

УДК 537.523.4

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА

© 2013 г. С. А. Пячин¹, А. А. Бурков¹, В. С. Комарова²

¹Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия

²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия

Поступила в редакцию 27.09.2012 г.

Электроискровым осаждением титана на алюминий и алюминия на титан созданы покрытия, содержащие интерметаллиды Ti–Al. Методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов изучены структура и состав покрытий. Установлено, что формируемый в аргоне поверхностный слой в основном содержит интерметаллид α -TiAl₃ независимо от длительности и частоты разрядных импульсов. Фазы γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al могут быть получены при осаждении алюминия на титан с последующим нанесением второго слоя титана. При формировании электроискровых покрытий в воздухе дополнительно образуются оксид алюминия и нитрид титана.

DOI: 10.7868/S0207352813060164

ВВЕДЕНИЕ

Сплавы на основе интерметаллидов Ti–Al представляют значительный интерес для аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая температура плавления, низкая плотность, высокий модуль упругости, жаропрочность, стойкость к окислению и возгоранию [1, 2]. Помимо этого, в последнее время наметилась тенденция использовать алюминиды титана для создания защитных и износостойких покрытий. Слой TiAl, нанесенный на псевдо- α -титановый сплав, придает ему высокую стойкость к высокотемпературному окислению с сохранением защитных свойств при растяжении титановой подложки [3]. Наплавочный слой на поверхности титана, содержащий Ti₃Al, обладает превосходной износостойкостью из-за своей повышенной твердости. Аналогичное покрытие на основе смеси TiAl₃ + TiAl показывает высокое сопротивление окислению [4]. Таким образом, посредством изменения модификаций соединений Ti–Al существует возможность управлять свойствами интерметаллидных покрытий, что достигается выбором способа и режима их нанесения.

В настоящее время существует большое количество методов получения интерметаллидных покрытий: магнетронное распыление [3, 5], вакуумно-дуговое осаждение [6, 7], ионная имплантация [8–11], газо-плазменное напыление [12, 13], ла-

зерная наплавка [4, 14, 15], электронно-лучевая наплавка [16] и другие. Большинство этих методов основано либо на конденсации вещества из паровой фазы в вакууме, либо на бомбардировке поверхности подложки Ti–Al частицами, либо на перемешивании в расплавленном состоянии поверхностного слоя подложки с предварительно нанесенным на нее материалом. Как правило, необходим дополнительный отжиг покрытий с целью гомогенизации их структуры.

В данной работе для создания покрытий на основе алюминидов титана использовалась технология электроискрового легирования, основанная на переносе металлов с анода на катод при многократно повторяющемся воздействии электрических разрядов. Данная технология обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими [17–19]. К ним относятся простота осуществления технологической операции осаждения металлов в газовой среде при атмосферном давлении, формирование однородного по составу поверхностного слоя за счет перемешивания материалов (используемых в качестве электродов) в расплавленном состоянии и высокая адгезия покрытия к подложке. Состав создаваемых покрытий во многом определяется технологическими параметрами осаждения, но для процесса нанесения электроискровых интерметаллидных покрытий Ti–Al они практически неизвестны. Цель настоящей работы заключалась в определении основных закономерностей формирования элект-

троисковых покрытий на основе алюминидов титана с определенными стехиометрическими соотношениями. Было изучено влияние общей продолжительности осаждения, частоты и длительности разрядных импульсов, газовой среды на фазовый состав интерметаллидных покрытий.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Процесс нанесения электроискровых покрытий схематично изображен на рис. 1. Разрядные импульсы формировались генератором, собранным по схеме управляемых транзисторных ключей [20], и подавались на вибратор с легирующим электродом (анодом). Вибрационное устройство использовалось для инициирования электрических разрядов в момент разрыва контакта анода с катодом (подложкой), поскольку используемое напряжение (менее 50 В) было недостаточно для пробоя межэлектродного газового промежутка. Частота колебаний анода выбиралась в диапазоне 100–300 Гц таким образом, чтобы исключить “схватывание” электродов при остывании расплавленного металла. Поскольку электрический разряд воздействует локально на область диаметром порядка 1 мм, анод возвратно-поступательно перемещали по меандрообразной кривой вдоль поверхности катода, что обеспечивало равномерную ее обработку. Покрытия были нанесены в воздушной среде при атмосферном давлении либо в среде защитного газа (аргона). В последнем случае зона разряда обдувалась через сопло аргоном, который подавался из газового баллона.

Во время опытов частота следования импульсов (f) задавалась от 0.1 до 1 кГц. Длительность разрядов (τ) составляла 80–400 мкс; амплитуда импульсов тока — 110 ± 10 А; межэлектродное напряжение — 30 ± 5 В. Средняя мощность, выделяющаяся при разряде, была равна 3.3 ± 0.8 кВт. Покрытия наносились в среде аргона или воздуха. В качестве анода применялись цилиндрические стержни диаметром 3.5 мм из чистого титана и алюминия, катодом служили алюминиевые пластины (сплав АК8) размером $1 \times 1 \times 0.5$ см и титановые цилиндры (сплав ВТ20) диаметром 11 мм и высотой 5 мм. Покрытия были сформированы посредством электроискрового осаждения либо алюминия на титан, либо титана на алюминий. В некоторых случаях Ti и Al наносились поочередно на один и тот же образец.

