

ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНА АЛЮМИНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ*

*И.А. БАТАЕВ¹, канд. техн. наук, доцент
Д.В. ЛАЗУРЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент
М.Г. ГОЛКОВСКИЙ², канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
И.С. ЛАПТЕВ¹, аспирант
И.К. ЧАКИН², инженер-исследователь
И.С. ИВАНЧИК³, заведующий лабораторией
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск
³СГУВТ, г. Новосибирск)*

Поступила 16 декабря 2016
Рецензирование 17 января 2017
Принята к печати 15 февраля 2017

Батаев И.А. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: i.bataev@corp.nstu.ru

Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих алюминий, на плоских заготовках из технически чистого титана сформированы поверхностные слои, упрочненные интерметаллидами. Исследованы структура, микротвердость и триботехнические свойства поверхностно легированных материалов. Максимальный уровень микротвердости наплавленных покрытий составляет ~600 HV. Причины повышения твердости материалов обусловлены формированием алюминидов титана и проявлением механизма твердорастворного упрочнения титана. По сравнению с титаном ВТ1-0 полученные материалы характеризуются более низкими значениями коэффициента трения и меньшей склонностью к схватыванию при взаимодействии со стальным индентором. При испытаниях на трение о закрепленные частицы абразива значения относительной износостойкости тесно коррелируют с микротвердостью наплавленных материалов.

Ключевые слова: алюминид титана, электронно-лучевая наплавка, структура, свойства.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60

Введение

Алюминий является одним из наиболее важных легирующих элементов в титановых сплавах. По характеру влияния на титан этот элемент относится к α -стабилизаторам, т. е. к элементам, повышающим температуру полиморфного превращения. Факторы положительного влияния

алюминия в сплавах на основе титана связаны с увеличением растворимости водорода в α -фазе, снижением склонности к образованию гидрида титана TiH_2 и уменьшением опасности водородного охрупчивания. Присутствие алюминия в большинстве титановых сплавов в количестве от ~ 1,5 % до ~ 6,5 % (мас.) оказывает заметное упрочняющее влияние на материалы. Изменение

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-38-20776 мол_a_вед.

механических свойств в этих сплавах обусловлено твердорастворным механизмом упрочнения.

Если же содержание алюминия превышает 6,5 % (мас.), тогда наряду с фазой α -Ti в материалах формируется промежуточная фаза α_2 [1, 2]. В отличие от α -фазы соединение Ti_3Al характеризуется упорядоченным расположением атомов титана и алюминия. В соответствии с диаграммой состояния «Ti-Al» [1], представленной на рис. 1, при дальнейшем увеличении концентрации алюминия в анализируемых материалах формируется соединение $TiAl$, именуемое γ -фазой. Для обоих типов алюминидов характерны достаточно широкие области гомогенности.

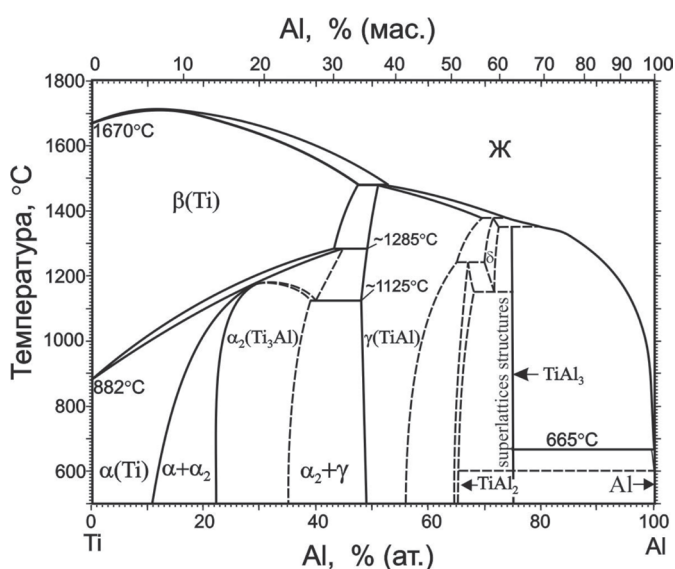


Рис. 1. Диаграмма состояния «Ti-Al» [1]

Алюминид титана Ti_3Al (α_2 -фаза), как и α -Ti, имеет гексагональную решетку, однако в отличие от альфа-титана характеризуется упорядоченным расположением атомов титана и алюминия. Это соединение относится к пространственной группе симметрии $R6_3/mmc$, структурному типу DO_{19} [3, 4]. Интерметаллид $TiAl$ (γ -фаза) обладает упорядоченной тетрагонально искаженной гранецентрированной структурой, относится к пространственной группе $R4/mmm$ и структурному типу $L1_0$ [4–6]. Расположение атомов в γ -фазе аналогично сверхструктуре $CuAu$. Кроме этих двух типов алюминидов в литературе отмечаются соединения, особенностью которых служат узкие области гомогенности – $TiAl_2$, $TiAl_3$. Зафиксированные экспериментально интерметаллиды типа Ti_5Al_3 , Ti_5Al_{11} , Ti_9Al_{23} являются метастабильными [4]. Возможности образования множества фаз, в том числе неустойчивых,

существенно осложняют анализ системы Ti-Al. Имеющиеся в современной литературе данные не позволяют делать однозначных выводов о структурных преобразованиях, происходящих при реализации различных технологических процессов обработки титан-алюминиевых сплавов.

