

Структура и фазовый состав титана BT1-0 после электровзрывного бороалитирования и электронно-лучевой обработки

С. В. Карпий, М. М. Морозов, Ю. Ф. Иванов, Е. А. Будовских,
Ю. А. Колубаева, А. Д. Тересов, В. Е. Громов

Проведена комбинированная обработка поверхности технически чистого титана, включающая электровзрывное бороалитирование и последующее электронно-пучковое облучение. Методами электронной сканирующей и дифракционной микроскопии установлено, что зона легирования имеет градиентную структуру и многофазный состав, содержащий бориды алюминия и титана различных размеров и формы. Микротвердость поверхности достигает 1600 HV.

Ключевые слова: электровзрывное легирование, бороалитирование титана, электронно-пучковая обработка, рельеф поверхности, структура, фазовый состав, микротвердость.

The combined treatment of commercial purity titanium surface, including electroexplosive boroaluminizing and subsequent electron-beam irradiation, is carried out. By methods of electron scanning and diffraction microscopy it is established, that the alloying zone has gradient structure and the multiphase composition containing aluminium borides and titanium borides of the various sizes and form. Surface microhardness achieves 1600 HV.

Keywords: electroexplosive alloying, titanium boroaluminizing, electron-beam treatment, surface relief, structure, phase composition, microhardness.

Введение

Повышение эксплуатационных требований к материалам стимулирует разработки в области поверхностного легирования. Традиционные способы химико-термической обработки зачастую являются энергоемкими, весьма длительными, экологически грязными. В последние десятилетия разрабатываются новые способы модификации поверхности материалов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, таких как лазерное излучение, электронные и ионные пучки, плазменные потоки и струи [1].

В работе [2] экспериментально показана эффективность использования для упрочнения металлов и сплавов метода электровзрывного легирования (ЭВЛ), основанного на воздействии на поверхность обрабатываемой детали многофазной плазменной струи электрического взрыва проводников. Оплав-

ление поверхности при ЭВЛ сокращает время легирования, а высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к существенному измельчению зеренной и субзеренной структуры зоны воздействия. В работах [3 – 5] показано, что дополнительное улучшение качества поверхности стали 45 после электровзрывного алитирования достигается при последующей электронно-пучковой обработке. Такая комбинированная обработка увеличивает микротвердость поверхности по сравнению с исходным состоянием в 3 раза, а толщину упрочненных слоев по сравнению с материалом, подвергнутым только ЭВЛ или только электронно-пучковой обработке, в 2,5 раза. Представляет интерес изучить возможности использования комбинированной обработки и при упрочнении других промышленных металлов и сплавов.

Цель настоящей работы — изучение структуры и фазового состава поверхностных слоев технически чистого титана BT1-0, подвергнутого комбиниро-

ванной обработке, сочетающей электровзрывное бороалитирование и последующее электронно-пучковое воздействие.

Материал и методика исследования

Обработке подвергали образцы в форме шайб толщиной 10 и диаметром 18 мм. ЭВЛ осуществляли на электровзрывной установке, обеспечивающей поглощаемую плотность мощности на облучаемой поверхности 4,7 ГВт/м². Для формирования струи использовали алюминиевую фольгу массой 120 мг с размещенной на ней навеской порошка аморфного бора массой 60 мг. Давление в технологической камере составляло 100 Па. Последующую электронно-пучковую обработку поверхности легирования осуществляли на лабораторной установке «СОЛО» Института сильноточной электроники СО РАН [6] при следующих параметрах: плотность энергии пучка электронов $E_S = 25$ Дж/см², длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 50$ мкс, количество импульсов воздействия $N = 5$, частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹.

Исследования структуры и фазового состава поверхностных слоев титана после обработки проводили методами оптической, сканирующей и электронной дифракционной микроскопии и измерения микротвердости [3 – 5].

