержания  $\alpha\text{-Fe}$  и увеличение содержания  $\gamma\text{-Fe}$  и Cu, что свидетельствует об увеличении степени легирования расплава медью. Влияние ЭПО сводится к растворению боридов в слое, уменьшению содержания аустенита, перераспределению меди и увеличению содержания  $\alpha\text{-Fe}$  (рис. 6, а). В частности, с ростом поглощаемой плотности мощности  $q_e$  содержания  $\alpha$ -фазы и метастабильной фазы  $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  увеличиваются, а при увеличении длительности импульсов исчезают пики  $\gamma\text{-Fe}$  и  $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  (рис. 6, б). Согласно металлографическим исследованиям это является следствием увеличения глубины зоны легирования и перераспределения легирующих элементов по ее объему.



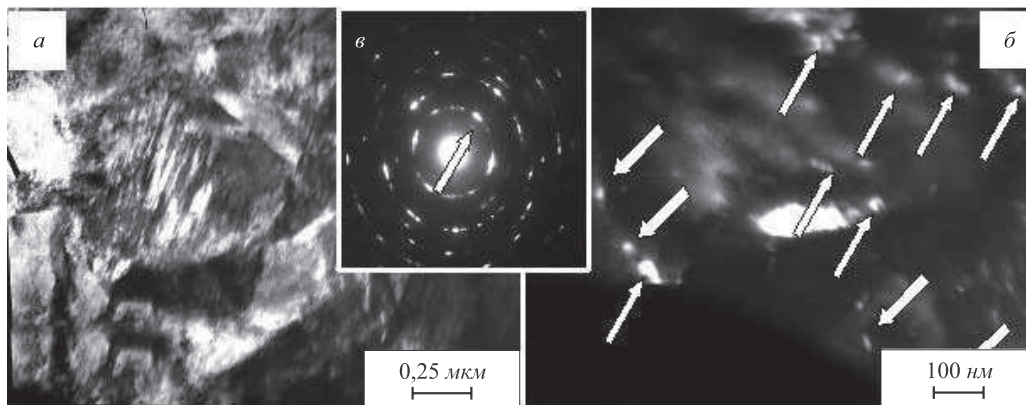


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя стали, расположенного на глубине 10 – 15 мкм: *a* – светлое поле; *б* – темное поле в рефлексе  $[320]AlB_{12}$ ; *в* – микроэлектронограмма (стрелками на поз. *б* показаны частицы второй фазы; на поз. *в* – рефлекс, в котором получено темное поле)

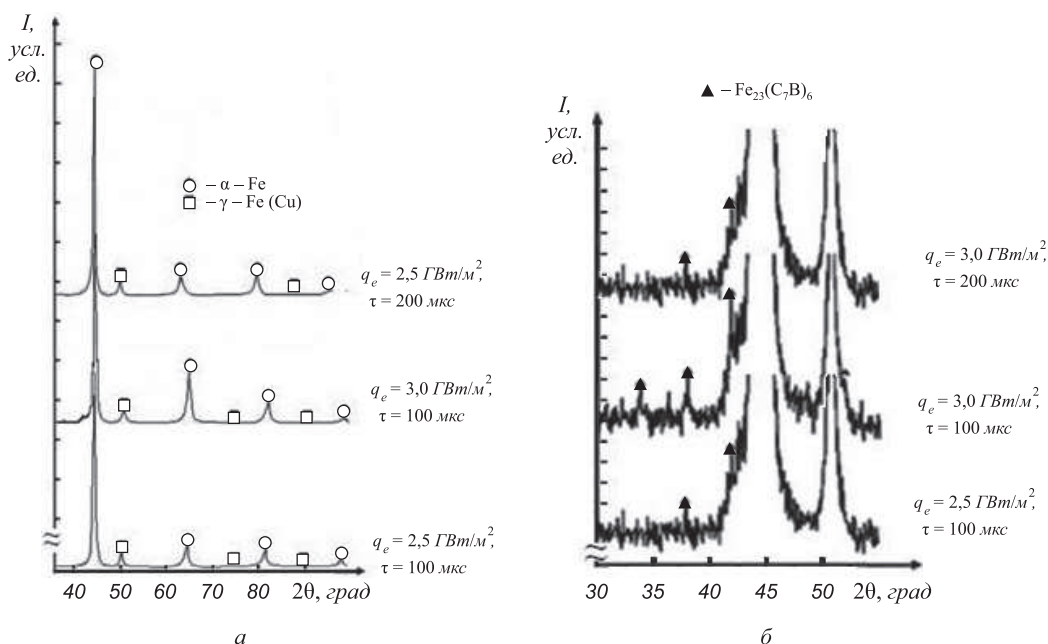


Рис. 6. Фрагменты дифрактограмм стали 45 после электровзрывного боромеднения и последующей электронно-пучковой обработки при  $N = 5$  имп.: *a* – влияние режимов электронно-пучковой обработки на содержание фаз  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe; *б* – влияние режимов электронно-пучковой обработки на содержание частиц фазы  $Fe_{23}(C, B)_6$

**Выводы.** Электронно-пучковая обработка стали 45 после электровзрывного легирования приводит к выглаживанию рельефа поверхности, выравниванию элементного состава зоны легирования, образованию поверхностного слоя с ячеистой и дендритной кристаллизацией. Упрочнение при комбинированной обработке, сочетающей электровзрывное бороалитирование и последующую электронно-пучковую обработку, достигается вследствие формирования структуры мартенсита с наноразмерными кристаллами, выделением наноразмерных частиц вторых фаз, формированием твердого раствора алюминия и бора в кристаллической решетке железа. После электровзрывного боромеднения и электронной обработки упрочнение достигается

вследствие образования многофазной измельченной структуры, включающей мартенсит, бориды, карбоборид железа и карбид бора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Тересов А.Д. и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 41 – 45.
3. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M. et al. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. P. 243 – 248.

© 2012 г. А.В. Ионина, Е.С. Вацук, С.В. Райков, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов  
Поступила 29 февраля 2012 г.