Металлографические исследования осажденных слоев выполнялись с помощью оптического микроскопа МИМ-10. Микроструктура покрытий исследовалась с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) EVO 40HV в режиме фазового контраста. Микрозондовый элементный анализ проводился с использованием энергодис-

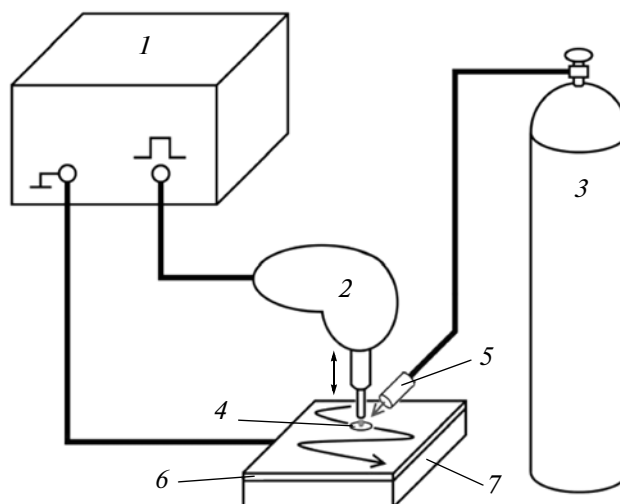


Рис. 1. Схема нанесения электроискровых покрытий: 1 – генератор разрядных импульсов; 2 – ручной вибратор с анодом; 3 – баллон с газом; 4 – область воздействия разряда; 5 – сопло; 6 – покрытие; 7 – подложка (катод).

персионного спектрометра INCA ENERGY 350, встроенного в электронный микроскоп. Фазовый состав поверхностных слоев металлов изучался с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 (CuK_α -излучение). Для идентификации линий рентгеновских спектров использовался программный пакет PDWin (НПП “Буревестник”). Толщина покрытий измерялась с применением прибора абразивного изнашивания CALLTEST.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Осаждение титана на алюминий. Исследование электроискровых покрытий титана на алюминиевой подложке показало, что газовая среда, в которой осуществлялось осаждение, оказывает влияние на микроструктуру и фазовый состав формируемых слоев. На рис. 2 приведены РЭМ-изображения поперечных сечений покрытий, полученных в аргоне и воздухе. Видно, что поверхностный слой отличается по структуре от подложки и состоит из смеси фаз различной плотности. Химический состав различных участков, отмеченных пронумерованными точками на рис. 2, представлен в табл. 1. При сравнении концентраций обнаруженных элементов было установлено, что в большей части поверхностных слоев (области светло-серого цвета, рис. 2а, точка 2, и рис. 2б, точки 3, 4) среднее соотношение атомных концентраций Ti и Al равно примерно 1 : 3.48, что близко к отношению элементов в интерметаллиде $\alpha\text{-TiAl}_3$. В покрытиях, полученных в аргоне, наблюдаются области с бо-

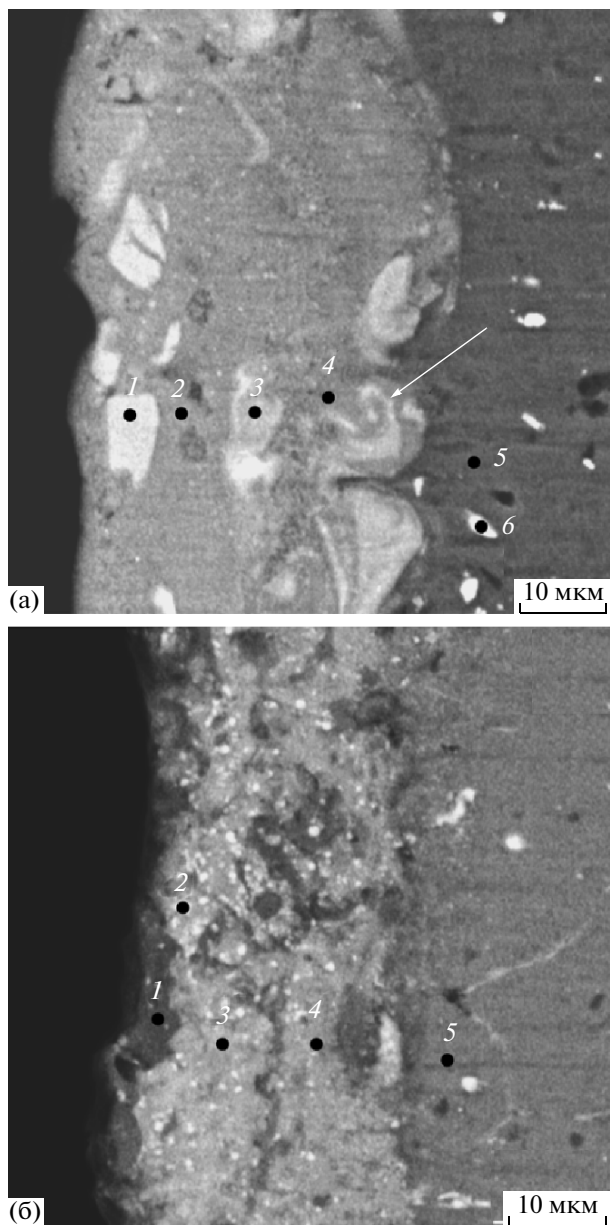


Рис. 2. Микроструктура покрытий титана, осажденных на алюминиевую подложку в аргоне (а) и воздухе (б).