Вопрос о возможности использования алюминидов титана в качестве конструкционных материалов обсуждается уже более полувека. Наиболее активно исследования этих материалов проводятся в последние 20–25 лет. Большой интерес к соединениям типа Ti_3Al и $TiAl$ обусловлен комплексом характерных для них свойств. Наиболее важными свойствами являются малая плотность и достаточно высокий уровень прочности, что особенно важно для авиастроения. По данным специалистов алюминиды титана могут быть конкурентоспособными по сравнению с жаропрочными сплавами, предназначенными для эксплуатации при температурах 600...800 °C [7]. Интерметаллические соединения на основе сплавов Ti-Al относят к материалам нового поколения – суперсплавам [4, 8].

Кроме комплекса достоинств, определяющих широкие перспективы промышленного применения алюминидов титана, эти материалы имеют ряд характерных недостатков. Один из наиболее значительных – это низкие показатели пластичности и трещиностойкости при температурах, близких к комнатной. Для решения этой проблемы предложены различные решения, большинство из которых основаны на введении в титано-алюминиевые сплавы дополнительных элементов, например хрома, марганца и ванадия [9, 10]. В то же время легирование позволяет улучшить высокотемпературные свойства алюминидов титана. Так, добавление ниобия, молибдена и тантала в интерметаллидные сплавы приводит к росту их жаростойкости и сопротивления ползучести [9, 10]. Предполагается, что комплекс свойств анализируемых сплавов, в том числе и показателей пластичности, может быть улучшен путем формирования структуры слоистого типа [11]. Дополнительные возможности обеспечивает технология искрового плазменного спекания [12].

Одним из технических решений, позволяющих рационально использовать возможности интерметаллидов, является формирование моди-

фицированных алюминиием поверхностных слоев на заготовках из титановых сплавов. Разработанные к настоящему времени технологические процессы позволяют получать интерметаллидные слои различной толщины [13–17]. В тех случаях, когда речь идет о необходимости формирования с высокой производительностью слоев повышенной толщины на титановых заготовках, наиболее отчетливо проявляются преимущества технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей [18]. Отличительная особенность этой технологии – возможность вывода концентрированного пучка электронов на воздух и обработка заготовок вне вакуумной камеры, что резко сокращает время, необходимое на установку и смену изделий.

Цель настоящей работы заключается в изучении структуры, микротвердости и триботехнических свойств поверхностных слоев, полученных путем наплавки алюминия на титановые заготовки с использованием электронного пучка, выведенного в воздушную атмосферу.

Материалы и методы исследования

Заготовками, на которых формировались поверхностно легированные слои, были пластины размерами 100×50×12 мм из технически чистого титана BT1-0 (0,16 % вес. Al; 0,009 вес. % C; 0,12 % вес. Fe; 0,007 % вес. Cr; 0,014 % вес. Ni; остальное – Ti). Функцию наплавляемых материалов выполняли порошковые смеси, в состав которых входили металлические компоненты и флюс (табл. 1). Присутствие флюса обеспечивало защиту нагретого до высоких температур материала, особенности расплава, от воздействия газов, находящихся в воздушной атмосфере. При выполнении всех технологических экспери-

ментов флюсом служило соединение LiF. Экспериментально установлено, что защита расплава является эффективной в тех случаях, если флюс составляет примерно половину от объема наплавляемой порошковой смеси.

Металлическими компонентами, которые вводились в порошковые смеси, служили алюминий и титан. С целью варьирования структурой и свойствами наплавляемых материалов было приготовлено пять типов порошковых смесей с различным соотношением титана и алюминия. Максимальное содержание титана в одной насыпке составляло 51 г, минимальное содержание алюминия – 5 г. Сплав, полученный при наплавке этой смеси, обозначен символами Ti-Al(51/5). Наибольшую весовую долю алюминия имел сплав Ti-Al (10/35) (см. табл. 1). Задача, связанная с расчетом содержания легирующих компонентов в поверхностно легированных слоях, не имеет однозначного решения. На конечный результат влияют такие факторы, как содержание алюминия и титана в исходной смеси, потеря исходных компонентов в процессе ускоренного нагрева порошков концентрированным электронным лучом, диффузионное взаимодействие компонентов, входящих в наплавочную смесь и основной металл, неоднородность перемешивания материала.

