

## **Особенности формирования интерметаллидного слоя при различных режимах сплавления титана и алюминия в атмосфере воздуха**

О. С. Савельева, М. М. Ворон<sup>\*</sup>, С. Н. Котляр<sup>\*\*</sup>, Д. А. Берест<sup>\*\*</sup>,  
Я. Н. Шаленый<sup>\*\*</sup>

Одесский национальный политехнический университет, Украина

<sup>\*</sup>Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
Киев, e-mail: Mihail.voron@gmail.com

<sup>\*\*</sup>НТУУ "Киевский политехнический институт"

*Рассмотрен способ получения слоистого композитного материала Ti—Al с интерметаллидной прослойкой сплавлением титана и алюминия в атмосфере воздуха. Изучены особенности формирования интерметаллидных прослоек различной толщины в зависимости от температурно-временных параметров технологии и применяемых флюсов на границе раздела металлов.*

**Ключевые слова:** титан, алюминий, слоистые композитные материалы, интерметаллиды системы Ti—Al.

### **Введение**

Создание новых слоистых и биметаллических композитных материалов приобретает всё большее значение в современных отраслях науки и техники. Применение таких материалов в основном связано с повышением технологичности и работоспособности ответственных узлов, которые имеют разные физические и механические свойства по своему сечению. Одной из главных проблем производства титан-алюминиевых слоистых композитных материалов является получение минимально необходимых толщин прослоек интерметаллидов. К примеру, для получения толщины интерметаллидной прослойки 50—100 мкм необходима продолжительность термообработки в десятки часов [1].

В качестве первоочередной операции соединения алюминия с титаном часто применяют сварку взрывом, горячую прокатку или жидкофазное спекание. Такие методы позволяют частично удалить оксидные пленки в местах контакта металлов и обеспечить условия для образования интерметаллидов [2]. Дальнейшая температурно-временная обработка композита, в том числе с плавлением алюминия, отвечает за размеры интерметаллидных частиц, толщину и морфологию пограничного слоя и другие структурно-фазовые особенности [2—4].

Цель данной работы — установить принципиальную возможность получения слоистых интерметаллидных композитов при взаимодействии титана и жидкого алюминия в атмосфере воздуха, что является перспективным с точки зрения простоты технологии и ее стоимости в целом.

### Экспериментальная часть

Для опытов использовали технически чистый титан марки BT1-0 и алюминий марки А5. Титановые пластинки размерами 40×60×3 мм размещали в графитовых лотках и загружали в печь сопротивления. Одни лотки заполняли кусками алюминия поверх титана, которые со временем постепенно оплавливались, закрывая титан, а в других — нагретый титан заливали уже расплавленным алюминием. Лотки с образцами выдерживали разное время при разных температурах. В некоторых из них применяли флюсы для разрушения оксидных пленок на границе контакта титана с алюминием.

Первую загрузку проводили без флюса для оценки степени разрушения и движения оксидных пленок без дополнительного воздействия. В остальных опытах в качестве флюса использовали буру. В одном из опытов, кроме связующего флюса, также применяли стандартную рафинирующую смесь NaCl и KCl. В этом случае титан был сильно протравлен плавиковой кислотой для получения на поверхности фторидов. Проведены опыты с использованием в качестве флюсов щелочи и флюса "арсал", но они приводили к образованию в алюминиевом слое очень больших пор со скоплениями оксидных пленок, ввиду чего не были отобраны для дальнейшего анализа. Все образцы после нагрева и выдержки остывали с печью со скоростью около 2—3 °С/мин

Полученные пластины с наплавками распиливали, после чего из центральных частей изготавливали образцы для приготовления микрошлифов по стандартной методике [5]. Шлифы травили раствором 2%-ных HF и HNO<sub>3</sub> в воде. Металлографический и локальный химический анализы фаз выполняли на растровом электронном микроскопе Selmi РЭМ-106U. Изображения получены отражением вторичных электронов.

В табл. 1 представлены параметры экспериментальных загрузок, а соответствующие номерам опытов структуры показаны на рис. 1. Как видно на микроструктурах, образец 1 имеет самые маленькие размеры глобоидных частиц интерметаллидов и самую непродолжительную зону их распространения. У этого образца также наблюдалось присутствие значительных площадей оксидной пленки алюминия недалеко от места контакта металлов, что обусловлено отсутствием флюсов. Образец 2 характеризуется распространением интерметаллидов от места контакта металлов до самого края алюминиевого слоя. Размер и плотность распределения этих частичек повышаются по мере отдаления от титана.