лее высоким содержанием титана (светлые зоны на рис. 2а, точка 1), в которых отношение атомных концентраций $\text{Al} : \text{Ti}$ лежит в диапазоне 1.5–2.5, т.е. близко к стехиометрии интерметаллида TiAl_2 . При удалении от поверхности образца к подложке содержание титана незначительно уменьшается, а концентрация алюминия увеличивается. Примечательно, что в нанесенном поверхностном слое можно различить застывшие конвективные потоки вещества, способствующие смешиванию металлов и гомогенизации состава покрытия (показаны стрелкой на рис. 2а). Белые

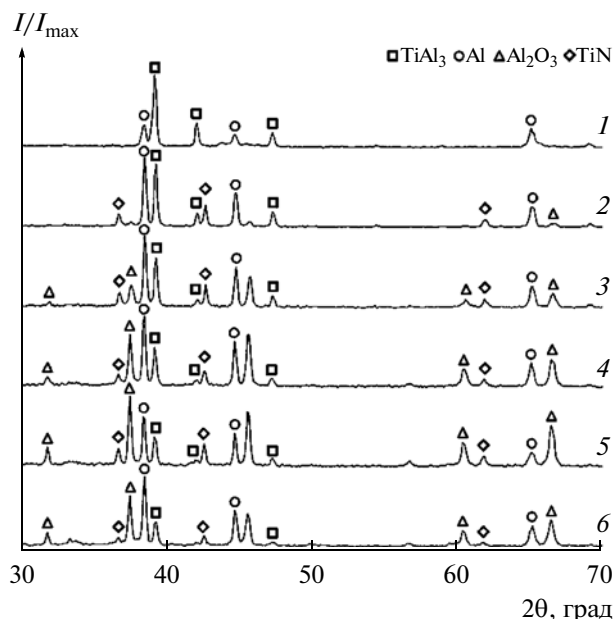


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы титановых покрытий, нанесенных на алюминий в различных средах в течение: 1 – 4 мин, аргон; 2 – 2 мин, воздух; 3 – 6 мин, воздух; 4 – 10 мин, воздух; 5 – 16 мин, воздух; 6 – 20 мин, воздух; $\tau = 200$ мкс; $f = 500$ Гц.

пятна в зоне подложки из алюминиевого сплава соответствуют включениям с повышенным содержанием железа и кремния (рис. 2а, точка 6).

Формирование TiAl_3 как основного интерметаллического соединения в электроискровых покрытиях титана на алюминии, вне зависимости от режима осаждения, было подтверждено рентгенодифракционными исследованиями. На рис. 3 представлены рентгенограммы полученных покрытий. Интенсивности пиков приведены в относительных единицах. На рентгеновских спектрах покрытий, нанесенных в аргоне, наблюдались линии α - TiAl_3 , а также алюминия. Отсутствие линий титана на дифрактограммах покрытий объясняется тем, что весь перенесенный с анода титан взаимодействует с алюминием.

Осаждение титанового покрытия в воздухе сопровождается его окислением, что является следствием взаимодействия материалов электродов с компонентами воздушной среды. На рентгеновских дифрактограммах таких покрытий появляются дополнительные пики Al_2O_3 и TiN . Следует заметить, что рефлексы оксида титана на спектрах не наблюдались, что объясняется более выгодными термодинамическими условиями образования нитрида титана при температурах, развиваемых в области воздействия разряда, по сравнению с его оксидами. Согласно оценкам, при температуре 2000 К свободная энергия Гиббса для TiN (–239 Дж/моль) меньше, чем для TiO

Таблица 1. Концентрации элементов (ат. %) в разных точках покрытий титана на алюминии

Номер точки	Элементы								
	Al	Ti	Mn	Cu	Mg	Fe	Si	N	O
Рис. 2а	Аргон								
1	59.0	39.1	0.6	1.3	—	—	—	—	—
2	74.5	21.4	0.5	2.3	1.3	—	—	—	—
3	69.8	27.7	0.7	1.8	—	—	—	—	—
4	84.4	10.8	0.4	2.6	1.8	—	—	—	—
5	96.4	—	0.4	2.1	1.1	—	—	—	—
6	72.6	—	3.5	7.3	—	11.4	5.2	—	—
Рис. 2б	Воздух								
1	44.8	16.9	0.4	1.5	—	0.4	—	16.5	19.6
2	34.3	2.6	—	—	1.9	0.4	—	12.1	48.6
3	66.8	16.8	—	1.4	1.1	0.4	—	—	13.5
4	58.4	19.5	0.3	1.8	—	0.7	—	—	19.3
5	92.3	3.1	0.3	1.9	1.3	—	—	—	1.1

Таблица 2. Толщина покрытия титана на алюминиевой подложке в зависимости от продолжительности электроискрового осаждения в воздухе ($\tau = 200$ мкс; $f = 500$ Гц)

Продолжительность, мин	0	2	4	8	10	12	16	20
Средняя толщина, мкм	0	28	32	44	46	80	110	60

(-201 Дж/моль). В результате микрорентгено-спектрального исследования было установлено, что повышенное содержание оксида алюминия наблюдается в областях поверхностного слоя, окрашенных на рис. 2б (точка 1) в темно-серый цвет. Они имеют, как правило, вытянутую форму. Светлые круглые пятна (точка 2) соответствуют более высокой концентрации нитрида титана. Области скопления TiN имеют диаметр около 1 мкм и равномерно распределены по всему покрытию. С ростом продолжительности нанесения интенсивность рефлексов на рентгеновских дифрактограммах TiN и Al_2O_3 увеличивается вплоть до времени 16 мин, затем снижается. Это обусловлено интенсивным разрушением поверхностного слоя в результате накопления дефектов. Из табл. 2 видно, что толщина покрытия растет на первых этапах процесса нанесения, а затем уменьшается. Данный эффект известен как наступление “порога хрупкого разрушения” [17], поэтому электро-

искровые покрытия наносят до момента его возникновения.