Наплавку порошковых материалов на титановые пластины осуществляли в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН на ускорителе электронов ЭЛВ-6. Схематически процесс представлен на рис. 2. В процессе обработки электронный луч, выведенный из ускорителя в воздушную атмосферу, воздействовал на порошковую смесь, которая была нанесена на титановую заготовку в количестве 0,45 г/см². Расстояние от выпускного отверстия до заготов-

Таблица 1

Состав порошковых смесей и содержание алюминия в наплавленном слое

Образец		Содержание элемента в исходной насыпке, г			Содержание алюминия в наплавленном слое, % (мас.)
Номер образца	Обозначение	Ti	Al	LiF	
1	Ti-Al(10/35)	10	35	55	59,3
2	Ti-Al(25/25)	25	25	50	40,0
3	Ti-Al(32/20)	32	20	48	29,4
4	Ti-Al(38/15)	38	15	47	23,7
5	Ti-Al(51/5)	51	5	44	6,7

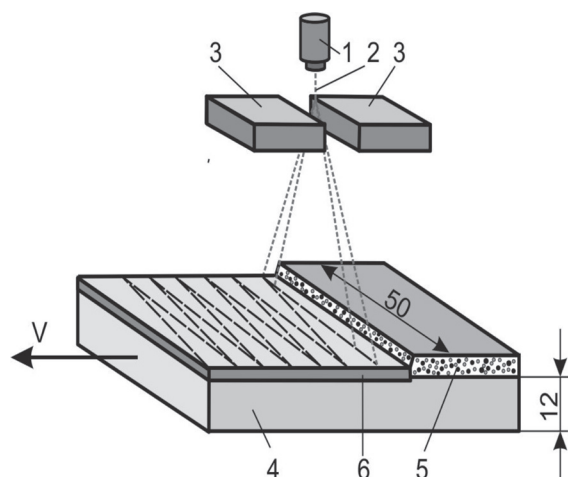


Рис. 2. Схема электронно-лучевой наплавки алюминиево-титановой смеси на заготовки из сплава ВТ1-0:

- 1 – выпускное отверстие; 2 – пучок электронов;
3 – полюсы электромагнитной развертки; 4 – титановая заготовка; 5 – наплавляемый порошок;
6 – наплавленный слой

ки с распределенной по ней порошковой смесью составляло 90 мм. В этих условиях диаметр пучка электронов на обрабатываемой поверхности равен 12 мм. С целью обработки заготовки по всей ее ширине осуществлялось сканирование луча с частотой 50 Гц. При наплавке всех порошковых материалов технологические режимы были одинаковы. Ток пучка составлял 18 мА, скорость перемещения заготовок относительно выпускного отверстия – 10 мм/с.

Основные задачи, поставленные при выполнении работы, предполагали проведение структурных исследований, определение микротвердости и оценку триботехнических свойств наплавленных материалов.

Строение наплавленных слоев в поперечных сечениях изучали с использованием растрового двухлучевого электронно-ионного микроскопа Cross Beam 1540 EsB (Carl Zeiss). Шлифы для исследований были подготовлены по стандартной технологии, включающей операции механического шлифования и полирования заготовок, предварительно запрессованных на установке Simplimet 1000 (Buehler) в полимерную матрицу. Для выявления структуры использовали химический травитель, состав которого состоял из 25 мл H_2O , 50 мл глицерина, 25 мл HNO_3 , 2 мл HF .

Тонкую структуру полученных материалов изучали с использованием просвечивающего электронного микроскопа Tescan 20 G2 TWIN (FEI). Объектами исследования были фольги, полученные с применением установок Dimple Grinder (Gatan) и Precision ion polishing system (Gatan). Для проведения рентгеноструктурного анализа поверхностно легированных слоев использовали дифрактометр ARL X'TRA. Съемку рентгенограмм выполняли при использовании $Cu K\alpha_{1,2}$ -излучения. Шаг сканирования составлял $0,05^\circ$, время накопления импульсов было равно 2 с на одну точку.

Для оценки твердости материалов использовали прибор 402MVD (Wolpert Group), оснащенный алмазной четырехгранной пирамидой. В качестве объектов исследования использовали поперечные шлифы. Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н. Отпечатки наносили перпендикулярно поверхности покрытия в направлении от поверхности к основному металлу.

Триботехнические свойства наплавленных материалов оценивали по величине коэффициента трения скольжения при реализации схемы «диск – плоскость», а также по уровню износостойкости в условиях воздействия закрепленных частиц абразива. В процессе первого из отмеченных видов испытаний диск диаметром 50 мм и толщиной 5 мм, изготовленный из стали твердостью 62 HRC, вращался со скоростью 200 об/мин и прижимался с усилием 850 Н к исследуемому образцу. Испытания были проведены в условиях сухого трения скольжения, а также при подаче в зону взаимодействия трущихся тел минерального моторного масла Лукойл Стандарт 10W-40 (SF/CC).

Исследования на износостойкость при взаимодействии закрепленных частиц абразива были проведены с учетом требований ГОСТ 17367–71. В соответствии со схемой испытаний, представленной на рис. 3, цилиндрический образец диаметром 2,5 мм с силой 8 Н прижимался к вращающемуся со скоростью 100 об/мин кругу с закрепленной на нем электрокорундовой шлифовальной шкуркой. Размер абразивных зерен, закрепленных на шкурке, находился в диапазоне от 63 до 80 мкм. Функцию эталонного материала выполняли образцы из технически чистого титана.