**Т а б л и ц а 1. Параметры экспериментов**

Номер опыта	Температура выдержки, °С	Время выдержки, мин	Флюс	Особенности
1	900	30	—	Алюминий внавалку
2	900	30	Бура	Алюминий внавалку
3	900	120	Бура	Заливка алюминия на разогретый титан
4	1000	60	Бура + NaCl + KCl	Заливка алюминия на холодный протравленный титан

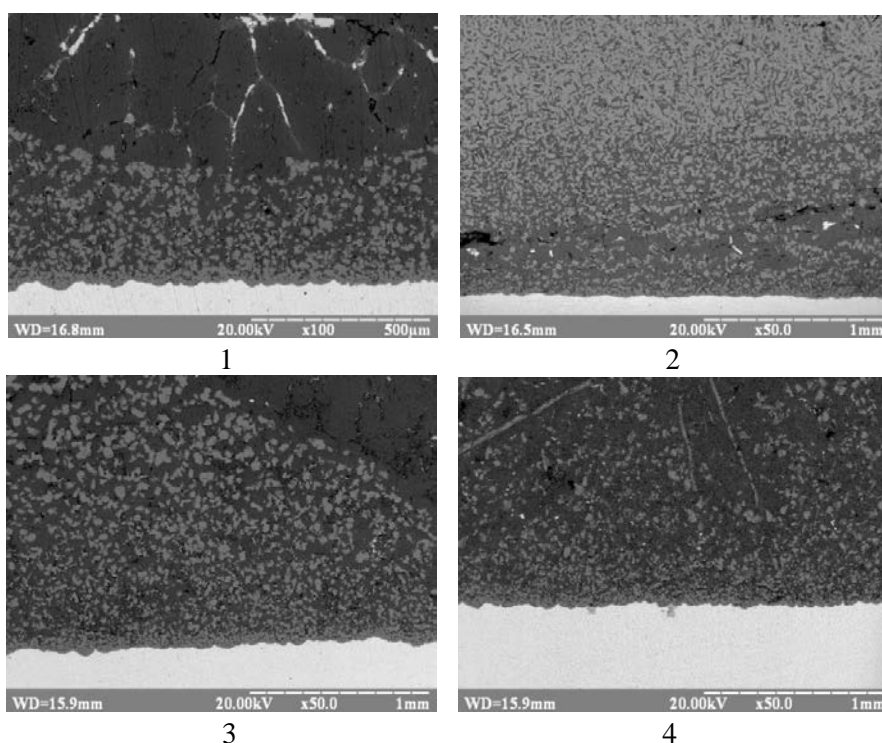


Рис. 1. Структуры полученных наплавки алюминия на титан соответственно номерам опытов. Снизу — титан, сверху — алюминий.

Присутствуют области массивных и малоподвижных оксидных пленок, которые препятствуют движению интерметаллидов. Образец 3 имеет наибольшие размеры отдельных глобидов и максимальную по сравнению с остальными образцами насыщенность пограничной зоны плотным слоем интерметаллидов. Образец 4 характеризуется наибольшей разнообразностью размеров интерметаллидной фазы, а также её формой — игольчатой. Этот образец имеет и наименьшее количество оксидных включений вблизи пограничной зоны.

Предварительная оценка результатов показала, что увеличение времени выдержки образцов приводит к росту интерметаллидных частиц, в том числе за счет слипания последних. При повышении температуры наблюдается образование интерметаллидной фазы игольчатой формы. Наличие оксидных пленок во всех случаях тормозит насыщение объема жидкого алюминия интерметаллидами.

Для определения химического состава фаз и переходных зон использовали локальный химический анализ, который показал, что алюминий практически не диффундирует в титан глубже нескольких микрон. Содержание титана в алюминии после кристаллизации последнего может достигать 1,6% (мас.), а алюминия в твердом титане — до 0,35% (мас.). Все интерметаллидные составляющие соответствовали фазе  $TiAl$  ( $\gamma$ -фаза).

