

На заключительной стадии обжига (1100–1300 °С) в составе КШ между появившимися минеральными фазами завершилось перераспределение компонентов шихты. Вне реакции упрочнения в составе крупной фракции остаются обломки зерен гематита и перовскита.

Оптическим и рентгеноспектральным методами исследования на месте феррито-силикатной массы диагностированы новообразования трех минеральных фаз: ферритной и двух силикатных, различающихся по отражательной способности и морфологической форме кристаллов (см. рисунок, б).

Анализ состава минеральных фаз свидетельствует о том, что:

- трехвалентное железо является основным «строителем» ферритной фазы;
- оксид кальция присутствует во всех оптически наблюдаемых фазах КШ;
- оксиды кремния и алюминия входят в состав силикатных и ферритных фаз;

– щелочные компоненты шихты целиком переходят в железокальциевые силикаты.

По предварительным данным кремний-щелочные силикаты представляют собой сложные твердые растворы минералов группы мелилита и скаполита.

Фазовые превращения КШ в интервале температур, соответствующих температурам в зонах подгрева и обжига на промышленных машинах позволяют утверждать, что добавка в железорудную шихту окатышей КШ способствует активным процессам ферритообразования на стадии твердофазного спекания шихты и расплавообразования на этапе жидкофазного упрочнения окатышей, что является основной причиной роста прочности готовой продукции.

© 2013 г. Т.Я. Мальшева, А.А. Сухарева,
Д.Б. Макеев

Поступила 4 февраля 2013 г.

УДК 669.15:539.12.04:620.186

Л.П. Бащенко¹, Ю.Ф. Иванов², Е.А. Будовских¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
² Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНА VT1-0 ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ КАРБОБОРИРОВАНИИ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Методами сканирующей электронной микроскопии и измерения микротвердости изучены особенности влияния импульсно-периодической электронно-пучковой обработки на структуру зоны электровзрывного карбоборирования технически чистого титана. Установлено, что обработка приводит к сглаживанию рельефа поверхности и высокого градиента микротвердости в тонком поверхностном слое. Уровень микротвердости в глубине зоны упрочнения уменьшается, но глубина этой зоны увеличивается.

Ключевые слова: технически чистый титан, электровзрывное карбоборирование, электронно-пучковая обработка, структура, микротвердость.

MODIFICATION OF THE TITANIUM VT1-0 SURFACE LAYERS STRUCTURE AFTER ELECTROEXPLOSIVE CARBOBORONIZING AND ELECTRON-BEAM TREATMENT

Abstract. By scanning electron microscopy and microhardness measurement the characteristics affecting the structure zone electroexplosive carboborizing commercially pure titanium VT1-0 repetitively pulsed electron-beam treatment are investigated. The treatment leads to a smoothing of the surface relief and high gradient of microhardness in the thin surface layer. The level of microhardness on depth of hardening zone decreases, but the depth of hardening zone increases.

Keywords: technically pure titanium, electroexplosive carboborizing, electron-beam treatment, structure, microhardness.

Перспективным направлением модификации структуры, и как следствие, функциональных свойств поверхности деталей и инструмента является использование концентрированных потоков энергии [1–4]. Методами, в которых используются концентрированные потоки энергии, в частности являются электровзрывное легирование (ЭВЛ) [5, 6] и обработка поверхности низкоэнергетическими сильноточными электронными пуч-

ками. В ряде работ [7–10] эти виды обработки были использованы совместно. При воздействии импульсных многофазных плазменных струй продуктов электрического взрыва проводников на поверхность обрабатываемого материала происходит быстрый нагрев ее выше температуры плавления, легирование расплава и последующая самозакалка. Использование порошковых навесок как легирующих веществ, которые размещаются

в области взрыва и переносятся на облучаемую поверхность при ЭВЛ, позволяет формировать поверхностные слои с различным фазовым составом и широким спектром необходимых свойств. Последующая электронно-пучковая обработка (ЭПО) приводит к выравниванию рельефа поверхности легирования, более однородному распределению легирующих элементов по глубине и площади легирования, дополнительной стабилизации структуры и фазового состава.

Целью настоящей работы являлся анализ особенностей формирования структуры зоны упрочнения технически чистого титана ВТ1-0 путем электровзрывного карбоборирования и последующей электронно-пучковой обработки.

В качестве материала основы использовали технически чистый титан ВТ1-0. Образцы имели форму шайб толщиной 5 и диам. 20 мм.

