

МОДИФИКАЦИЯ СТАЛИ 45 МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО БОРОМЕДНЕНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Е.С. Ващук, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, В.А. Батаев, Ю.Ф. Иванов
 Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, Новокузнецк,
 ул. Кирова, 42, e-mail: vaschuk@bk.ru
 Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, Новосибирск,
 просп. Карла Маркса, 20, e-mail: vabataev@yandex.ru
 Институт сильноточной электроники СО РАН, 634021, Россия, Томск,
 просп. Академический, 2/3, e-mail: yufi55@mail.ru

Проведено электровзрывное боромеднение и последующая электронно-пучковая обработка поверхности стали 45. Методами сканирующей электронной микроскопии изучены особенности поверхности стали 45. Выявлена зависимость параметров дендритной структуры от интенсивности воздействия пучка электронов. Показано, что электронно-пучковая обработка приводит к выравниванию рельефа поверхности стали 45 после электровзрывного боромеднения.

Введение

В последние годы получили развитие методы упрочнения поверхности металлов и сплавов с использованием концентрированных потоков энергии, в том числе электронно-лучевые и плазменные. В отличие от традиционных способов химико-термической обработки они характеризуются кратковременным и локальным высокоэнергетическим воздействием на поверхность, которое позволяет повышать ее функциональные свойства, такие как износ-, жаро- и коррозионную стойкость, в несколько раз.

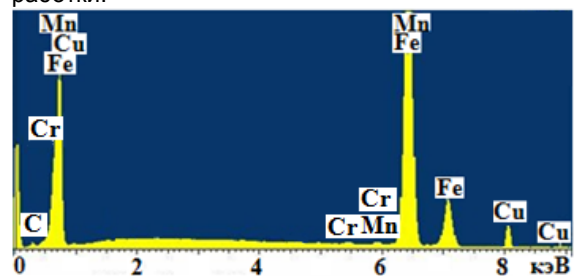
Основным их достоинством является возможность осуществления поверхностного легирования, при котором резко сокращается расход легирующих элементов, а эффект повышения свойств поверхности оказывается значительным. Упрочнение поверхности с использованием концентрированных потоков энергии может проводиться при сочетании нескольких методов обработки, например, электровзрывного легирования (ЭВЛ) и последующей электронно-пучковой обработки (ЭПО). Целью данной работы явилось изучение рельефа и строения поверхностных слоев стали 45 после электровзрывного боромеднения и последующей электронно-пучковой обработки.

Основная часть

Обработке подвергали образцы цилиндрической формы диаметром 20 мм и высотой 5 мм из отожженной стали 45. ЭВЛ проводили в режиме, который обеспечивает поглощаемую плотность мощности, равную 8,6 ГВт/м². Взрываема медная фольга имела толщину 20 мкм и массу 35 мг. В области взрыва размещали порошок аморфного бора массой 20 мг. При этом отношение атомных концентраций бора и меди в струе составляло 3,5. Последующую ЭПО поверхности легирования осуществляли на установке «Соло» Института сильноточной электроники СО РАН при следующих основных параметрах облучения: интенсивность воздействия пучка электронов $q_e = 2,0, 2,5$ и $3,0$ ГВт/м², длительность импульсов $\tau = 100$ мкс; частота их следования $f = 0,3$ Гц; число импульсов $N = 10$. Обработку осуществляли в среде аргона рабочей камеры при давлении 0,02 Па.

Рельеф поверхности образцов после ЭВЛ изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50.

Рентгеноспектральный микроанализ поверхности обработки (рис. 2, в) показал (рис. 1), что она содержит следующие элементы: Fe, Cu, Mn, Cr и Si. В таблице представлен отчет об относительном содержании в анализируемом объеме материала атомов элементов стали 45 после обработки.



Элемент	Вес. %	Ат. %
C K	0.40	1.7
Si K	0.45	0.82
Cr K	0.29	0.28
Mn K	0.53	0.45
Fe K	92.07	91.71
Cu K	6.26	5.04

Рис. 1. Рентгеновский спектр поверхности стали 45, подвергнутой электровзрывному боромеднению и последующей электронно-пучковой обработке при $q_e = 2$ ГВт/м², $\tau = 100$ мкс и $N = 10$ имп.

Сканирующая электронная микроскопия показала (рис. 2, а), что ЭПО сопровождается повсеместным плавлением поверхности и объединением покрытия с нижележащей зоной легирования (рис. 2, б). Одновременно с этим релаксация термических напряжений, возникающих в поверхностном слое в результате импульсного характера обработки, приводит к формированию на по-

верхности системы микротрещин, которые разбивают ее на фрагменты с размерами от 30 до 60 мкм (рис. 2, б).