Влияние длительности разрядных импульсов на фазовый состав покрытий, осажденных в воздухе, выражается следующей зависимостью: при увеличении τ от 80 до 400 мкс содержание Al_2O_3 и TiN становится больше по сравнению с α -TiAl₃ (рис. 4). То есть с ростом длительности разрядов (с учетом их многократного повторения) увеличивается продолжительность нахождения системы металлы–воздух в области высоких температур, что повышает скорости реакций взаимодействия титана и алюминия с азотом и кислородом. Рентгеновские дифрактограммы покрытий, полученных в воздухе при разных частотах следования разрядных импульсов при условии, что число и длительность разрядов оставались постоянными (2.4×10^5 и 100 мкс соответственно), представлены на рис. 5. Видно, что с увеличением частоты разрядов от 100 до 500 Гц содержание оксида алюминия по отношению к нитриду титана и α -TiAl₃

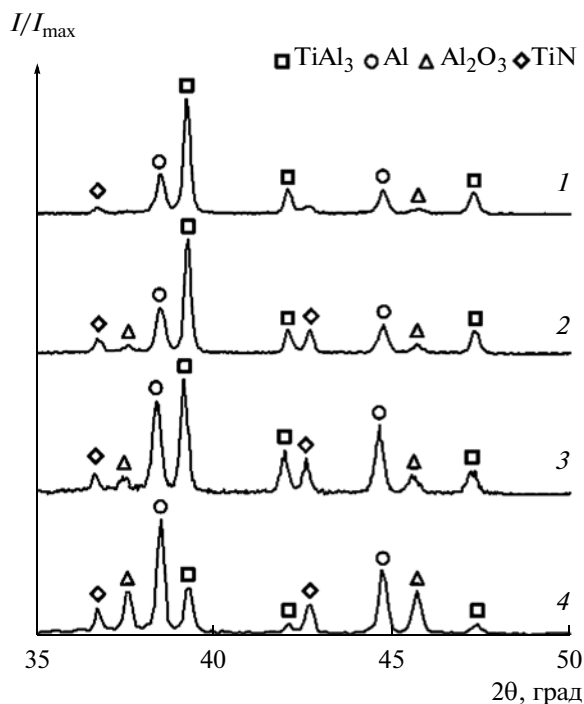


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы покрытий титана на алюминии, полученных в воздухе при различной длительности разрядов: 1 – 80 мкс; 2 – 160 мкс; 3 – 280 мкс; 4 – 400 мкс; $f = 250$ Гц; $t = 4$ мин.

становится больше. Данный факт может быть объяснен более интенсивным нагревом алюминиевой подложки при повышенных частотах. Алуминиды титана другого стехиометрического состава, отличного от TiAl_3 , не были обнаружены. Таким образом, длительность и частота электрических разрядов оказывали влияние, прежде всего, на количественное содержание соединений в покрытии, но не на его фазовый состав.

Осаждение алюминия на титан. Микроструктура алюминиевого покрытия на титане, полученного при нанесении в аргоне, изображена на рис. 6а. Осажденный слой более однородный, и в нем наблюдается меньше трещин и пор по сравнению с титановым покрытием на алюминии. Кроме того, наблюдаются включения (светлые точки) диаметром менее 1 мкм более высокой плотности, чем основной материал покрытия. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа, соотношение атомных концентраций на этих участках близко к единице, т.е. они представляют собой области сосредоточения интерметаллида $\gamma\text{-TiAl}$. Толщина слоя за 4 мин нанесения достигает порядка 20–40 мкм. Концентрации титана и алюминия на разных глубинах отличаются. На рис. 6б показано, как изменяется среднее значение отношения атомных концентраций Ti и Al в зависимости от расстояния от поверхности образ-

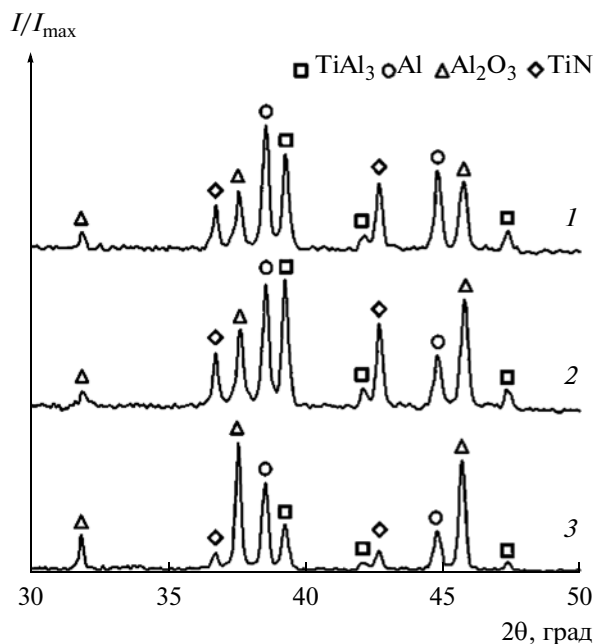


Рис. 5. Рентгенограммы покрытий титана, осажденных на алюминиевую подложку в воздухе при различных частотах: 1 – 100 Гц; 2 – 200 Гц; 3 – 500 Гц; $\tau = 100$ мкс. Число разрядов $N = 2.4 \times 10^5$ импульсов.

