

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА BT1-0 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО КАРБОБОРИРОВАНИЯ*

*Ю. Ф. ИВАНОВ, доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
(ИСЭ СО РАН, г. Томск)*

*В. Е. ГРОМОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор,
Н.А. СОСКОВА, аспирантка,*

С.В. РАЙКОВ, докторант,

Е. А. БУДОВСКИХ, доктор техн. наук, доцент,

А.В. ИОНИНА, канд. техн. наук

(СибГИУ, г. Новокузнецк)

Статья поступила 12 февраля 2012 года

Будовских Е.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: budovskih_ea@physics.sibsiu.ru.

Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии показано, что электровзрывное карбоборирование поверхности технически чистого титана BT1-0 приводит к формированию слоистой многофазной структуры, упрочненной частицами борида и карбида титана.

Ключевые слова: технически чистый титан, электровзрывное карбоборирование, углеграфитовые волокна, упрочнение.

Введение

Титан и его сплавы обладают низкой износостойкостью, высокой склонностью к налипанию, большим коэффициентом трения в паре практически со всеми материалами. В то же время карбид титана обладает высокой твердостью и износостойкостью при низких и высоких температурах, низким коэффициентом трения, хорошей химической стабильностью во многих агрессивных средах и жаростойкостью. В связи с этим в настоящее время разрабатываются новые методы поверхностного науглероживания титана с применением концентрированных потоков энергии, основная идея которых состоит в импульсном оплавлении и насыщении расплава углеродом с последующей кристаллизацией и образованием упрочняющей фазы карбида титана. Ранее была показана возможность науглероживания титана с использованием электрического взрыва угле-

графитовых волокон с образованием в зоне легирования частиц карбид титана [1]. Большие перспективы связываются с разработкой методов карбоборирования металлов и сплавов [2]. Цель настоящей работы – анализ особенностей структуры образцов титана, подвергнутых электровзрывному карбоборированию.

Материал и методика исследования

В качестве материала основы был использован технически чистый титан BT1-0. Образцы имели форму шайб толщиной 5 и диаметром 20 мм. ЭВЛ осуществляли на установке ЭВУ 60/10 [1]. Инструментом воздействия на поверхность служила импульсная плазменная струя, сформированная из продуктов электрического взрыва углеродной ленты марки ЛУ-П/0,1-50 массой 140 мг. Волокна углеродной ленты состоят из так называемых микрофибрилл, об-

* 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.

ладающих большой площадью внутренней поверхности. Частицы волокон, образующиеся при их электрическом взрыве, хорошо смачиваются расплавом титана и при его конвективном перемешивании способны проникать вглубь. В области взрыва размещали порошковую навеску порошка аморфного бора марки Б-99В массой m_0 , равной 50, 100 и 150 мг.

Исследование структуры обработанных образцов выполняли путем анализа поперечных шлифов на сканирующем электронном микроскопе «LEO EVO 50». Анализ фазового состава модифицированных слоев осуществляли методами просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг на приборе ЭМ-125.

При выборе режима обработки было установлено, что при значении поглощаемой плотности мощности ниже $2,5 \text{ ГВт/м}^2$ конденсированные частицы продуктов электрического взрыва волокон углеродной ленты в расплав титана, образующийся на поверхности, проникают с малой интенсивностью, и значительного науглероживания поверхности не происходит. Вследствие этого отдельные частицы графита неравномерно распределены по глубине зоны легирования. При значении поглощаемой плотности мощности выше $6,5 \text{ ГВт/м}^2$ происходит выплеск части расплава за пределы зоны оплавления. При этом формируется высокоразвитый рельеф, обусловленный течением расплава под действием неоднородного давления многофазной плазменной струи продуктов взрыва на облучаемую поверхность. Поэтому детальные исследования структуры зоны электровзрывного карбоборирования проводили после обработки образцов при значениях поглощаемой плотности мощности, равных $5,0$; $5,5$ и $6,5 \text{ ГВт/м}^2$.