Электровзрывное карбоборирование осуществляли на лабораторной электровзрывной установке ЭВУ 60/10 [6]. Для формирования плазменной струи использовали углеродную ленту марки ЛУ-П/0,1-50 производства ОАО «Аргон» (г. Балаково), на которой размещали навеску порошка аморфного бора марки Б-99В массой 50 мг. Режим обработки обеспечивал поглощаемую плотность мощности $5,5 \text{ ГВт/м}^2$. Электронно-пучковую обработку поверхности легирования образцов осуществляли на лабораторной установке «Соло» Института сильноточной электроники СО РАН при следующих параметрах воздействия: плотность энергии пучка 50 Дж/см^2 , длительность импульса воздействия 100 мкс, число импульсов и частота их следования 10 имп. и 0,3 Гц соответственно.

Анализ структуры поверхности зоны комбинированного упрочнения и ее поперечного сечения проводили методом сканирующей электронной микроскопии на приборе LEO EVO 50. Микротвердость определяли с использованием микротвердомера HVS-1000А с точностью $\pm 10 \%$.

Исследования структуры поверхности зоны комбинированного упрочнения на макро- и микроуровнях показали, что структура неоднородна. На макроуровне выявлена высокая шероховатость – наблюдается структура «холмистого типа» (рис. 1, а), присутствуют кратеры и трещины. Выявлены области, содержащие вкрапления не полностью растворившихся в расплаве частиц углеродных волокон и бора.

Исследования на микроуровне показали, что большую часть поверхности обработки занимает структура дендритной кристаллизации. Области с такой структурой характеризуются наличием микротрещин (рис. 1, б).

При исследовании поперечных шлифов установлено, что толщина модифицированных слоев достигает 170 мкм (рис. 2, а). В этих слоях наблюдаются отдельные глобулярные включения не до конца растворившегося порошка бора. Вблизи поверхности размеры кри-

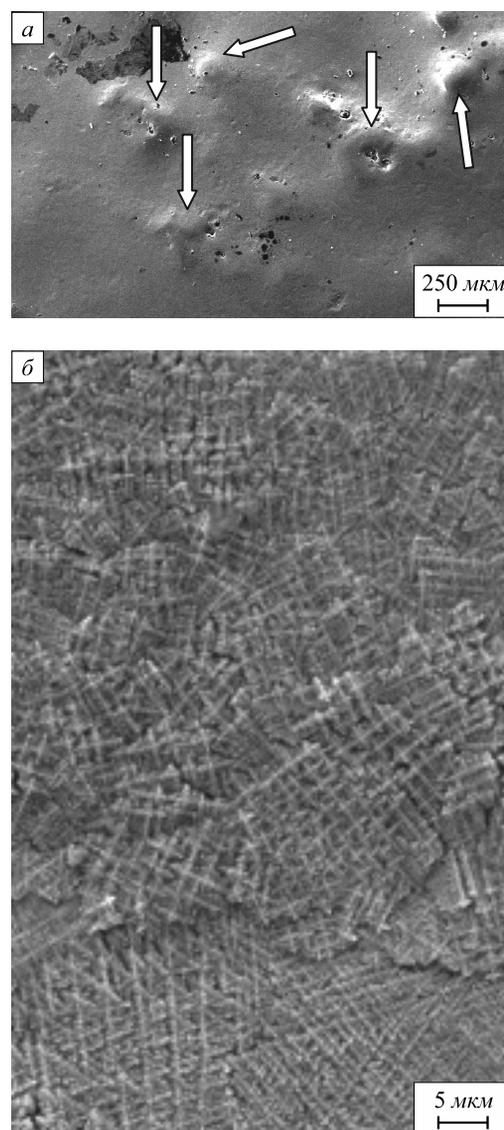


Рис. 1. Изображение (сканирующая электронная микроскопия) поверхности образца ВТ1-0, подвергнутого комбинированной обработке, на макроуровне (а) и на микроуровне (б)

таллитов дендритной структуры составляют 0,3 мкм; в глубине структура более грубая, размеры кристаллитов увеличиваются до 0,75 мкм (рис. 2, б).