ца, приведенного к толщине покрытия. Видно, что в верхних слоях покрытия соотношение между концентрациями данных элементов близко к интерметаллиду TiAl_3 , а в более глубоких слоях – к интерметаллиду TiAl . Однако возможно, что это является не следствием роста концентрации TiAl , а результатом повышенного содержания титана.

Рентгенодифракционный анализ верхних слоев алюминиевых покрытий на титане, полученных при небольшой (менее 2 мин) продолжительности нанесения алюминия в аргоне, показал, что они состоят из Al, Ti и TiAl_3 (рис. 7). С увеличением общего времени осаждения покрытий и ростом числа импульсов растет продолжительность существования вещества в расплавленном состоянии, поэтому осажденный металл интенсивно перемешивается с материалом подложки. Это приводит к тому, что количество фазы $\alpha\text{-TiAl}_3$ становится больше. Однако за счет роста толщины покрытия титану из подложки сложнее достигать поверхностных слоев, поэтому интерметаллиды другого стехиометрического соотношения не образуются. Аналогичные покрытия, сформированные в воздушной среде, помимо перечисленных фаз содержали оксид алюминия, концентрация которого увеличивалась с продолжительностью нанесения. Как и в предыдущем случае, изменение длительности и частоты разрядов не оказыва-

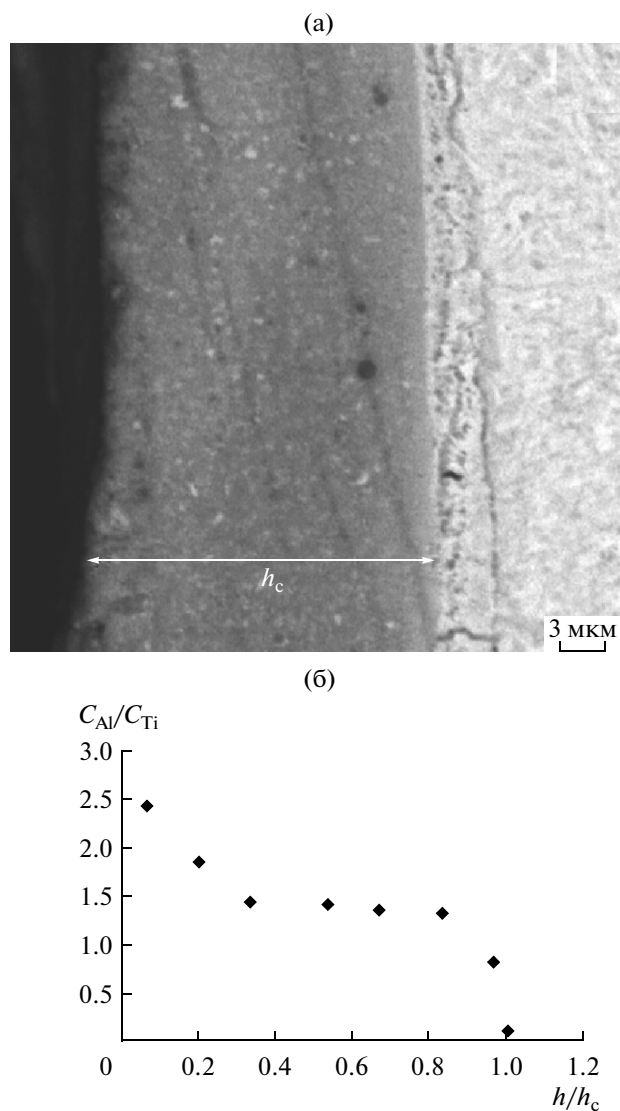


Рис. 6. Микроструктура поперечного шлифа покрытия алюминия на титане (а) и отношение атомных концентраций алюминия и титана в зависимости от глубины, приведенной к толщине покрытия h_c (б).

ло значительного влияния на фазовый состав покрытий.

Осаждение алюминия на титан с дополнительным нанесением титана. Предыдущие опыты показали, что количества титана недостаточно для получения соединения Ti_3Al , поэтому было предложено создать комбинированные покрытия путем последовательного осаждения алюминия и титана. Первый слой алюминия наносился на титан за разное время — от 1 до 4 мин, второй слой — в течение 1–3 мин. Микроструктура покрытий, полученных в аргоне при последовательном осаждении алюминия на титан за разное время, изображена на рис. 8. Несмотря на двухстадий-

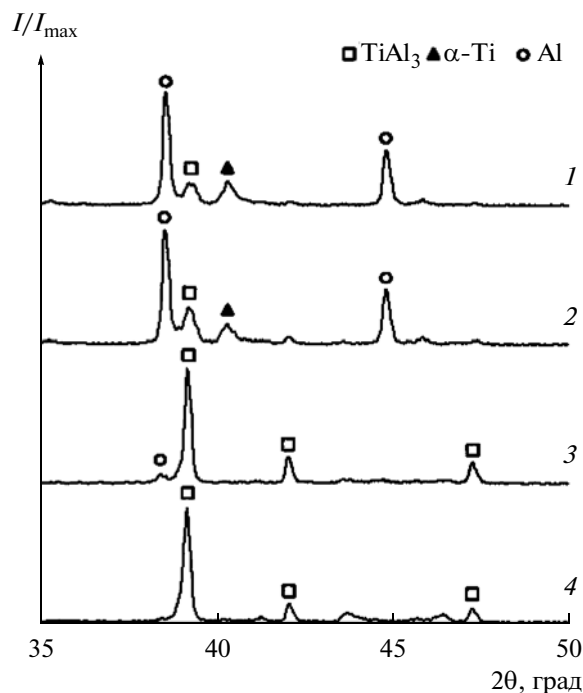


Рис. 7. Рентгеновские дифрактограммы покрытий алюминия, нанесенных на титан в аргоне в течение: 1 — 1 мин; 2 — 2 мин; 3 — 3 мин; 4 — 4 мин; $f = 1000$ Гц; $\tau = 300$ мкс.

