

и в отсутствие деформации при жестких условиях или провоцируется атомными смещениями от свободных поверхностей при свободно-жестких условиях.

Дислокации с поверхностями при свободно-жестких граничных условиях образуются только при значениях стартовой деформации выше 5 – 6 %. Как правило, пластический сдвиг инициируется на поверхности, а сама дислокация в большинстве случаев захватывается зернограничной дислокационной сеткой.

**Выводы.** В результате исследования методом молекулярной динамики структурных превращений вблизи границ кручения выяснено, что растяжение бикристалла вдоль плоскости границы кручения приводит к интенсификации зернограничной диффузии, обусловленной трансформацией дислокационной сетки. При этом деформация в направлении, перпендикулярном границе, влияет на диффузию слабее. Пластическая деформация бикристалла на начальном этапе, как правило, сопровождается образованием атомных смещений вдоль ядер зернограничных винтовых дислокаций, приводящих к трансформации дислокационной сетки.

УДК 669.14.08.29:621.785

**Ю.Ф. Иванов<sup>1</sup>, Е.А. Будовских<sup>2</sup>, В.Е. Громов<sup>2</sup>,  
Л.П. Бащенко<sup>2</sup>, Н.А. Соскова<sup>2</sup>, С.В. Райков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА ВТ1-0 ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ НАУГЛЕРОЖИВАНИИ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ\*

Обработка поверхности титана импульсными плазменными струями, формируемыми при электрическом взрыве углеграфитовых волокон, приводит к оплавлению и легированию поверхностных слоев. Эти слои содержат структурно-свободный углерод в виде частиц разрушившихся волокон [1]. Такая структура обуславливает возможность ее дальнейшей модификации путем растворения частиц графита и увеличения содержания карбида титана [2]. При этом повышаются микротвердость и износостойкость науглероженных поверхностных слоев титановых сплавов, однако происходит огрубление структуры основы. В связи с этим представляет интерес применение для растворения частиц графита импульсно-периодической обработки

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.
3. Полетаев Г.М., Мартынов А.Н., Старостенков М.Д. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2010. Т. 7. № 4. С. 27 – 34.
4. Мартынов А.Н., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. // Письма о материалах. 2011. Т. 1. № 1. С. 43 – 46.
5. Полетаев Г.М., Мартынов А.Н., Старостенков М.Д., Громов В.Е. // Вестник ТГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2011. Т. 16. Вып. 3. С. 829 – 833.
6. Cleri F., Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys // Physical Review B. 1993. V. 48. № 1. P. 22 – 33.
7. Ларионов Л.Н., Исачев В.И. Диффузия в металлах и сплавах. – Киев: Наукова думка, 1987. – 511 с.
8. Смитлз К.Дж. Металлы. Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.

© 2012 г. Г.М. Полетаев, А.Н. Мартынов,  
Д.В. Дмитриенко, М.Д. Старостенков  
Поступила 20 декабря 2011 г.

поверхности сильноточными электронными пучками, которая позволяет нагревать облучаемую поверхность выше температуры плавления, но не приводит к изменению структуры сплава в глубине. Ранее эффективность комбинированной обработки, сочетающей электровзрывное бороалитирование поверхности технически чистого титана ВТ1-0 и последующую электронно-пучковую обработку, была опробована в работе [3].

Целью настоящей работы является анализ градиента структуры и фазового состава зоны электровзрывного науглероживания титана ВТ1-0 после ее электронно-пучковой обработки.

В качестве материала основы использован технически чистый титан марки ВТ1-0. Образцы имели форму шайб толщиной 5 и диам. 20 мм. Электровзрывное науглероживание осуществляли на установке ЭВУ 60/10 [1] при поглощаемой плотности мощности 6,5 ГВт/м<sup>2</sup> и времени импульса 100 мкс. Инструментом воздействия на поверхность служила импульсная плазменная струя, сформированная из продуктов электрического взрыва

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.0813) и грантами РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а, № 11-02-12091-офи-м-2011 и № 11-08-98020-р\_сибирь\_а).