Результаты исследования и их обсуждение

Сканирующая электронная микроскопия показала, что на поверхности электровзрывного бороалитирования титана формируется неоднородное по толщине тонкое (до 1 – 2 мкм) покрытие. Оно образовано микрочастицами продуктов взрыва алюминиевой фольги и бора, оседающими из тыла многофазной плазменной струи [2]. На поверхности выявляются также микропоры и микротрещины (рис. 1а). Микротвердость поверхности увеличивается в 3,5 раза, достигая 1050 НВ. Последующая обработка импульсным электронным пучком сопровождается высокоскоростным плавлением и охлаждением поверхности, выравниванием ее рельефа, уменьшением количества микротрещин (рис. 1б). Микротвердость поверхности после комбинированной обработки увеличивается примерно до 1600 НВ, то есть в 5,5 раз.

Сканирующая электронная микроскопия, выполненная на поперечных шлифах образцов после комбинированной обработки, показала, что на поверхности формируется зона легирования, резко отличающаяся по контрасту от нижележащего

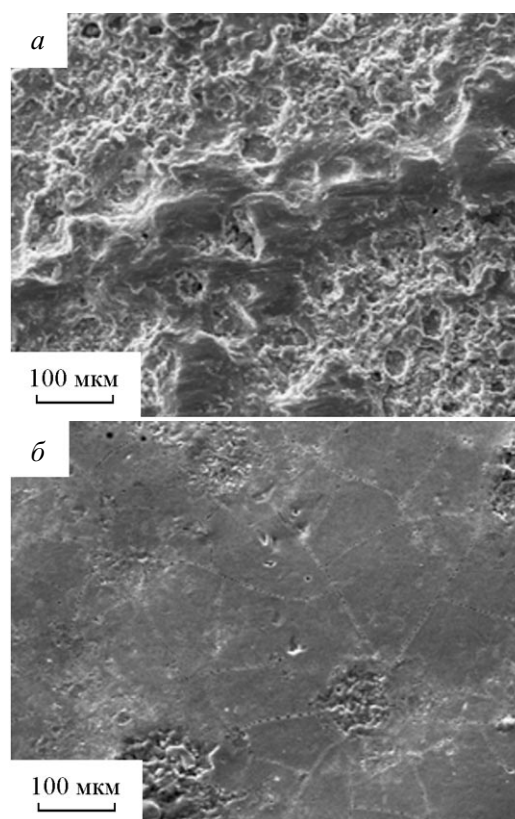


Рис. 1. Структура поверхности технически чистого титана BT1-0, подвергнутого электровзрывному бороалитированию (а) и последующей электронно-пучковой обработке (б). Сканирующая электронная микроскопия.

материала основы (рис. 2). Ее толщина изменяется в пределах от 15 мкм до 50 – 60 мкм. Структура зоны легирования весьма неоднородна по толщине. По морфологическому признаку в ней выделяются образования пластинчатой (иглообразной) и округлой (глобулярной) формы (рис. 2б). Продольные размеры пластин изменяются в пределах 3 – 7 мкм, а поперечные — в пределах 0,2 – 0,3 мкм. Пластины группируются в пакеты, содержащие по 3 – 5 пластин. Размеры образований округлой формы изменяются в пределах 70 – 300 нм. Поверхностный слой толщиной 1 – 2 мкм представлен преимущественно образованиями сферической формы. Далее выделяется слой толщиной 5 – 7 мкм, имеющий преимущественно пластинчатую структуру. В слое толщиной 5 – 8 мкм, примыкающем к основному объему образца, формируется структура смешанного типа, содержащая образования пластинчатой и округлой формы. На границе раздела основного объема материала и выделенного нами поверхностного слоя наблюдается тонкий (толщиной 1 – 2 мкм) переходный слой, имеющий зеренное строение. Размеры зерен в нем