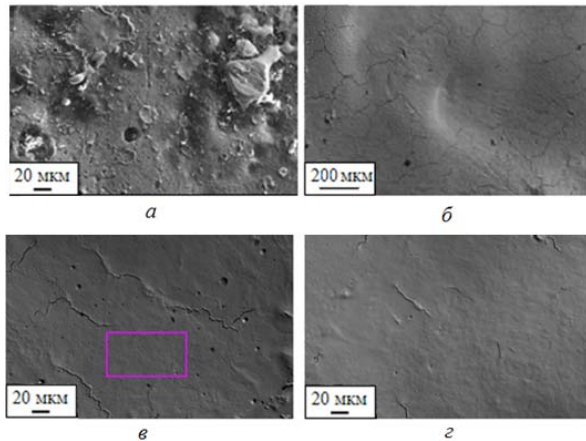


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия поверхности образца стали 45 после электровзрывного боромеднения (а) и последующей ЭПО при q_e , ГВт/м²: б – 3, в – 2 и г – 3. Прямоугольная область – область рентгеноспектрального микроанализа.

Одновременно с этим релаксация термических напряжений, возникающих в поверхностном слое в результате импульсного характера обработки, приводит к формированию на поверхности системы микротрещин, которые разбивают ее на фрагменты с размерами от 30 до 60 мкм (рис. 2, б). В быстро закристаллизовавшихся сплавах затруднительно выявить границы зерен. Нередко трещины принимают за ячейки кристаллизации, а ячейки кристаллизации за зерна. Можно предположить, что трещины развиваются либо по границам ячеек кристаллизации, либо вдоль границ зерен. ЭПО поверхности при выбранных q_e наблюдается залечивание микротрещин (рис. 2, в, д). Можно предположить, что это обусловлено тем, что при этом происходит более развитая гомогенизация расплава вследствие молекулярной и конвективной диффузии, поэтому наблюдаемые на поверхности после последнего импульса ЭПО трещины образуются в новых местах, а старые залечиваются.

Исследования при большом увеличении показали (рис. 3), что высокоскоростная кристаллизация расплава после ЭПО приводит к формированию дендритной структуры зоны легирования. Дендриты имеют оси первого и второго порядка. Обращает на себя внимание, что в близко распо-

ложенных друг от друга областях, дендриты имеют различные направления роста и разные междендритные параметры. Увеличение q_e сопровождается ростом средних значений междендритных параметров. Они составляют 0,50, 0,66 и 1,00 мкм при значениях q_e , равных 2,0, 2,5 и 3,0 ГВт/м² соответственно. Скорости охлаждения получают следующие значения: $1,6 \cdot 10^5$, $0,9 \cdot 10^5$ и $0,4 \cdot 10^5$ К/с соответственно. Эти значения согласуются с известными данными, согласно которым строение дендритной структуры определяется скоростью охлаждения расплава и оси второго порядка не образуются уже при скорости охлаждения, превышающей $\sim 10^6$ К/с. Сопоставляя их, можно отметить, что при увеличении q_e наблюдается снижение U , однако, с другой стороны, при увеличении q_e увеличивается градиент температуры по глубине, и следовательно U должна возрастать. Это противоречие можно объяснить тем, что на структуру дендритов влияет не только скорость охлаждения, но и химический состав сплава. По видимому, в данном случае различная ориентация дендритов и заметно отличающиеся в соседних областях значения междендритных параметров обусловлены химической неоднородностью зоны легирования, которая возникает в результате растворения при ЭПО покрытия, формирующегося на поверхности сразу после ЭВЛ (рис. 3, а).

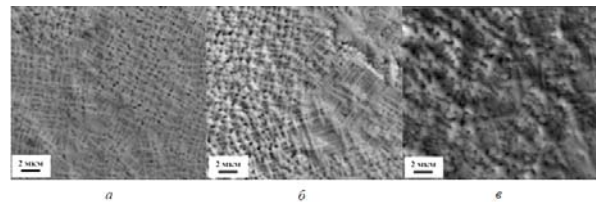


Рис. 3. Дендритная структура поверхностных слоёв стали 45, выявляемая сканирующей электронной микроскопии после электровзрывного боромеднения и последующей электронно-пучковой обработки при q_e , ГВт/м²: а – 2,0; б – 2,5; в – 3,0

Заключение

Показано влияние поглощаемой плотности мощности на особенности структуры поверхности после электровзрывного боромеднения и электронно-пучковой обработки.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.0693).

MODIFICATION OF STEEL 45 METHOD ELECTROEXPLOSIVE BOROCOPPERING AND SUBSEQUENT ELECTRON BEAM TREATMENT

E.S. Vaschuk, E.A. Budovskikh, V.E. Gromov, V.A. Bataev, Y.F. Ivanov

Siberian State University of Industry, Kirov str., 42, Novokusnetsk, RU-654007, Russia,

Phone: +7-3843-462277, Fax: +7-3843-465792, E-mail: vaschuk@bk.ru

High-Current Electronics Institute SB RAS, Academic procp., 2/3, Tomsk, RU-634021, Russia,

Novosibirsk State Technical University, Karl Marx Av., 20, Novosibirsk, RU-630092, Russia

It is spent electroexplosive borocoppering and the subsequent electron-beam treatment surfaces of a steel 45. Methods of scanning electronic microscopy studied features of a surface 45. Dependence is revealed parameters of dendrite's structures from intensity of influence of a bunch electron. It is shown that processing leads to alignment of a relief of a surface of a steel 45 after electroexplosive borocoppering.