углеродной ленты марки ЛУ-П/0.1-50. Последующую электронно-пучковую обработку проводили на установке «Соло» [4, 5] в среде аргона при остаточном давлении газа в рабочей камере 0,02 Па. Энергия электронов составляла 18 кэВ, плотность энергии пучка 45 Дж/см<sup>2</sup>, время импульсов 100 мкс, число импульсов 20, частота следования импульсов 0,3 Гц, поглощаемая плотность мощности 4,5 ГВт/м<sup>2</sup>.

Исследование структуры обработанных образцов осуществляли путем анализа тонких фольг на просвечивающем электронном микроскопе. Фольги готовили из пластинок, вырезанных параллельно облученной поверхности на расстояниях 10 – 15, 25 – 30 и 50 – 60 мкм от нее. При выборе этих значений исходили из предварительного анализа структуры поперечных шлифов методом световой микроскопии (рис. 1). Анализу подвергали также фольгу, непосредственно включающую поверхность обработки.

При исследовании на поверхности выявлена структура пластинчатого типа. Размеры пластин (поперечные) не превышают 100 нм. Объем пластин характеризуется наличием крапчатого контраста элементов с характерными размерами в пределах 10 – 20 нм. Крапчатый контраст пластин свидетельствует о присутствии в них выделений второй фазы. На рис. 2 представлены изображения структуры поверхностного слоя. Кольцевое строение микроэлектроннограммы указывает на наноразмерную кристаллическую структуру пластин. Индексирование микроэлектроннограммы (рис. 2, *в*) выявило присутствие рефлексов  $\alpha$ -титана, карбида титана и графита кубической модификации (параметр решетки  $a$  составляет 0,5545 нм).

Анализ структурно-фазового состояния отдельно взятой пластины показал, что пластины являются  $\alpha$ -титаном; карбид титана располагается в объеме пластин; графит формирует прослойки, разделяющие пластины  $\alpha$ -титана. Основными рефлексами, присутствующими на микроэлектроннограмме (рис. 2, *е*), полученной с пластинчатой структуры (рис. 2, *з*), являются

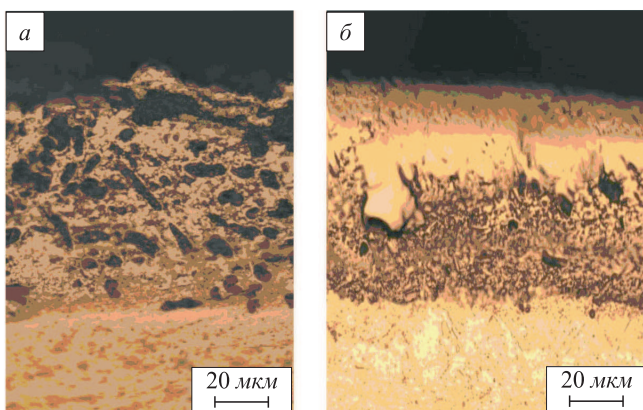


Рис. 1. Структура поверхностных слоев титана VT1-0 после взрывного науглероживания (*а*) и электронно-пучковой обработки (*б*)