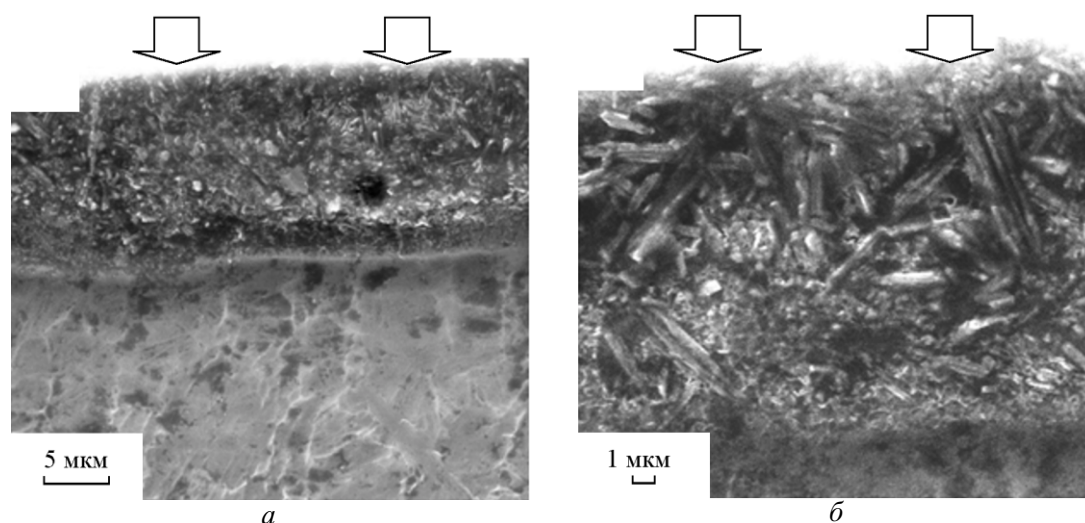


Рис. 2. Структура поверхностного слоя технически чистого титана ВТ1-0, подвергнутого электровзрывному бороалитированию и последующей электронно-пучковой обработке. Сканирующая электронная микроскопия поперечного сечения. Стрелками указана поверхность обработки.

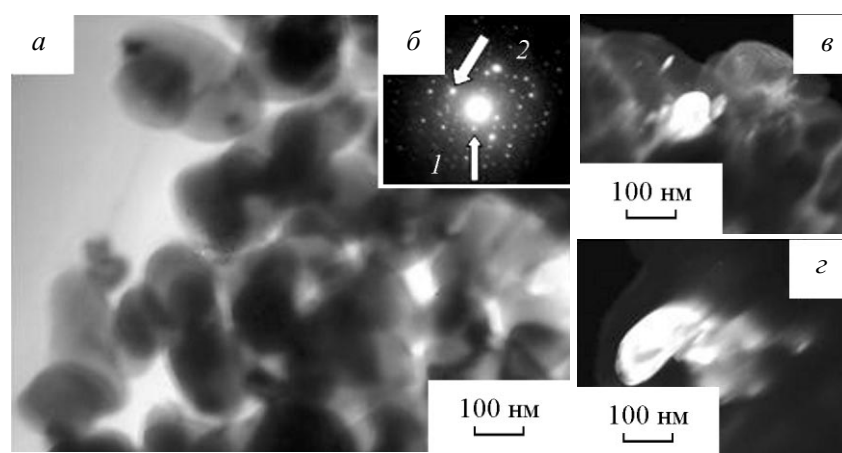


Рис. 3. Электронномикроскопическое изображение частиц фазы $\gamma\text{-AlB}_{12}$: а — светлое поле; б — микроэлектронграмма (стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля); в, г — темные поля, полученные в рефлексах [212] (1) и [302] (2), соответственно.

		AlB_{12}			
d^* , нм		Интенсивность, %	h	k	l
Измерено	Справочное значение				
0,73	0,717	30	1	1	0
0,66	0,626	10	1	1	1
0,41	0,415	100	2	0	2
0,39	0,385	60	2	1	2
0,33	0,321	10	3	1	0
0,29	0,305	40	3	0	2
0,26	0,2634	40	3	2	2

* d — межпроскостное расстояние

изменяются в пределах 0,8 – 1,1 мкм. По границам зерен наблюдаются выделения второй фазы.