ность осаждения металлов, комбинированные покрытия не обладали явно выраженной слоистой структурой, что объясняется интенсивным перемешиванием вещества в расплавленном состоянии. В целом, с увеличением продолжительности нанесения алюминия толщина покрытия растет и достигает порядка 50 мкм за 4 мин. В сформированном слое имеются мелкие (диаметром менее 1 мкм) включения повышенной плотности, в которых концентрация титана несколько выше, чем алюминия.

Рентгенодифракционные спектры комбинированных покрытий представлены на рис. 9. Состав покрытий характеризуется наличием трех основных фаз: Ti , $TiAl_3$, Ti_3Al и $TiAl$. С увеличением продолжительности нанесения первого слоя алюминия от одной до четырех минут содержание титана уменьшается, а количество интерметаллида $TiAl$ и $TiAl_3$ остается примерно на одном уровне. С ростом времени осаждения второго слоя титана преобладающей фазой становится Ti_3Al . Однако при осаждении Ti в течение трех минут заметно увеличивается количество α -титана, а концентрации интерметаллидов падают (рис. 10), поэтому осаждать второй слой титана более двух минут нецелесообразно.

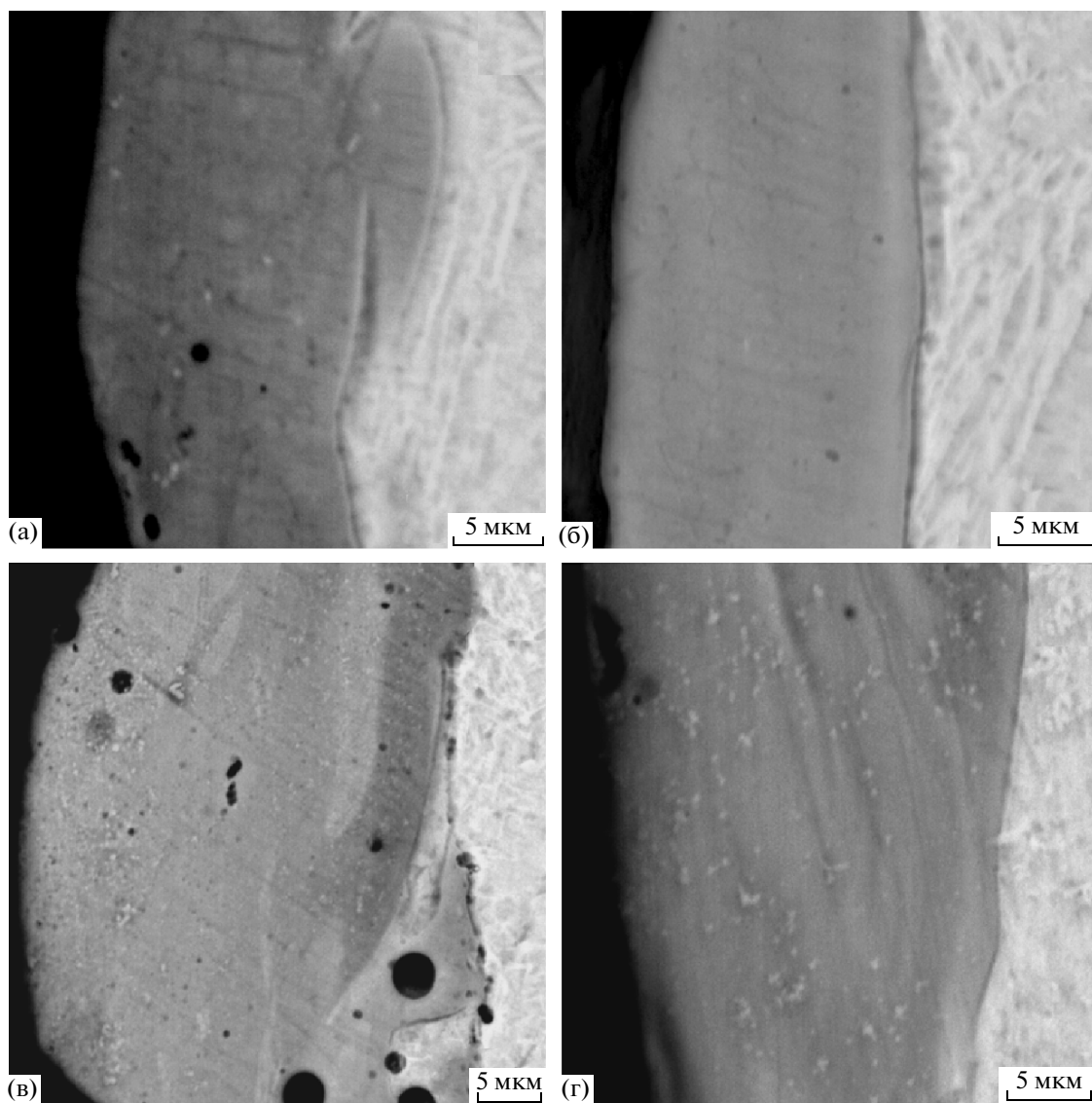


Рис. 8. РЭМ-изображения сечений электроискровых покрытий алюминия на титане с дополнительным осаждением титана. Продолжительность нанесения металлов в аргоне: а – 2 мин Al и 1 мин Ti; б – 3 мин Al и 1 мин Ti; в – 4 мин Al и 1 мин Ti; г – 3 мин Al и 3 мин Ti; $f = 1000$ Гц; $\tau = 300$ мкс.