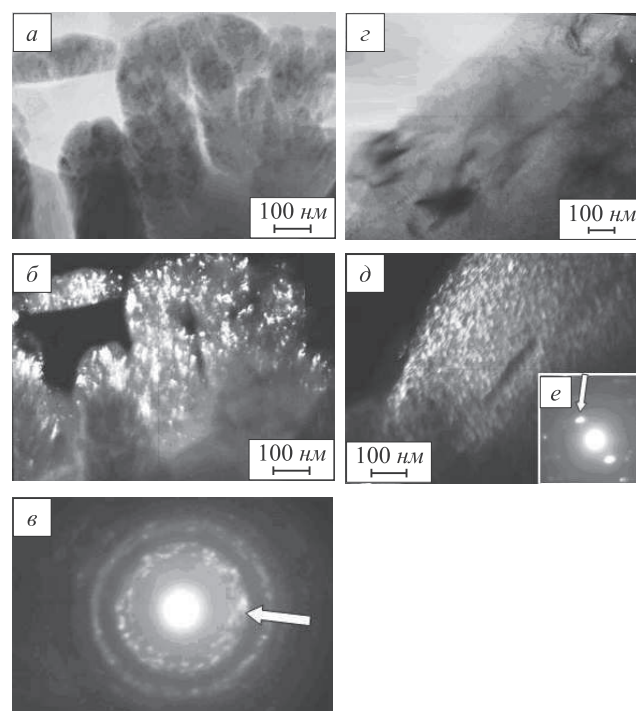


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры, сформированной в поверхностном слое технически чистого титана VT1-0 при комбинированной обработке:  
*а, з* – светлое поле; *б* и *д* – темное поле, полученное в рефлексах первого дифракционного кольца и в рефлексах  $[100]\alpha\text{-Ti} + [111]\text{TiC}$ ;  
*в* и *е* – микроэлектроннограмма с поз. *б* и *д* (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

рефлексы, принадлежащие кристаллическим решеткам  $\alpha$ -титана и карбида титана.

В поверхностном слое, расположенном на расстоянии 10 – 15 мкм, фиксируется структура трех морфологически различных типов – пластинчатая, зеренно-субзеренная и ячеистая. Пластинчатая структура подобна структуре, выявленной на поверхности модификации. Размеры пластин изменяются в пределах 250 – 300 нм. Анализ микроэлектроннограммы указывает на то, что пластины сформированы  $\alpha$ -титаном. Наряду с рефлексами, принадлежащими  $\alpha$ -титану, на микроэлектроннограмме выявляются рефлексы карбида титана. В структуре ячеистого типа (рис. 3) размеры ячеек изменяются в пределах 0,7 – 0,8 мкм. Микродифракционный анализ показывает, что ячейки сформированы твердым раствором на основе  $\alpha$ -титана (рис. 3, *б*); ячейки разделены прослойками толщиной 200 – 800 нм. На микроэлектроннограмме, полученной с прослойки, выявляются рефлексы, принадлежащие кристаллическим решеткам  $\alpha$ -титана и карбида титана типа TiC (рис. 3, *в*).

На глубине 25 – 30 мкм формируется смешанная структура, представленная зернами  $\alpha$ -титана, чередующимися с элементами дендритной кристаллизации расплава. Преобладающим типом структуры являются зерна  $\alpha$ -титана (рис. 4). Применение метода темнопольного анализа (рис. 4, *б*) с последующим индексированием микроэлектроннограммы дает основание заклю-

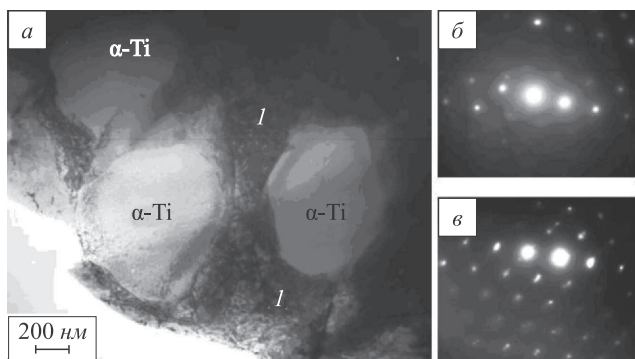


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры ячейчатого типа, сформированной при комбинированной обработке в слое технического титана VT1-0, расположенном на глубине приблизительно 10 мкм:

*a* – светлое поле; *б* и *в* – микроэлектронogramмы, полученные с объема ячейки и с прослойки *I*, разделяющей ячейки