На рис. 2 представлены структуры полученных образцов с большим увеличением и обозначены участки различного химического состава, данные которого приведены в табл. 2. Поскольку данные указывают на то, что с повышением температуры тормозящее действие оксидных

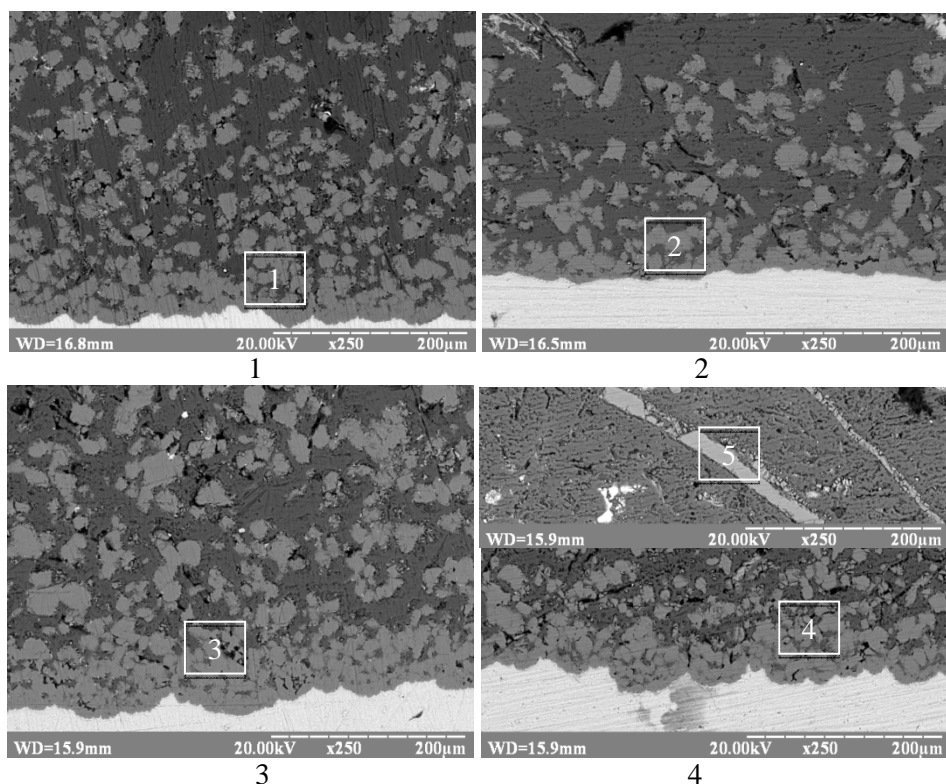


Рис. 2. Структуры и области разного химического состава опытных образцов.

**Т а б л и ц а 2. Химический состав структурных составляющих, выделенных на рис. 2**

Область	Ti, % (мас.)	Al, % (мас.)	Размер, мкм	Толщина сплошной переходной зоны, мкм
1	61	39	10—30	20—50
2	58	42	20—40	20—40
3	60	40	20—55	20—60
4	58	42	10—40	20—40
5	60	40	20×(500—2000)	—

включений уменьшается, а с возрастанием времени выдержки увеличивается толщина сплошной переходной зоны, проведен дополнительный эксперимент, состоящий из заливки алюминия на горячий титан с бурой и выдержки при 1000 °С 4 ч. Структура полученного образца показана на рис. 3.

Локальный химический анализ выявил наличие в пограничной зоне интерметаллидов  $TiAl_2$  и  $TiAl_3$  на удалении до 150 мкм от поверхности титана. Далее единственной интерметаллидной фазой остается только  $TiAl$ . Скопления оксидной пленки, видимой на рис 3, а, заметно ухудшили продвижение интерметаллидов вглубь алюминия. Свободные от оксидных пленок участки характеризуются глубиной распространения плотного интерметаллидного слоя вплоть до 3 мм.