Измерения микротвердости показали, что на глубине ее уровень составляет 1200–1400 НВ, что в шесть–семь раз выше, чем микротвердость основы. В то же время непосредственно после ЭВЛ наблюдается образование тонкого (толщиной до 3–5 мкм) слоя на поверхности, микротвердость которого составляет 2900 НВ, а в глубине – 2100 НВ [11]. Ранее аналогичное влияние ЭПО было выявлено при обработке поверхности стали 45 после электровзрывного боромеднения [12]. Объяснить такое влияние можно особенностями структуры и строения импульсной многофазной плазменной струи, служащей инструментом воздействия на поверхность при ЭВЛ. Продукты взрыва представляют собой многофазную систему, включающую как плазменный компонент, так и конденсированные час-

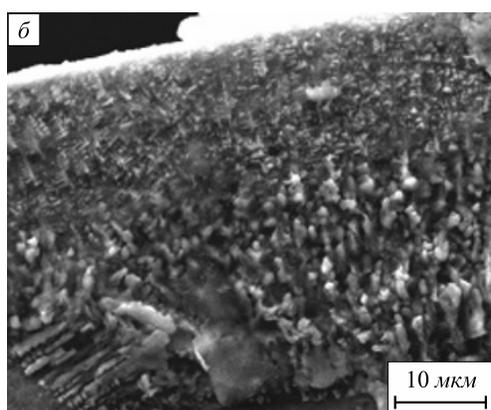
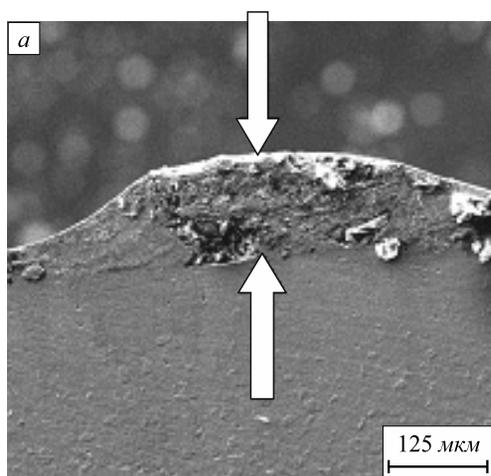


Рис. 2. Структура поперечного сечения образца VT1-0, подвергнутого комбинированной обработке, на макроуровне (а) и на микроуровне (б)

тицы различной дисперсности [6]. При распространении струи в пространстве конденсированные частицы отстают от плазменного компонента [6], поэтому при ее нормальном натекании на облучаемую поверхность сначала происходит плазменный нагрев и оплавление материала подложки, а затем – осаждение на облучаемой поверхности частиц из тыла струи. Это приводит к тому, что на поверхности формируется несплошное покрытие с развитым рельефом, а под ним – тонкий нанокompозитный слой с высокой степенью легирования [6] и высоким уровнем микротвердости. Очевидно, импульсно-периодическое переплавление поверхности легирования при ЭПО приводит к объединению слоя

покрытия и нанокompозитного поверхностного слоя с более глубокими слоями, а также увеличение глубины зоны упрочнения. Однако уровень микротвердости в этой зоне понижается.

Выводы. Установлено, что электронно-пучковая обработка поверхности титана после электровзрывного карбоборирования приводит к сглаживанию рельефа поверхности обработки и высокого градиента микротвердости в тонком поверхностном слое. Уровень микротвердости в глубине зоны упрочнения уменьшается от 2100 до 1300 HV, но глубина зоны упрочнения увеличивается от 80 до 170 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Учеб. пособие / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин и др. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрин А.И. Технические процессы лазерной обработки. – М.: изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 251 с.
4. Тюрин Ю.М., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. – Киев: Наукова Думка, 2008. – 266 с.
5. Будовских Е.А., Карпий С.В., Громов В.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 9. С. 1324 – 1327.
6. 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.
7. Карпий С.В., Морозов М.М., Будовских Е.А. и др. // Успехи физики металлов. 2010. Т. 11. С. 1 – 21.
8. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Е.А. Будовских и др. // Новокузнецк: «Интер-Кузбасс», 2012. – 435 с.
9. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Соскова Н.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 11. С. 1393 – 1399.
10. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Изв. вуз. Физика. 2008. № 5. С. 60 – 70.
11. Башенко Л.П., Райков С.В., Иванов Ю.Ф. и др. // Металлургия: технология, управление, инновации: Тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2012. С. 74 – 76.
12. Ващук Е.С., Будовских Е.А., Райков С.В., Громов В.Е. // Фундаментальные проблемы современной материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 68 – 71.

© 2013 г. Л.П. Башенко, Ю.Ф. Иванов,
Е.А. Будовских

Поступила 8 февраля 2013 г.