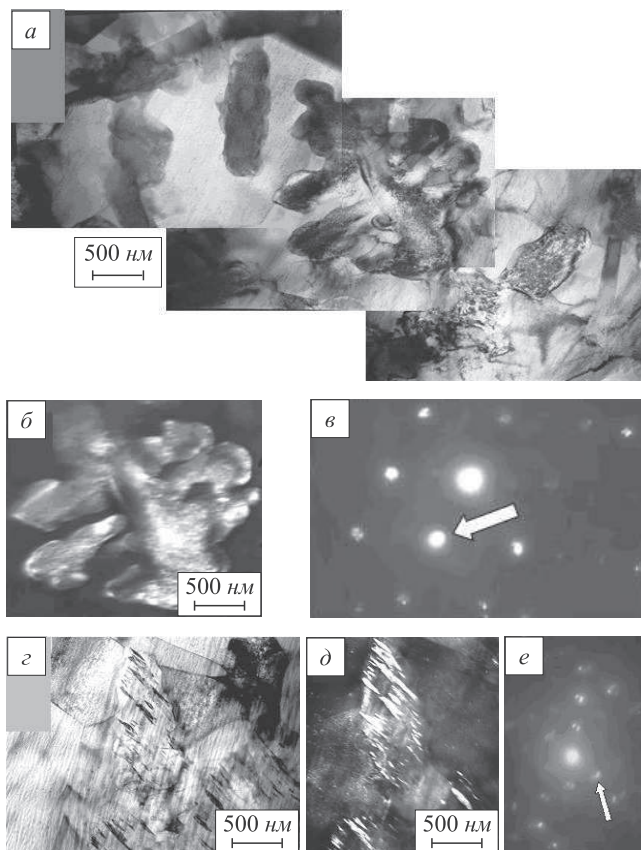


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры ячейчатого (*a* – *б*) и игольчатого (*с* – *д*) типов, сформированной при комбинированной обработке в слое технического титана VT1-0, расположенном на глубине приблизительно 25 – 30 мкм: *a*, *с* – светлое поле; *б* и *д* – темное поле, полученное в рефлексах [022]TiC и в рефлексах [111]TiC + [101]α-Ti; *в* и *е* – микроэлектронogramма с поз. *б* и *д* (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

чить, что оси дендритной структуры сформированы карбидом титана состава TiC (рис. 4, *в*). Межосные пространства сформированы α-титаном. Размеры зерен α-титана изменяются в весьма широких пределах – от

сотен нанометров до единиц микрометров. Наряду с зеренно-дендритной структурой в этом слое выявляются зерна α-титана, в объеме которых наблюдаются выделения второй фазы (рис. 4, *е*). Частицы имеют игольчатую форму, располагаются параллельными рядами. Продольные и поперечные размеры частиц изменяются в пределах 80 – 200 и 10 – 40 нм соответственно. Индексирование микроэлектронogramмы, полученной с объема содержащего выделения зерна, показало, что частицы являются карбидом титана состава TiC.

На глубине 50 – 60 мкм формируется зеренно-субзеренная структура. Вдоль границ и в стыках границ зерен располагаются прослойки (рис. 5, *a*). Методом темнопольного анализа с последующим индексированием микроэлектронogramмы показано, что прослойки сформированы α-титаном и содержат частицы карбида титана (рис. 5, *б*, *г*). Частицы имеют округлую форму; размеры частиц изменяются в пределах 10 – 15 нм. Наряду с этим в объеме зерен выявляются частицы карбида титана игольчатой формы, характерное изображение которых приведено на рис. 5, *д* – *ж*. По форме и размерам такие частицы подобны игольчатым частицам, выяв-