Исследования показали, что с увеличением поглощаемой плотности мощности увеличивается глубина зоны легирования и шероховатость поверхности, а на границе с основой появляются и усиливаются искажения, обусловленные конвективным течением расплава от центра зоны легирования к ее периферии (рис. 1).

Концентрация частиц графита, которые равномерно распределяются по глубине зоны легирования, также возрастает. Глубина зоны упрочнения достигает 110 мкм. Внесение в область взрыва навески порошка бора приводит к частичному подавлению как выплеска на поверх-

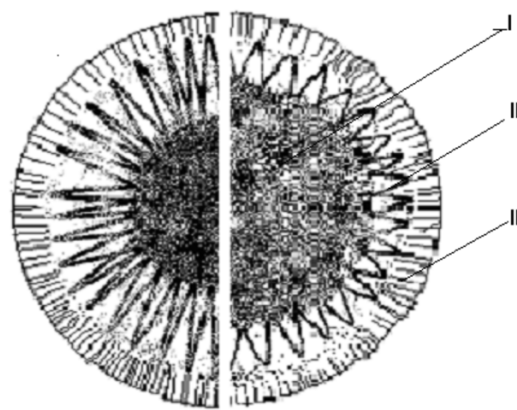


Рис. 1. Схема радиального строения поверхности зоны электровзрывного легирования: слева — для случая науглероживания без порошковой навески, справа — с навеской порошка бора;

I — центральная область; II — промежуточная;
III — периферийная

ности, так и гидродинамических возмущений на границе с основой (рис. 2).

При этом происходит уменьшение глубины зоны легирования. Увеличение поглощаемой плотности мощности приводит также к увеличению степени насыщения расплава частицами бора. Сравнительный анализ результатов световой и сканирующей микроскопии позволил сделать выбор в пользу режима, при котором значение поглощаемой плотности мощности составляет $6,5 \text{ ГВт/м}^2$, а масса порошка бора — 50 мг. Он обеспечивает формирование зоны легирования с ровной границей с основой, максимальной степенью карбоборирования расплава и легирования без выплеска.

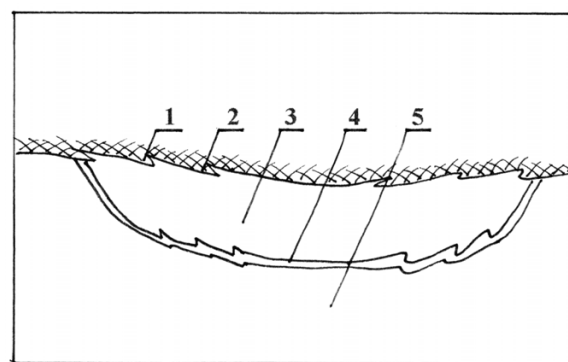


Рис. 2. Схематичное изображение поперечного сечения зоны электровзрывного науглероживания:

1 — покрытие, сформированное частицами графита из тыла струи; 2 — поверхность зоны легирования со следами радиального течения расплава; 3 — зона легирования; 4 — граничная полоска со следами гидродинамических возмущений основы; 5 — зона термического влияния

Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные исследования показали, что в поверхностном слое образцов формируется градиентная структура, которую можно разделить на покрытие и зону легирования. Формирование покрытия обусловлено следующими особенностями метода электровзрывного легирования. В [1] показано, что при обработке металлов и сплавов методом электрического взрыва проводящего материала структура поверхностного слоя формируется в результате воздействия на образец потока плазмы, частиц взрывааемых углеграфитовых волокон и частиц порошка бора, летящих в тылу плазменной струи. Налетающий поток плазмы приводит к плавлению поверхности и жидкофазному легированию расплава. Частицы взрывааемого проводника и порошка бора достигают обрабатываемой поверхности на стадии ее остывания, частично прилипают в объем поверхностного слоя, частично осаждаются на поверхности образца, формируя покрытие. Вследствие этого

покрытие обладает развитым рельефом, высоким уровнем шероховатости, неоднородно с точки зрения морфологии элементов структуры, содержит микротрещины, микрократеры и микропоры.