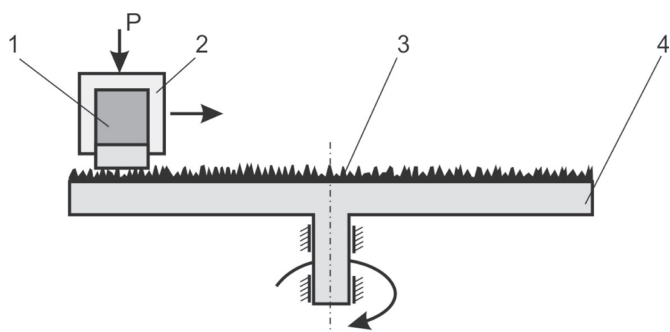


Рис. 3. Схема испытания материалов на изнашивание в условиях воздействия закрепленных частиц абразива:

1 – образец с покрытием; 2 – держатель образца; 3 – абразивная шкурка; 4 – стальной диск

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные данные, полученные методом рентгеноструктурного анализа, свидетельствуют о том, что за исключением сплава, обозначенного символом Ti-Al(51/5), основной структурной составляющей в остальных четырех сплавах, представленных в табл. 1, является алюминид титана типа Ti_3Al (рис. 4). В сплаве Ti-Al(51/5), соответствующем минимальному содержанию алюминия в исходном порошке, зафиксирована лишь α -фаза, представляющая собой твердый раствор алюминия в ГПУ решетке титана. Анализ дифрактограммы, полученной при исследовании сплава с максимальным содержанием алюминия (Ti-Al(10/35)), свидетельствует о присутствии в наплавленном слое алюминид титана $TiAl$.

Металлографический анализ показал, что при уменьшении содержания алюминия размер зёрен, выделившихся в процессе первичной кристаллизации, становится мельче. Примеры тонкого строения наплавленных слоев, зафиксированных с использованием растрового

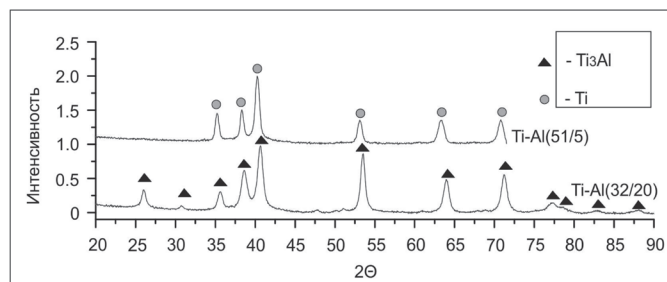


Рис. 4. Рентгенограммы, соответствующие образцам Ti-Al(51/5) и Ti-Al(32/20)

и просвечивающего электронных микроскопов, отражены на рис. 5. Характерной особенностью снимков, соответствующих наплавленным слоям с интерметаллидной структурой, является их пластинчатое строение (рис. 5, а, б).

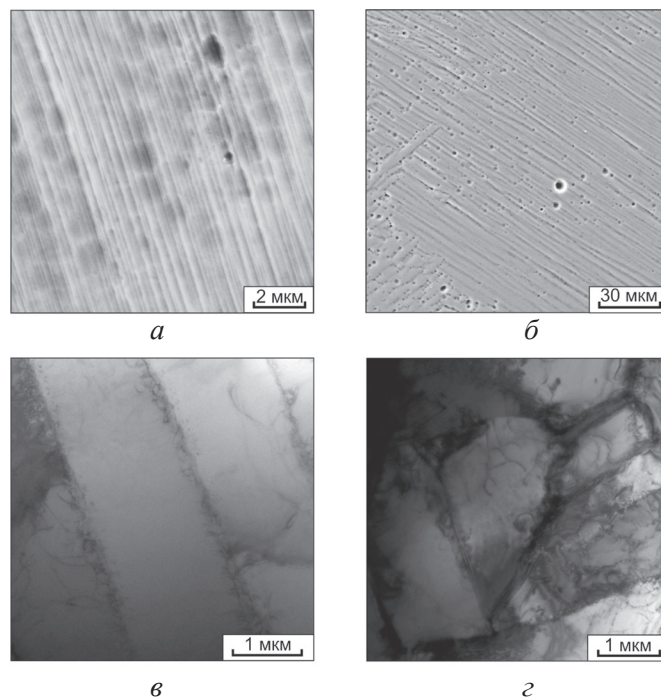


Рис. 5. Тонкое строение поверхностных слоев на образцах Ti-Al(10/35) (а, б); Ti-Al(25/25) (в); Ti-Al(51/5) (г)

Результаты металлографических исследований, а также данные, полученные при оценке микротвердости поверхностно легированных материалов, позволяют надежно зафиксировать глубину наплавленных слоев. Скачки твердости, наблюдаемые на рис. 6, соответствуют переходу от покрытий к основному металлу. Анализ экс-