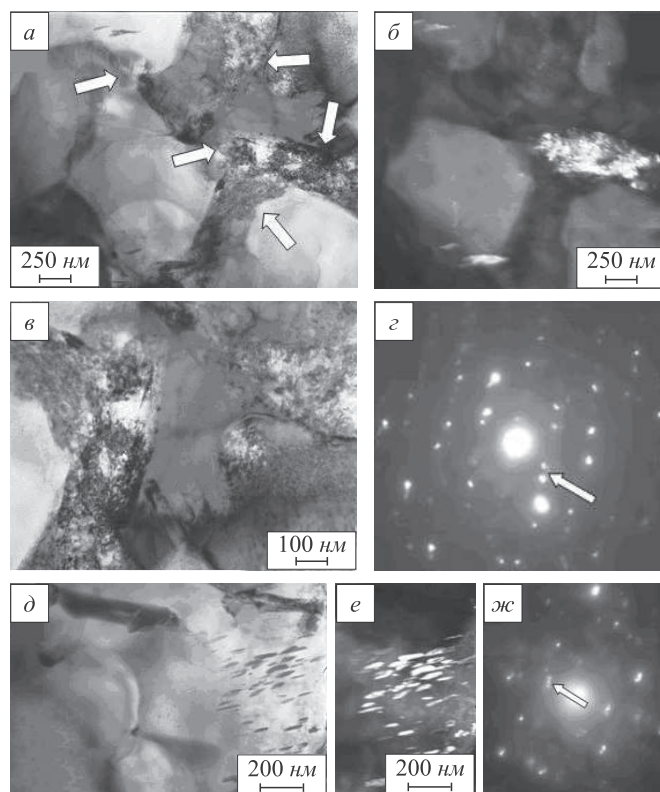


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение прослоек вдоль границ зерен (*a* – *г*) и зерна α-титана (*д* – *ж*), содержащего частицы игольчатой формы, сформированные при комбинированной обработке технического титана VT1-0 в слое, расположенном на глубине приблизительно 50 – 60 мкм:

*a*, *в*, *д* – светлое поле; *б*, *е* – темное поле, полученное в рефлексах [111]TiC + [101]α-Ti; *г* и *ж* – микроэлектронogramма с поз. *б* и *е* (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле).

Стрелкой на поз. *a* показаны границы между ячейками и прослойками между ними

ленным при исследовании структурно-фазового состояния слоя, расположенного на глубине приблизительно 25 – 30 мкм (рис. 4, *з – е*). Частицы карбидной фазы выявляются и вдоль границ зерен  $\alpha$ -титана. В этом случае они формируют протяженные прослойки (рис. 6).

**Выводы.** Методами послойного анализа показано, что в зоне электровзрывного науглероживания после обработки высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия на глубине до 10 – 15 мкм образуется многофазная структура пластинчатого типа на основе  $\alpha$ -титана; в объеме и вдоль границ пластин располагаются частицы карбида титана и графита. В слое, расположенном на глубине 25 – 30 мкм, формируется структура дендритной кристаллизации; оси дендритов являются карбидом титана, межосные пространства –  $\alpha$ -титаном. Карбид титана в этом слое присутствует и в виде частиц игольчатой формы, расположенных в зернах  $\alpha$ -титана. В слое, расположенном на глубине 50 – 60 мкм, формируется зерно-субзеренная структура на основе  $\alpha$ -титана; в объеме и вдоль границ зерен располагаются частицы карбида титана различных размеров и различной морфологии.

#### 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. Вострецова А.В., Карпий С.В., Будовских Е.А. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 63 – 66.

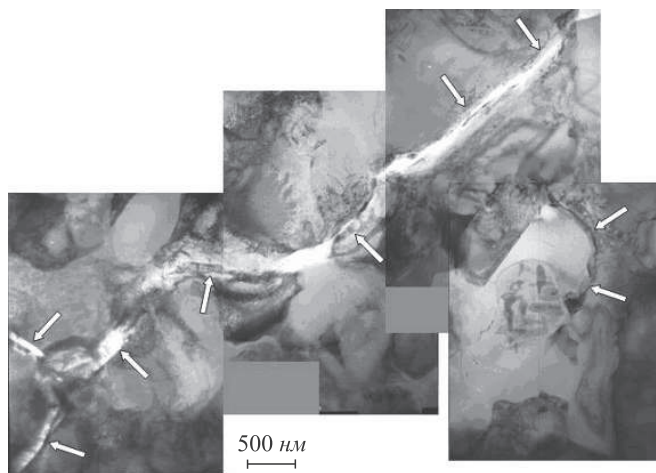


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры технически чистого титана ВТ1-0, сформированной при комбинированной обработке в слое, расположенном на глубине приблизительно 50 – 60 мкм (стрелками показаны протяженные прослойки)

3. Карпий С.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Морозов В.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 86 – 88.
4. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. – В кн.: Структура и свойства перспективных металлических материалов / Под ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345 – 382.
5. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Изв. вуз. Физика. 2008. № 5. С. 60 – 70.

© 2012 г. Ю.Ф. Иванов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Л.П. Бащенко, Н.А. Соскова, С.В. Райков  
Поступила 8 февраля 2012 г.