При анализе фазово-структурного состояния зоны легирования методами просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг, учитывая, что ее поверхность после комбинированной обра-

ботки — волнистая, а толщина изменяется в широких пределах, исходили из того, что фольги содержат все слои, выявленные при сканирующей электронной микроскопии.

Использование метода темнопольного изображения с одновременным индицированием соот-

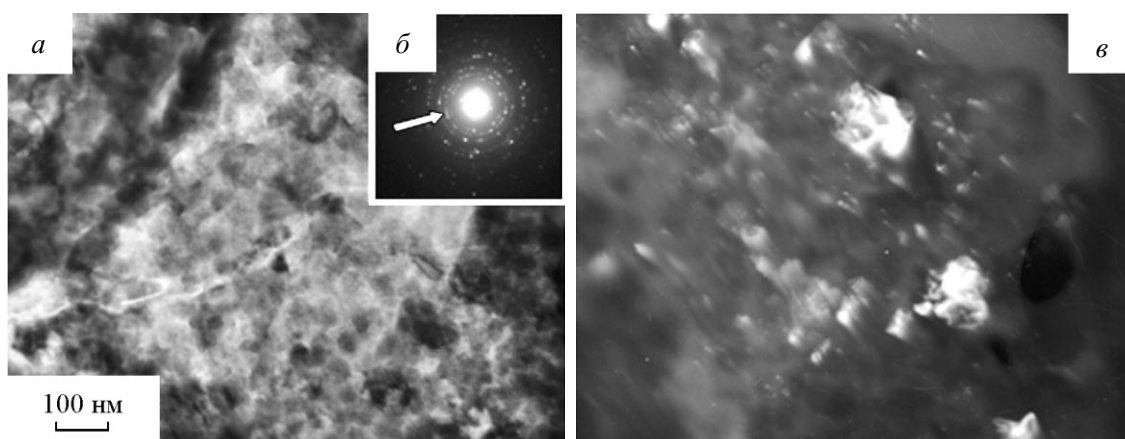


Рис. 4. Электронномикроскопическое изображение частиц фазы TiB_2 : *a* — светлое поле; *б* — микроэлектронграмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле); *в* — темное поле, полученное в рефлексе $[100]$.

		TiB_2			
d^* , нм		Интенсивность, %	h	k	l
Измерено	Справочные значения				
0,31	0,32295	22	0	0	1
0,25	0,26246	55	1	0	0
0,20	0,2037	100	1	0	1
0,14	0,11049	14	1	1	2
0,135	0,13717	18	1	1	1

* d — межпроскостное расстояние

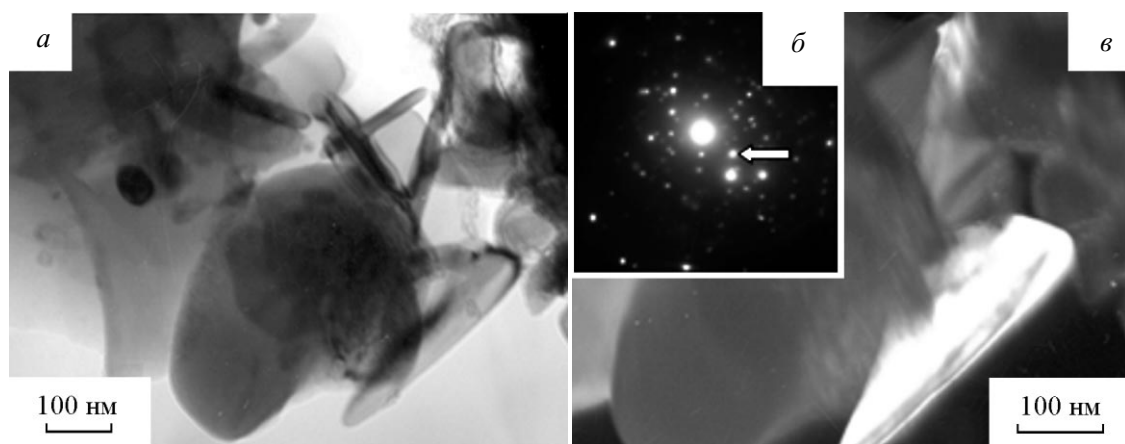


Рис. 5. Электронномикроскопическое изображение частиц фазы Ti_3B_4 : *a* — светлое поле; *б* — микроэлектронграмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле); *в* — темное поле, полученное в рефлексе $[110]$.