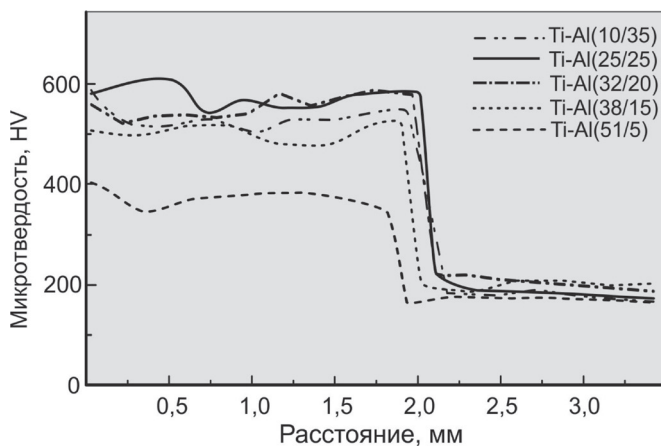


Рис. 6. Характер изменения микротвердости материалов после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков

периментальных данных свидетельствует о том, что толщина зон, подвергнутых переплаву электронным лучом, составляет примерно 2 мм.

Свойства поверхностных слоев зависят от содержания алюминия и титана в порошковой смеси, которые, в свою очередь, определяют фазовый состав наплавленных материалов. В исходном состоянии микротвердость титана BT1-0 составила ~ 200 HV. Легирование алюминием позволило резко повысить уровень его прочностных свойств. Максимальный уровень микротвердости (~ 540...610 HV) зафиксирован при изучении образцов Ti-Al (25/25) и Ti-Al (32/20). Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что такой уровень свойств обеспечивается присутствием в сплавах алюминидов титана Ti_3Al . Микротвердость сплава Ti-Al (51/5), структуру которого представляет твердый раствор алюминия в решетке α -титана, по сравнению с другими полученными в работе материалами минимальна (350-400 HV). Образцы типа Ti-Al(32/20) и Ti-Al(38/15) характеризуются как промежуточные между указанными значениями микротвердости.

На рис. 7 показаны результаты испытаний наплавленных материалов на износостойкость в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о наличии тесной корреляции между показателями относительной износостойкости и уровнем микротвердости

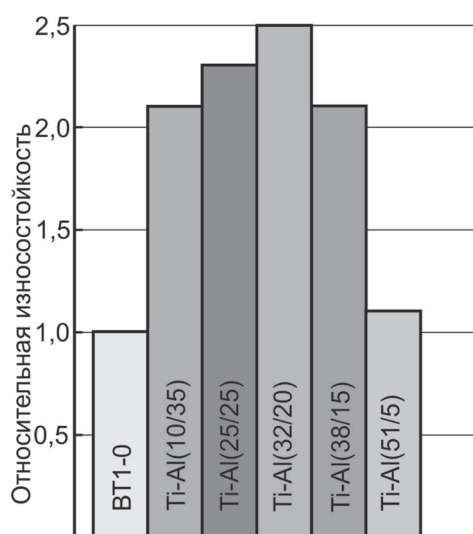


Рис. 7. Относительная износостойкость материалов в условиях трения о закрепленные частицы абразива

анализируемых материалов. Наиболее твердые материалы Ti-Al(25/25) и Ti-Al(32/20) характеризуются максимальной износостойкостью. Относительная износостойкость этих сплавов примерно в 2,5 раза выше по сравнению с технически чистым титаном BT1-0. Минимальный уровень износостойкости зафиксирован при испытаниях образца Ti-Al(51/5), характеризующегося структурой α -Ti и наиболее низкими значениями твердости.

Одним из качеств, характерных для титана и ограничивающих его применение как материала конструкционного назначения, является высокий уровень коэффициента трения в условиях трения скольжения. В соответствии с экспериментальными данными даже в присутствии смазки коэффициент трения образцов из сплава BT1-0 составляет 0,32...0,36. Проведенные триботехнические испытания свидетельствуют о существенном улучшении свойств сплавов, легированных алюминием. В табл. 2 приведены значения коэффициентов трения для четырех материалов при их испытаниях в присутствии смазки. Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что лучшими свойствами обладают образцы из сплава Ti-Al(10/35). По сравнению с технически чистым титаном коэффициент трения этого материала в 34 раза ниже.

Представленные в таблице количественные показатели антифрикционных свойств хорошо согласуются с данными, полученными при исследовании топографии изношенных в процессе трения образцов (рис. 8). Для поверхностей трения на образцах из титана BT1-0 характерны такие особенности, как присутствие глубоких бороздок, задиров, наплывов металла, каверн (рис. 8, а). Возникновение дефектов этого типа обусловлено малой толщиной окислов на титановых заготовках, проявлением эффекта микросварки в холодном состоянии, схватыванием взаимодействующих в процессе трения тел. Поверхности изнашивания образцов, легирован-

Таблица 2

Коэффициент трения материалов при испытаниях в присутствии смазки

Материал			
BT1-0	Ti-Al (10/35)	Ti-Al (25/25)	Ti-Al (32/20)
0,32...0,36	0,08...0,13	0,20...0,25	0,28...0,29