С помощью микрорентгеноспектрального анализа было установлено, что химический состав участков комбинированных покрытий на разных расстояниях от поверхности образцов различается в зависимости от продолжительности осаждения слоев алюминия и титана (рис. 11). В случае, когда первый слой алюминия наносился в течение двух минут, а затем следующий слой титана за одну минуту, среднее отношение атомных концентраций Al и Ti в покрытии было близко к 0.5, т.е. количество титана было больше по сравнению с алюминием. При увеличении времени осаждения первого слоя из Al до четырех минут соотношение концентраций Al : Ti смешалось в сторону алюми-

ния и достигало 2.3, что указывало на преобладание соединений γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al. В приповерхностных слоях покрытия относительная концентрация алюминия незначительно понижалась из-за неполностью перемешанного второго слоя титана. Увеличение времени осаждения второго слоя титана приводило к закономерному снижению отношения атомных концентраций Al и Ti. Для случая нанесения и алюминия, и титана в течение трех минут оно было близко к единице. Следует также отметить, что при равных временах осаждения титана и алюминия (линии 1 и 4 на рис. 11) концентрация алюминия была выше у границы покрытие–подложка. Вероятно, это

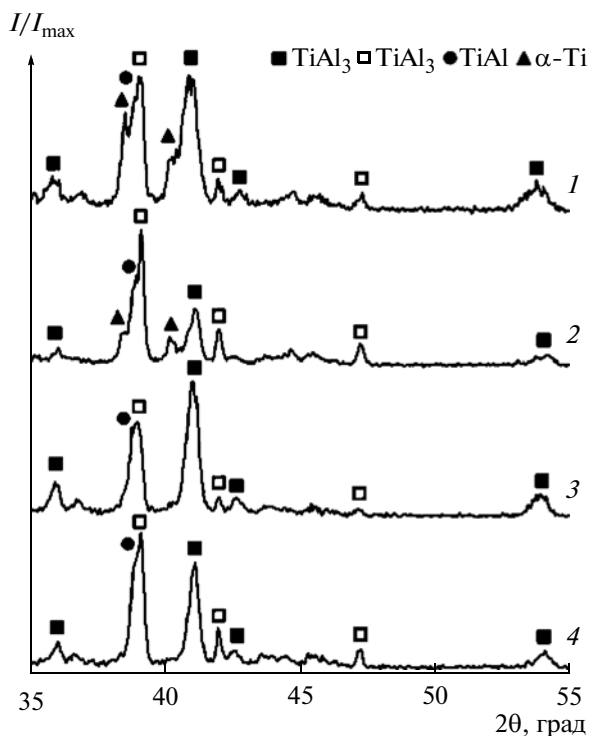


Рис. 9. Рентгеновские дифрактограммы комбинированных покрытий алюминия и титана на титановой подложке. Продолжительность нанесения первого слоя алюминия: 1 – 1 мин; 2 – 2 мин; 3 – 3 мин; 4 – 4 мин. Второй слой титана осаждался в течение 1 мин. Среда – аргон; $f = 1000$ Гц; $\tau = 300$ мкс.

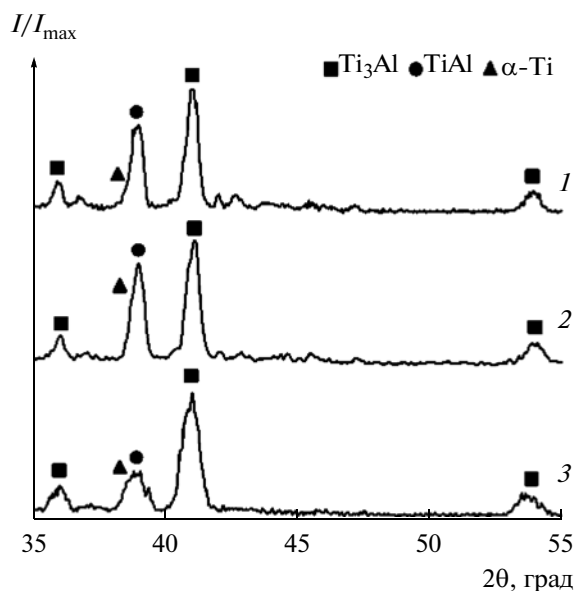


Рис. 10. Рентгеновские дифрактограммы комбинированных покрытий алюминия и титана на титановой подложке. Время осаждения первого слоя алюминия 3 мин. Продолжительность нанесения второго слоя титана: 1 – 1 мин; 2 – 2 мин; 3 – 3 мин; 4 – 4 мин. Среда – аргон; $f = 1000$ Гц; $\tau = 300$ мкс.