		Ti_3B_4			
d^* , нм		Интенсивность, %	h	k	l
Измерено	Справочные значения				
0,32	0,318	30	1	1	0
0,27	0,2659	10	1	3	0
0,25	0,2533	100	0	3	1
0,21	0,2117	90	1	2	1
0,205	0,2102	75	1	5	0

* d — межпроскостное расстояние

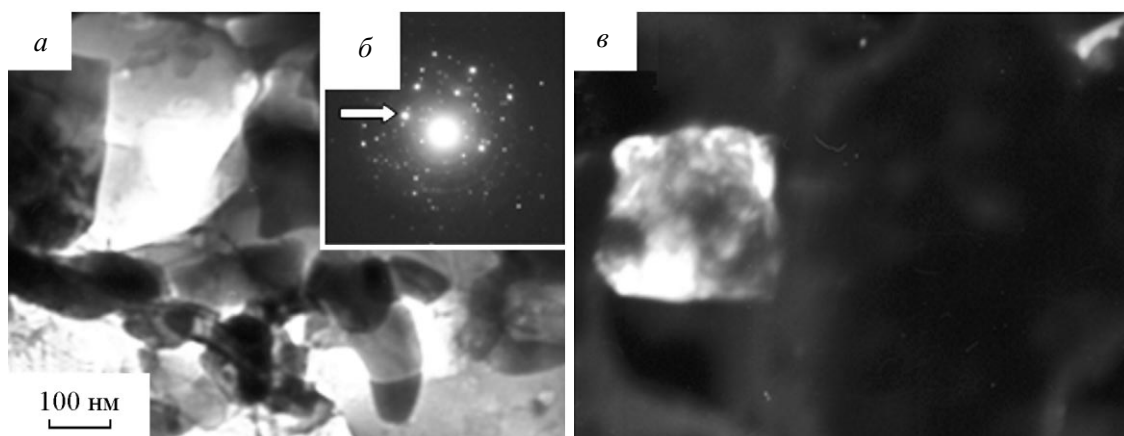


Рис. 6. Электронномикроскопическое изображение частиц фазы TiB: *a* — светлое поле; *б* — микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле); *в* — темное поле, полученное в рефлексе [111]

TiB					
d^* , нм		Интенсивность, %	h	k	l
Измерено	Справочное значение				
0,25	0,245	80	1	1	1
0,15	0,15	60	2	2	0
0,13	0,128	40	3	1	1