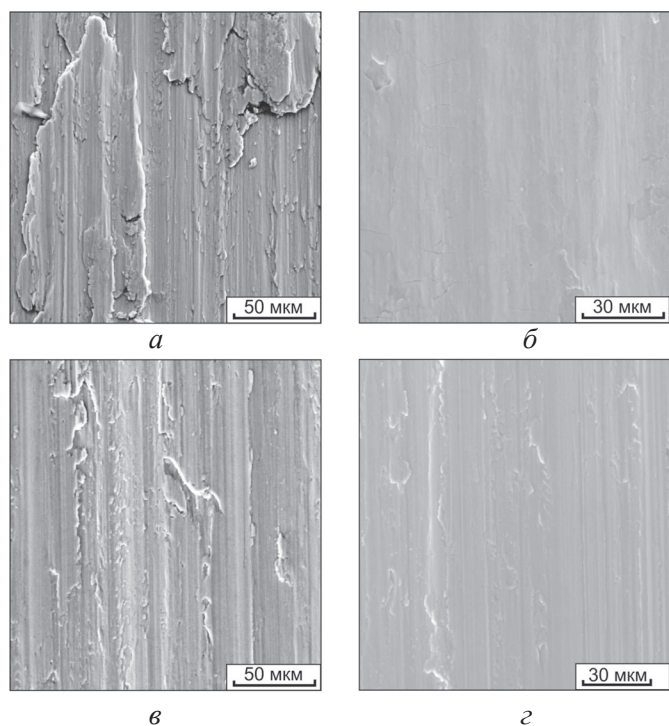


Рис. 8. Морфология поверхностей трения образцов:

а – титан VT1-0 без смазки; *б* – Ti-Al(32/20) со смазкой;
в – Ti-Al(10/35) без смазки; *г* – Ti-Al(10/35) со смазкой

ных алюминием, менее дефектны. Основным структурным фактором, определяющим улучшение триботехнических свойств титана в результате легирования его алюминием, считается присутствие в поверхностных слоях образцов алюминидов титана. Соединения Ti_3Al и $TiAl$, обладающие набором физических, химических и механических свойств, обеспечивают более высокий комплекс триботехнических характеристик, что делает эти материалы намного более предпочтительными по сравнению с титаном для изготовления конструктивных элементов, эксплуатация которых связана с процессами трения и изнашивания.

Заключение

Методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих алюминий, на плоских заготовках из технического чистого титана сформированы поверхностно упрочненные слои толщиной ~ 2 мм. Максимальный уровень микротвердости поверхностно легированных материалов достигает ~ 600 HV. Основным структурным фактором, обеспечивающим рост прочностных свойств материалов

наплавленных слоев, является формирование алюминидов титана Ti_3Al . В зависимости от содержания алюминия в исходной порошковой смеси и в поверхностных слоях фазами, образующимися в наплавленных материалах, являются твердый раствор алюминия в α -титане, α_2 -фаза (Ti_3Al) и γ -фаза ($TiAl$). Триботехнические свойства разработанных материалов существенно превышают аналогичные показатели сплава VT1-0. В условиях трения о закрепленные частицы абразива уровень относительной износостойкости наплавленных материалов коррелирует с их твердостью. При испытаниях по схеме трения скольжения лучшими свойствами обладают образцы из сплава Ti-Al(10/35). По сравнению с технически чистым титаном коэффициент трения этого материала в 3–4 раза ниже.

Список литературы

1. Murray J.L. The Al-Ti (aluminum-titanium) system // Phase Diagrams of Binary Titanium Alloy. – Materials Park, Ohio: ASM International, 1987. – P. 12–24. – ISBN 0871702487. – eISBN 9780871702487.
2. Schuster J.C., Palm M. Reassessment of the binary aluminum-titanium phase diagram // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2006. – Vol. 27, iss. 3. – P. 255–277. – doi: 10.1361/154770306X109809.
3. Mishin Y., Herzig Chr. Diffusion in the Ti-Al system // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48, iss. 3. – P. 589–623. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00400-0.
4. Кристаллогеометрические и кристаллохимические закономерности образования бинарных и тройных соединений на основе титана и никеля: монография / А.А. Клопотов, А.И. Потеев, Э.В. Козлов, Ю.И. Тюрин, К.П. Арефьев, Н.О. Солоницина, В.Д. Клопотов; под общ. ред. А.И. Потеева. – 2-е изд., стер. – М.: Флинта, 2011. – 312 с. – ISBN 978-5-9765-1214-6.
5. Sahu P. Lattice imperfections in intermetallic Ti-Al alloys: an X-Ray diffractions study of the microstructure by the Rietveld method // Intermetallics. – 2006. – Vol. 14. – P. 180–188. – doi: 10.1016/j.intermet.2005.05.004.
6. Frobel U., Appel F. Strain ageing in γ (TiAl)-based titanium aluminides due to antisite atoms // Acta Materialia. – 2002. – Vol. 50. – P. 3693–3707. – doi: 10.1016/S1359-6454(02)00182-9.
7. Иванов В.И., Ясинский К.К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti_3Al и $TiAl$ для работы при температурах 600–800 °С в авиакосмической технике // Технология легких сплавов. – 1996. – № 3. – С. 63–68.

8. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. В 2 кн.: пер. с англ. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. – М.: Металлургия, 1995.
9. Huang S.C. Alloying considerations in gamma-based alloys // The 1st International Symposium on Structural Intermetallics, Champion, PA, 26–30 September 1993: proceedings. – Champion, PA: TMS, 1993. – P. 299–308. – ISBN 0-87339-253-1.
10. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. Gammatitanium aluminide alloys: science and technology. – Weinheim: Wiley-VCH, 2011. – 745 p. – ISBN 9783527315253. – eISBN 9783527636204. – doi: 10.1002/9783527636204.
11. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: structure and transformation during heat treatment / D.V. Lazurenko, I.A. Bataev, V.I. Mali, A.A. Bataev, Iu.N. Maliutina, V.S. Lozhkin, M.A. Esikov, A.M.J. Jorge // Materials & Design. – 2016. – Vol. 102. – P. 122–130. – doi: 10.1016/j.matdes.2016.04.037.
12. Metal-intermetallic laminate Ti-Al₃Ti composites produced by spark plasma sintering of titanium and aluminum foils enclosed in titanium shells / D. Lazurenko, V. Mali, I. Bataev, A. Thoemmes, A. Bataev, A. Popelukh, A. Anisimov, N. Belousova // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46, iss. 9. – P. 4326–4334. – doi: 10.1007/s11661-015-3002-5.
13. Miyake M., Tajikara S., Hirato T. Fabrication of TiAl₃ coating on TiAl-based alloy by Al electrodeposition from dimethylsulfone bath and subsequent annealing // Surface and Coatings Technology. – 2011. – Vol. 205, iss. 21–25. – P. 5141–5146. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.019.
14. Parlikar C., Alam M.Z., Das D.K. Effect of Al₃Ti diffusion aluminide coating on tensile properties of a near α -Ti alloy // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 530. – P. 565–573. – doi: 10.1016/j.msea.2011.10.021.
15. Leyens C., Peters M., Kaysser W.A. Intermetallic Ti-Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol. 94–95. – P. 34–40. – doi: 10.1016/S0257-8972(97)00472-6.
16. In situ synthesis of titanium-aluminides in coating with supersonic free-jet pvd using ti and al nanoparticles / A. Yumoto, F. Hiroki, I. Shiota, N. Niwa // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 169–170. – P. 499–503. – doi: 10.1016/S0257-8972(03)00152-X.
17. Laser cladding of γ -TiAl intermetallic alloy on titanium alloy substrates / Iu.N. Maliutina, H. Si-Mohand, R. Piolet, F. Missemer, A.I. Popelyukh, N.S. Belousova, Ph. Bertrand // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2014. – Vol. 47, iss. 1. – P. 378–387. – doi: 10.1007/s11661-015-3205-9.
18. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum / M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kusanov, R.A. Salimov, V.A. Bataev // Materials science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 578. – P. 310–317. – doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (74), January – March 2017, Pages 51–60

Surface alloying of titanium with aluminium by non-vacuum electron beam cladding of powder mixtures

Bataev I.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: ivanbataev@ngs.ru

Lazurenko D.V.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: pavlyukova_87@mail.ru

Golkovski M.G.², Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, e-mail: mikhail.golkowsky@yandex.ru

Laptev I.S.¹, Ph.D. student, e-mail: ilya_laptev_nstu@mail.ru

Chakin I.K.², Research Engineer, e-mail: tchakin.ivan@yandex.ru

Ivanchik I.S.³, Head of Laboratory, e-mail: ivanchik.ilya@yandex.ru

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Budker Institute of Nuclear Physics, 11 akademika Lavrentieva prospect, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³Siberian State University of Water Transport, 33 Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

Abstract

Titanium aluminides are promising materials for structural and high temperature applications. They possess low density and a high strength level which are very important properties for the aircraft. However, they have a range of disadvantages. Among them, there are low plasticity and crack growth resistance. One of the solutions which allow making use of beneficial properties of intermetallics consists in the formation of intermetallic layers on the surface of metallic samples. In this study the method of non-vacuum electron beam cladding of powder mixtures consisted of aluminium and titanium was used to obtain the surface layers reinforced with intermetallics on cp-titanium workpieces. Microstructure, microhardness and tribological properties of surface alloyed materials were investigated. An average thickness of coatings was about 2 mm. The microstructure of coatings was characterized mainly by formation of lamellar crystals. The maximum microhardness level of the coatings was about 600 HV. The reasons of microhardness increase consisted in the formation of titanium aluminides and action of the solid solution hardening mechanism. Phase composition of different clads varied from γ -TiAl to α -Ti according to Al percentage in the powder mixture. In comparison with cp-titanium the obtained materials possessed a lower level of a friction coefficient and a lower tendency to adhesion at a contact with a steel indenter. The best results obtained in the process of a sliding friction test were obtained for the Ti-Al(10/35) sample. It possessed 3-4-fold decrease of a friction coefficient compared to pure titanium. Relative wear resistance values obtained during interaction of samples with fixed abrasive particles correlated with their microhardness.

Keywords

titanium aluminides; electron beam cladding; structure; properties.

DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60

References

1. Murray J.L. The Al-Ti (aluminum-titanium) system. *Phase Diagrams of Binary Titanium Alloy*. Materials Park, Ohio, ASM International, 1987, pp. 12–24. ISBN 0871702487. eISBN 9780871702487.
2. Schuster J.C., Palm M. Reassessment of the binary aluminum-titanium phase diagram. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2006, vol. 27, iss. 3, pp. 255–277. doi: 10.1361/154770306X109809
3. Mishin Y., Herzig Chr. Diffusion in the Ti-Al system. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 3, pp. 589–623. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00400-0
4. Klopotov A.A., Potekaev A.I., Kozlov E.V., Tyurin Yu.I., Aref'ev K.P., Solonitsina N.O., Klopotov V.D. *Kristallogeometricheskie i kristallokhimicheskie zakonomernosti obrazovaniya binarnykh i troinykh soedinenii na osnove titana i nikelya* [Crystal geometry and crystal pattern formation of binary and ternary titanium and nickel based compounds]. 2nd ed. Moscow, Flinta Publ., 2011. 312 p. ISBN 978-5-9765-1214-6.
5. Sahu P. Lattice imperfections in intermetallic Ti-Al alloys: an X-Ray dif-fractions study of the microstructure by the Rietveld method. *Intermetallics*, 2006, vol. 14, pp. 180–188. doi: 10.1016/j.intermet.2005.05.004
6. Frobel U., Appel F. Strain ageing in γ (TiAl)-based titanium aluminides due to antisite atoms. *Acta Materialia*, 2002, vol. 50, pp. 3693–3707. doi: 10.1016/S1359-6454(02)00182-9
7. Ivanov V.I., Yasinskii K.K. Effektivnost' primeneniya zharoprochnykh splavov na osnove intermetallidov Ti₃Al i TiAl dlya raboty pri temperaturakh 600–800 °C v aviakosmicheskoi tekhnike [The effectiveness of heat-resistance alloys based on Ti₃Al and TiAl intermetallics for operation at 600–800 °C in aerospace engineering]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of light alloys*, 1996, no. 3, pp. 63–68.
8. Sims Ch.T., Stoloff N.S., Hagel W.C., eds. *Superalloys II: heat-resistant materials for the aerospace and industrial power plants*. New York, Wiley, 1987 (Russ. ed.: *Supersplavy II: zharoprochnye materialy dlya aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok*. V 2 kn. Ed. by Ch.T. Sims, N.S. Stoloff, U.K. Khagel'. Moscow, Metallurgiya Publ., 1995).
9. Huang S.C. Alloying considerations in gamma-based alloys. *The 1st International Symposium on Structural Intermetallics: proceedings*, Champion, PA, 26–30 September 1993, pp. 299–308. ISBN 0-87339-253-1.
10. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. *Gamma titanium aluminide alloys: science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH, 2011. 745 p. ISBN 9783527315253. eISBN 9783527636204. doi: 10.1002/9783527636204
11. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Mali V.I., Bataev A.A., Maliutina Iu.N., Lozhkin V.S., Esikov M.A., Jorge A.M.J. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: structure and transformation during heat treatment. *Materials & Design*, 2016, vol. 102, pp. 122–130. doi: 10.1016/j.matdes.2016.04.037
12. Lazurenko D., Mali V., Bataev I., Thoemmes A., Bataev A., Popelukh A., Anisimov A., Belousova N. Metal-intermetallic laminate Ti-Al₃Ti composites produced by spark plasma sintering of titanium and aluminum

foils enclosed in titanium shells. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, iss. 9, pp. 4326–4334. doi: 10.1007/s11661-015-3002-5

13. Miyake M., Tajikara S., Hirato T. Fabrication of TiAl_3 coating on TiAl-based alloy by Al electrodeposition from dimethylsulfone bath and subsequent annealing. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, iss. 21–25, pp. 5141–5146. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.019

14. Parlikar C., Alam M.Z., Das D.K. Effect of Al_3Ti diffusion aluminide coating on tensile properties of a near α -Ti alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 530, pp. 565–573. doi: 10.1016/j.msea.2011.10.021

15. Leyens C., Peters M., Kaysser W.A. Intermetallic Ti-Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior. *Surface and Coatings Technology*, 1997. vol. 94–95, pp. 34–40. doi: 10.1016/S0257-8972(97)00472-6

16. Yumoto A., Hiroki F., Shiota I., Niwa N. In situ synthesis of titanium-aluminides in coating with supersonic free-jet pvd using ti and al nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 2003, vol. 169–170, pp. 499–503. doi: 10.1016/S0257-8972(03)00152-X

17. Maliutina Iu.N., Si-Mohand H., Piolet R., Missemmer F., Popelyukh A.I., Belousova N.S., Bertrand Ph. Laser cladding of γ -TiAl intermetallic alloy on titanium alloy substrates. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, vol. 47, iss. 1, pp. 378–387. doi: 10.1007/s11661-015-3205-9

18. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials science and Engineering: A*, 2013, vol. 578, pp. 310–317. doi: 10.1016/j.msea.2013.04.103

Funding

This work was supported by RFBR, research project No. 15-38-20776 mol_a_ved.

Article history

Received 16 December 2016

Revised 17 January 2017

Accepted 15 February 2017