Анализ структуры покрытия, выполненный методом электронной дифракционной микроскопии тонких фольг с применением темнопольной методики и последующего индицирования микроэлектроннограмм, подтвердил факт существенной неоднородности его строения и выявил присутствие в поверхностном слое целого ряда фаз. Представленные на рис. 3 фотографии демонстрируют присутствие следующих фаз: во-первых, графита в квазиаморфном состоянии; во-вторых, наноразмерных (5...50 нм) выделений борида титана состава TiB; в-третьих, β -титана (рис. 3, *а*, *б*, *г*), кристаллов α -титана пластинчатой морфологии, поперечные размеры которых изменяются в пределах от 40 до 350 нм (рис. 3, *г*), и частиц карбида титана, располагающихся в структуре α -титана в виде островков, указанных стрелками на рис. 3, *г*. Размеры частиц карбида титана изменяются в пределах от 15 до 25 нм (рис. 3, *д*).

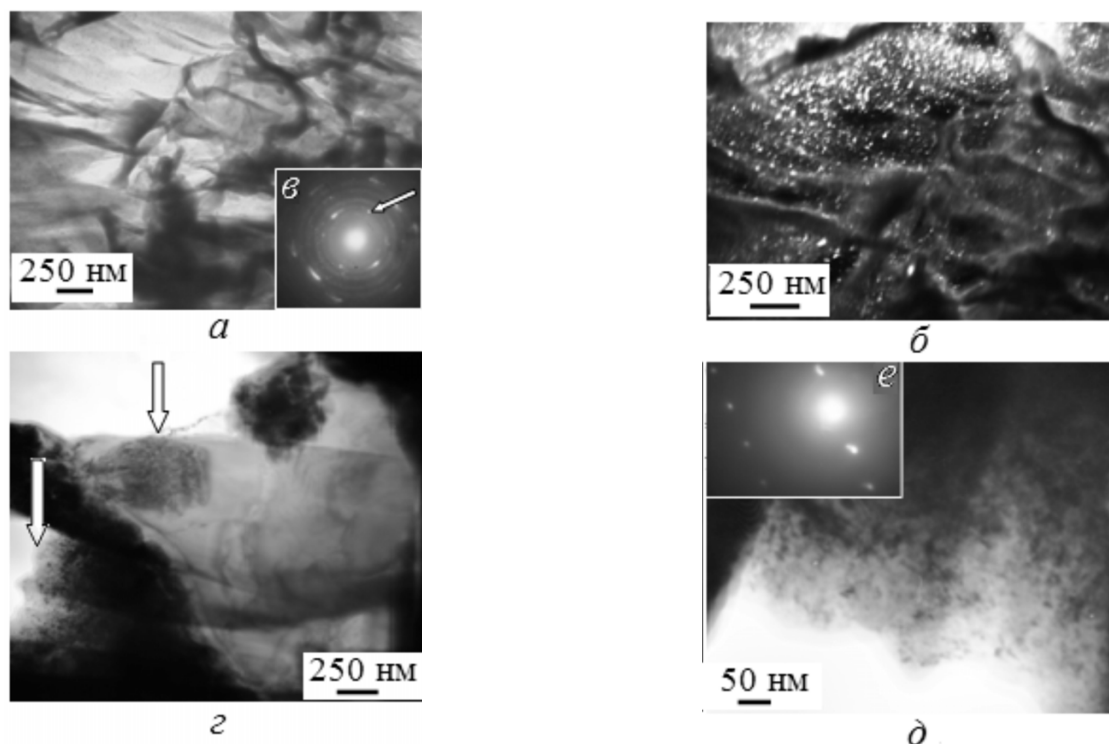


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры покрытия, формирующегося на поверхности технически чистого титана ВТ1-0, подвергнутого электровзрывному карбоборированию:

а, *д* – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе (201) TiB; *в* – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле; на микроэлектроннограмме выявляются дифракционные кольца графита (104); (304); (227) и точечные рефлексы β -титана (плоскость [110]); *е* – микроэлектроннограмма к (*г*); на (*г*) стрелками указаны островки с наноразмерными включениями карбида титана

Под покрытием располагается слой жидкофазного легирования титана углеродом и бором. Его структура также неоднородна как по глубине, так и по сечению вдоль поверхности легирования, что отчетливо выявляется при исследовании строения поперечного шлифа образца методами сканирующей электронной микроскопии (рис. 4). Можно выделить следующие характерные морфологические разновидности структуры поверхностного слоя. Во-первых, ячейки кристаллизации, размеры которых изменяются в пределах от 250 до 650 нм (рис. 4, область 1). Во-вторых, дендриты кристаллизации с осями первого (рис. 4, область 2) и второго (рис. 4, область 3) порядка. В-третьих, структура зеренного типа; по границам зерен располагаются включения второй фазы округлой формы (рис. 4, область 4). Размеры зерен изменяются в пределах от 0,5 до 0,8 мкм; размеры включений: от 70 до 200 нм. В-четвертых, структура пластинчатого типа, поперечные размеры пластин которой изменяются в пределах от 0,8 до 1,5 мкм (рис. 4, область 5). По границам пластин располагаются включения второй фазы, размеры которых составляют ~100 нм.

Выявленные структуры располагаются в зоне легирования определенным образом: структуры ячеистого типа выявляются вблизи границы раздела покрытия и поверхностного слоя, а также вблизи границы раздела поверхностного и промежуточного слоев; структуры дендритной кристаллизации располагаются в верхней и центральной частях поверхностного слоя; структуры зеренного и пластинчатого типа – в нижней части поверхностного слоя.

Выводы

Выполненные в работе исследования технически чистого титана марки BT1-0 после электровзрывного карбоборирования показали, что

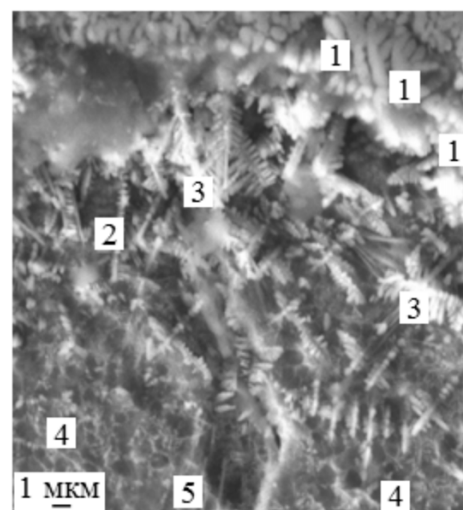


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры зоны электро-взрывного карбоборирования сплава BT1-0

обработка приводит к созданию слоистой многофазной структуры. На поверхности обработки формируется многофазное (α -титан, β -титан, графит, частицы борида TiB и карбида TiC титана) покрытие. Под покрытием располагается слой жидкофазного легирования, структура которого закономерным образом зависит от расстояния до поверхности обработки. Показано, что данный слой имеет структуру ячеистой и дендритной кристаллизации.

Список литературы

1. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов* / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
2. *Физические основы химико-термоциклической обработки сталей* / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Н.А. Попова, Э.В. Козлов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 250 с.

Phase structure of the surface technically pure titanium BT1-0 after electroexplosive carboborating

Yu.F. Ivanov, Gromov V.E., N.A. Soskova,
S.V. Raykov, E.A. Budovskikh, A.V. Ionina

By methods of scanning and transmission electron microscopy it is shown that electroexplosive carboborating of the surface of technically pure titanium BT1-0 leads to formation of the layered multiphase structure hardened by titanium boride and carbide particles.

Key words: technically pure titanium, electroexplosive carboborating, carbon fibres, hardening.