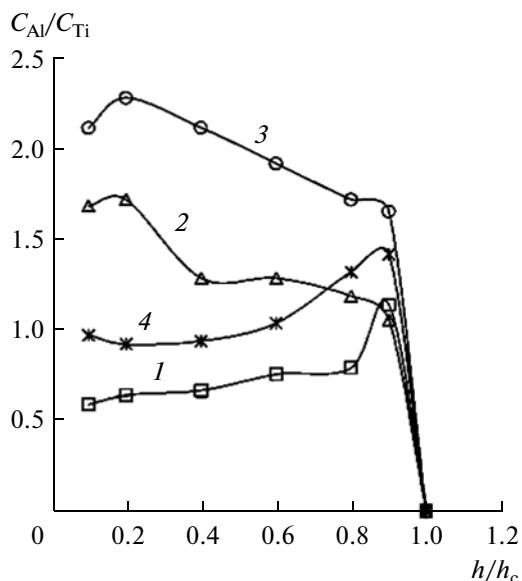


Рис. 11. Среднее значение отношения атомных концентраций алюминия и титана в зависимости от глубины, приведенной к толщине комбинированного покрытия h_c . Продолжительность нанесения металлов в аргоне: 1 – 2 мин Al и 1 мин Ti; 2 – 3 мин Al и 1 мин Ti; 3 – 4 мин Al и 1 мин Ti; 4 – 3 мин Al и 3 мин Ti; $f = 1000$ Гц; $\tau = 300$ мкс.

связано с недостатком времени нахождения титана и его малой подвижностью в расплавленном состоянии для полного преодоления предварительно осажденного слоя алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано формирование алюминидов титана в покрытиях, создаваемых методом электроискрового легирования. Установлено, что при осаждении титана на алюминий и алюминия на титан в аргоне, как правило, образуется α -TiAl. При легировании в воздухе дополнительно возникают нитрид титана и оксид алюминия. Толщина электроискровых покрытий ограничена в результате формирования хрупких фаз, накопления дефектов и разрушения поверхностного слоя под действием циклических термомеханических нагрузок. Длительность и частота разрядов оказывают влияние только на количественное соотношение между фазами. Интерметаллиды γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al можно получить, если поверх алюминиевого покрытия на титановой подложке осадить второй слой титана. Изменяя продолжительность электроискрового осаждения первого слоя алюминия и второго слоя титана, можно получить композиционное покрытие с преобладающей концентрацией одного из интерметаллидов системы титан–алюминий. Свойства получен-

ных интерметаллидных покрытий планируется исследовать в дальнейших работах.

Авторы выражают благодарность Метлицкой Л.П. (ИМ ХНЦ ДВО РАН) и Болоховцеву А.В. (Тихоокеанский государственный университет) за помощь в изготовлении и исследовании образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума ДВО РАН (проект 12-I-П8-02 “Физико-химические закономерности формирования ультрамелкодисперсных и наноструктурных композиционных материалов и покрытий на основе алюминидов титана и исследование их свойств”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bartolotta P.A., Krause D.L. // Proc. The Second Int. Symp. “Gamma Titanium Aluminides”. TMS. San Diego, California, 1999. P. 3.
2. Wu X. // Intermetallics. 2006. V. 14. P. 1114.
3. Leyens C., Peters M., Kaysser W.A. // Surf. Coat. Technol. 1997. V. 94–95. P. 34.
4. Hirose A., Ueda T., Kobayashi K.F. // Mater. Sci. Eng.: A. 1993. V. 160. Iss. 1. P. 143.
5. Ramos A.S., Calinas R., Vieira M.T. // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 200. P. 6196.
6. PalDey S., Deevi S.C., Alford T.L. // Intermetallics. 2004. V. 12. Iss. 7–9. P. 985.
7. Budilov V., Kireev R., Kamalov Z. // Mater. Sci. Eng.: A. 2004. V. 375–377. P. 656.
8. Kurzina I.A., Kozlov E.V., Sharkeev Yu.P. et al. // Surf. Coat. Technol. 2007. V. 201. P. 8463.
9. Setsuhara Y., Ohsako H., Makino Y., Miyake S. // Surf. Coat. Technol. 1994. V. 66. P. 495.
10. Божко И.А., Курзина И.А., Степанов И.Б., Шаркеев Ю.П. // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 4. С. 58.
11. Вахний Т.В., Вершинин Г.А., Божко И.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2008. № 4. С. 51.
12. Staron P., Bartels A., Brokmeier H.-G. et al. // Mater. Sci. Eng.: A. 2006. V. 416. P. 11.
13. Adachi S., Nakata K. // Surf. Coat. Technol. 2007. V. 201. P. 5617.
14. Guo B., Zhou J., Zhang S. et al. // Appl. Surf. Sci. 2007. V. 253. P. 9301.
15. Hirose A., Ueda T., Kobayashi K.F. // Mater. Sci. Eng.: A. 1993. V. 160. Iss. 1. P. 143.
16. Ротштейн В.П., Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 5. С. 72.
17. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 282 с.
18. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Kudryashov A.E. et al. // Surf. Coat. Technol. 2008. V. 202. P. 3715.
19. Ribalko A.V., Sahin O.A. // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 201. P. 1724.
20. Патент № 2429953 (Россия). Генератор импульсов технологического тока для электроискрового легирования / Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН. Николенко С.В., Ищенко С.Б. // Б.И. 2011. № 27.

Formation and Investigation of Electrosark Coatings Based on Titanium Aluminides

S. A. Pyachin, A. A. Burkov, V. S. Komarova

The coatings containing Ti–Al intermetallics were produced by electrosark deposition of titanium onto aluminium substrate and aluminium onto titanium one. The microstructure and composition of the coatings were investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and EDX analyses. It was determined that generally the surface layer formed in argon contained an intermetallic α -TiAl₃ not depending on the duration and frequency of discharge pulses. Phases of γ -TiAl and α_2 -Ti₃Al were produced at the deposition of aluminium onto titanium substrate with the subsequent deposition of the second titanium layer. Aluminium oxide and titanium nitride were formed in the coatings additionally at the electrosark deposition in air.