

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО БОРОАЛИТИРОВАНИЯ СТАЛИ 45

Вострцова А. В., Будовских Е. А., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия*  
[ani-vo@yandex.ru](mailto:ani-vo@yandex.ru)

Электровзрывное легирование (ЭВЛ) [1] осуществляется с целью модификации структурно-фазовых состояний 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 значениями температуры и давления, а в зоне оплавления, насыщаемой компонентами плазмы, развиваются интенсивные процессы конвективного перемешивания, приводящие к перераспределению легирующих элементов по всей глубине расплава. Послойные электронно-микроскопические исследования показали [1], что в зоне легирования образуются наноразмерные упрочняющие фазы (карбиды, бориды и др.).

Вместе с тем, ЭВЛ сопровождается формированием на поверхности высокоразвитого рельефа, обусловленного, прежде всего, радиальным течением расплава от центра зоны облучения к ее периферии и осаждением на поверхности частиц капельной фракции продуктов взрыва из тыла струи. В работе [2] показано, что электронно-пучковая обработка (ЭПО) с оплавлением поверхности электровзрывного алитирования стали 45 позволяет выгладить ее рельеф, сохраняя при этом высокий уровень микротвердости. В связи с этим представляет интерес провести анализ влияния импульсной ЭПО поверхности после ЭВЛ и в других случаях. Цель настоящей работы – электронно-микроскопический анализ состояния зоны электровзрывного бороалитирования стали 45 после дополнительной ЭПО поверхности.

В качестве материала подложки использовали образцы стали 45 в виде шайб толщиной 3 мм и диаметром 20 мм. Исходная структура стали была представлена зернами перлита пластинчатой морфологии и зернами структурно-свободного феррита.

ЭВЛ осуществляли на электровзрывной установке ЭВУ 60/10. Остаточное давление в технологической камере составляло 100 Па. Для формирования струи использовали алюминиевую фольгу толщиной 20 мкм и массой 40 мг. На фольге размещали навеску порошка аморфного бора массой 60 мг. Выбранный режим обработки обеспечивал на облучаемой поверхности поглощаемую плотность мощности  $q = 4,5 \text{ ГВт/м}^2$  и давление в ударно-сжатом слое вблизи поверхности  $p = 11,2 \text{ МПа}$ .

ЭПО поверхности легирования осуществляли на лабораторной установке СОЛО Института сильноточной электроники СО РАН [3]. Низкоэнергетические (15...20 кэВ) сильноточные (до 100 А) электронные пучки (НСЭП) позволяют за короткий промежуток времени (10...100 мкс) сконцентрировать высокую плотность энергии ( $\sim 0...100 \text{ Дж/см}^2$ ) в тонком ( $\sim 0,1...10 \text{ мкм}$ ) поверхностном слое обрабатываемого материала. Импульсные плазменные струи, используемые при ЭВЛ, и НСЭП имеют сопоставимые значения времени импульсного воздействия на поверхность ( $\sim 10...100 \text{ мкс}$ ), диаметра зоны воздействия ( $\sim 10 \text{ мм}$ ) и поглощаемой плотности мощности ( $\sim 1 \text{ ГВт/м}^2$ ), что дает возможность их эффективного совместного использования. Установка СОЛО позволяет обеспечить плотность энергии пучка электронов  $E_S = 15...30 \text{ Дж/см}^2$ , длительность импульса воздействия пучка электронов  $\tau = 50...200 \text{ мкс}$ , количество импульсов воздействия  $N = 1...200$ , частоту следования импульсов  $f =$

$0,3 \text{ с}^{-1}$ . В настоящей работе на основании предварительных исследований [2] были выбраны следующие параметры ЭПО: в первом режиме  $E_S = 20 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 50 \text{ мкс}$ ,  $N = 10$ , во втором –  $E_S = 25 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 200 \text{ мкс}$ ,  $N = 10$ .

Исследования структуры и фазового состава поверхностных слоев стали после обработки проводили методами сканирующей и дифракционной электронной микроскопии.

Сканирующая электронная микроскопия показала, что электровзрывное бороалитирование сопровождается формированием на поверхности высокоразвитого рельефа, характеризующегося наличием конденсированных частиц, располагающихся в тылу струи и оседающих на поверхности уже после ее кристаллизации [1]. Видны деформированные капли, образовавшиеся при разрушении фольги, и шарообразные частицы с 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. Последующая ЭПО приводит к выравниванию поверхности образцов. Вместе с тем сохраняются отдельно расположенные островки с высокоразвитым рельефом, сформированным при ЭВЛ, частицами бора. Их количество и размеры меньше после обработки по режиму 2. Релаксация термических напряжений, возникающих в поверхностном слое стали в результате высоких скоростей нагрева и охлаждения при ЭПО, приводит к сохранению сетки микротрещин.

Просвечивающая электронная микроскопия поверхностного слоя образца, обработанного по режиму 1, выявила многофазную структуру, представленную кристаллами мартенсита пакетной и пластинчатой морфологии, прослойками остаточного аустенита, зернами и субзернами феррита и выделениями второй фазы алюминида бора. Исследование образца после обработки по второму режиму также выявило протяженные прослойки второй фазы алюминида железа, расположенные вдоль границ зерен. Наряду с этим, выделения второй фазы обнаружены и в объеме зерен феррита. Установлено, что данные выделения сформированы алюминидом бора.

Таким образом, упрочнение при комбинированной обработке, сочетающей электровзрывное бороалитирование и последующее импульсно-пучковое переплавление поверхности стали 45, достигается вследствие формирования структуры мартенсита с наноразмерными кристаллами, выделением наноразмерных частиц вторых фаз, формированием твердого раствора алюминия и бора на основе железа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ (проект №№ 08-02-00024-а) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (гос. контракт № П332).*

## Список литературы

1. Багаутдинов, А.Я. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов [Текст] / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов // Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. Иванов, Ю.Ф. Модификация низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком поверхности стали, легированной электровзрывным методом [Текст] / Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Колубаева, А.Д. Тересов, С.Ю. Филимонов, А.В. Вострецова, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 2. – С. 41–45.
3. Devyatkov, V.N. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval // Laser and Particle Beams. – 2003. – V. 21. – P. 243–248.