* d — межпроскостное расстояние

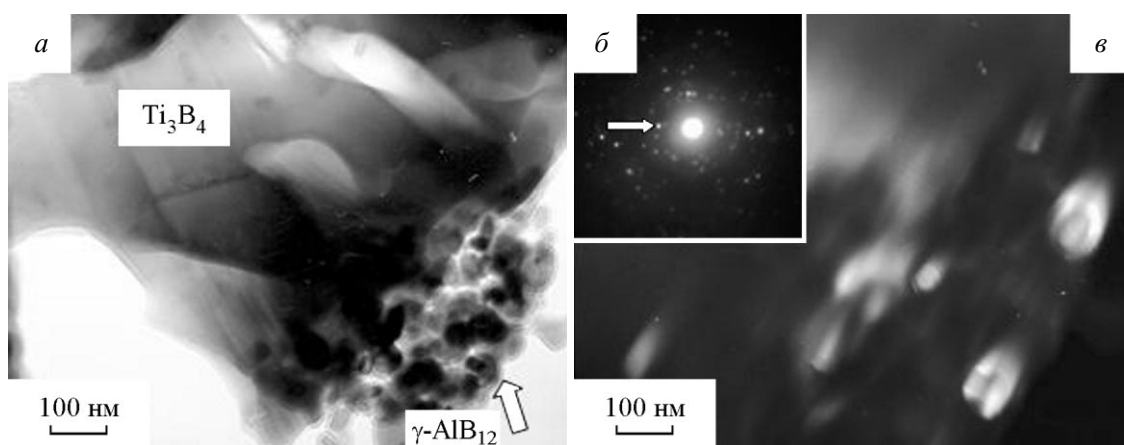


Рис. 7. Электронномикроскопическое изображение частиц фазы γ -AlB₁₂ и Ti₃B₄: *a* — светлое поле; *б* — микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле; *в* — темное поле, полученное в рефлексе [013] γ -AlB₁₂.

ветствующих микроэлектроннограмм позволило идентифицировать следующие фазы: γ -AlB₁₂; AlB₁₀; TiB₂; Ti₃B₄; TiB. Включения фазы γ -AlB₁₂ имеют округлую форму, их средние размеры составляют 100 нм (рис. 3). Включения фазы TiB₂ также имеют округлую форму, однако их размеры гораздо меньше и изменяются в пределах 10 – 25 нм (рис. 4). Включения фазы Ti₃B₄ имеют форму игл или пластин. Средние поперечные размеры игл составляют 20 нм,

а продольные — 250 нм. Средние поперечные и продольные размеры пластин — 100 и 300 нм, соответственно, (рис. 5). Включения фазы TiB имеют форму равноосных пластин, размеры которых изменяются в пределах от 100 до 300 нм (рис. 6). Весьма часто данные фазы, располагаясь островками друг относительно друга (рис. 7), образуют конгломераты. Зерна в переходном слое на границе с основой образованы α -титаном (рис. 8). Их размеры изменяются в

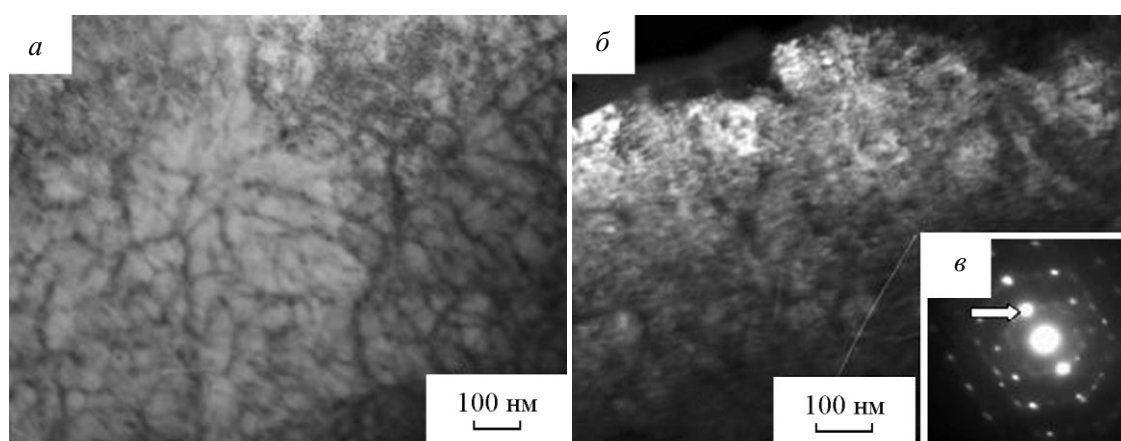


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение внутризеренной структуры α -титана: а — светлое поле; б — темное поле, полученное в совпадающих рефлексах [101] α -Ti и [202]AlB₁₀; в — микроэлектронограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле.

AlB₁₀

d^* , нм		Интенсивность, %	h	k	l
Измерено	Справочное значение				
0,26	0,2627	5	3	0	1
0,25	0,251	80	2	3	0
0,24	0,2393	100	2	0	2
0,18	0,1755	20	4	0	2

* d — межпроскокное расстояние

пределах 0,8–1,1 мкм. В объеме зерен присутствует ячеистая неориентированная структура, по границам ячеек наблюдаются выделения второй фазы состава AlB₁₀.

С учетом того, что с глубиной зоны легирования концентрация алюминия уменьшается [5], можно считать, что вблизи поверхности обработки преимущественно располагаются бориды алюминия, а в глубине — бориды титана. Следует отметить, что микроэлектронограммы, представленные на рис. 3–7, имеют сложное строение. Это указывает на возможное наличие в зоне легирования фаз, неучтенных при индицировании микроэлектронограмм. Среди таких фаз можно ожидать присутствие оксидов, а также алюмооксиборидов, образующихся вследствие неконтролируемого взаимодействия расплава с остаточной атмосферой в технологической камере электровзрывной установки.

Выводы

Электровзрывное бороалитирование поверхности технически чистого титана BT1-0 приводит к формированию неоднородной по толщине зоны легирования, достигающей 50–60 мкм. Рельеф поверхности легирования, образованный конденсированными частицами продуктов взрыва алюми-

ниевой фольги и ее взаимодействия с частицами бора, при дополнительной электронно-пучковой обработке сглаживается. Зона легирования после комбинированной обработки имеет многофазную структуру, содержащую бориды алюминия и титана различных размеров и формы. Бориды алюминия преимущественно располагаются вблизи поверхности обработки, а бориды титана — в глубине. Микротвердость поверхности после электровзрывного бороалитирования составляет 1050 HV, а после комбинированной обработки — 1600 HV.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты №№ 08-02-00024; 08-02-1201) и программы Президиума РАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий (проект № 27.4).

Литература

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.Я., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. М. Изд-во Круглый год, 2001, 528 с.
2. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007, 301 с.

3. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Тересов А.Д., Филимонов С.Ю., Вострецова А.В., Будовских Е.А., Громов В.Е. Модификация низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком поверхности стали, легированной электровзрывным методом. Упрочняющие технологии и покрытия, 2009, № 2, с. 41 – 45.
4. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Филимонов С.Ю., Тересов А.Д., Колубаева Ю.А., Будовских Е.А., Вострецова А.В., Громов В.Е. Структура и свойства поверхности электронно-пучковой обработки стали, подвергнутой электровзрывному алитированию. Изв. вуз. Физика, 2009, № 11/2, с. 161 – 165.
5. Иванов Ю.Ф., Филимонов С.Ю., Колубаева Ю.А., Тересов А.Д., Коваль Н.Н., Вострецова А.В., Будовских Е.А., Громов В.Е. Структурно-фазовое состояние поверхности электронно-пучковой обработки стали, подвергнутой электровзрывному алитированию. Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2009, № 2, с. 119 – 123.
6. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. Изв. вуз. Физика, 2008, № 5, с. 60 – 70.

Карпий Сергей Васильевич — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), аспирант. Специализируется в области физики конденсированного состояния. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Будовских Евгений Александрович — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), доктор технических наук, доцент, профессор. Специалист в области импульсной плазменной обработки поверхности материалов и физического материаловедения. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

Иванов Юрий Федорович — Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник. Специалист в области электронно-пучковой обработки материалов и физического материаловедения. E-mail: yufi@mail2000.ru.

Колубаева Юлия Александровна — Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), младший научный сотрудник. Специалист в области электронно-пучковой обработки материалов и физического материаловедения.

Тересов Антон Дмитриевич — Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), аспирант. Специализируется в области физики конденсированного состояния.

Громов Виктор Евгеньевич — Сибирский государственный индустриальный университет (г. Новокузнецк), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой. Специалист в области физического материаловедения, физики прочности и пластичности в условиях внешних энергетических воздействий, модификации металлов и сплавов импульсными потоками плазмы и пучками заряженных частиц. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.