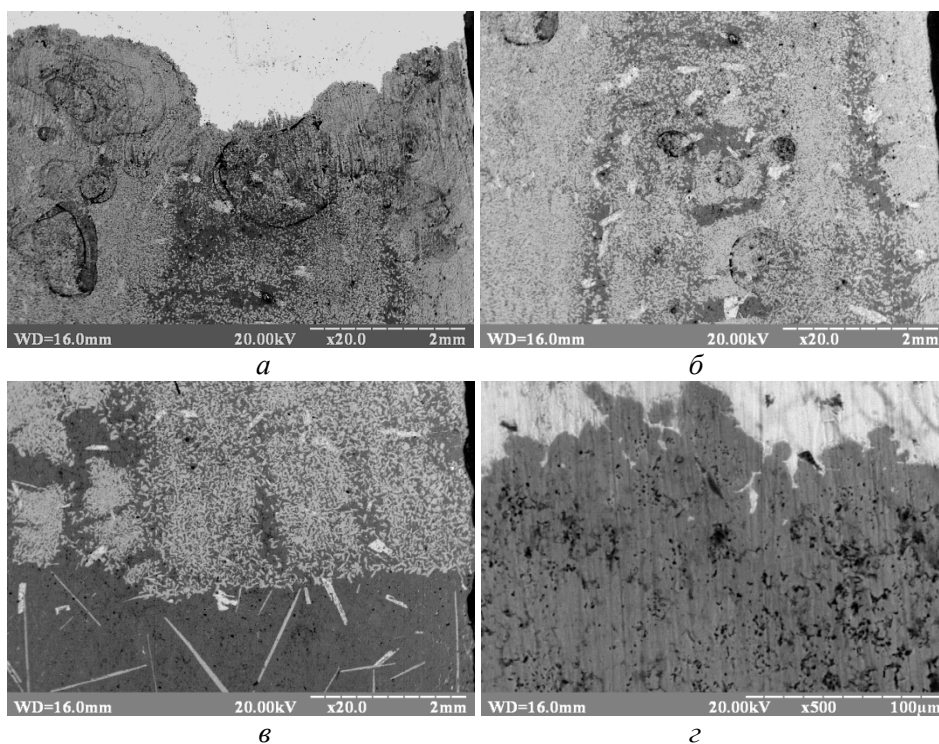


Рис. 3. Структура образца, полученного с выдержкой 4 ч при 1000 °С. Светлая область — титан: *a* — 2 мм от границы раздела; *б* — 2—4 мм; *в* — 4—8 мм; *з* — пограничная зона,  $\times 500$ .

### Выводы

На получение плотного интерметаллидного слоя в условиях предлагаемого метода наиболее сильно влияет наличие и подвижность оксидных пленок. Использование флюсов и подготовка поверхности титана являются главными факторами воздействия на оксидные пленки. Результаты, полученные с применением буры и буры со смесью солей, не особо отличаются степенью дробления и перемещения барьеров распространения интерметаллидов.

Влияние времени выдержки жидкого алюминия на титановой подложке на ширину и плотность пограничного интерметаллидного слоя более значительно, чем влияние температуры выдержки. При повышении температуры до 1000 °С наблюдаются скопления интерметаллидов в игольчатые конгломераты и меньшая плотность глобидов по мере отдаления от пограничной зоны между металлами.

Таким образом, можно утверждать, что получение слоистых интерметаллидных композитов наплавкой алюминия на титан в атмосфере воздуха является возможным, а сам способ представляется простым и эффективным. Для получения плотных и широких слоев интерметаллидов достаточно температуры 900 °С, а толщина слоя свыше 50 мкм возможна при выдержке всего в несколько часов.

1. Гуревич Л. М. Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия // Изв. Волгоградского национального техн. ун-та. — 2013. — 7, № 6 (109). — С. 7—13.

2. Гуревич Л. М. Структурообразование в титано-алюминиевых композитах в присутствии жидкой фазы / [Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, А. Н. Жоров и др.] // Журн. функциональных материалов. — 2008. — 2, № 4. — С. 153—157.
3. Mackowiak J. The nature and growth of interaction layers formed during the reaction between solid titanium and liquid aluminum / J. Mackowiak, L. L. Shreir // J. of the Less-common Metals. — 1959. — 1. — P. 459—466.
4. Harach D. J. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air / D. J. Harach, S. V. Kenneth // Metallurgical and Mater. Transactions A. — 2001. — 32A. — P. 1493—1505.
5. Беккерт М. Способы металлографического травления: (Справ. изд.); Пер. с нем. / М. Беккерт, Х. Клемм. — М. : Металлургия, 1988. — 400 с.

### **Особливості формування інтерметалідного шару при різних режимах сплавлення титану та алюмінію в атмосфері повітря**

О. С. Савельєва, М. М. Ворон, С. М. Котляр, Д. А. Берест, Я. М. Шалений

*Розглянуто спосіб отримання шаруватого композитного матеріалу Ti—Al з інтерметалічним шаром сплавленням титану й алюмінію в атмосфері повітря. Вивчено особливості формування інтерметалічних шарів різної товщини в залежності від температурно-часових параметрів технології й використаних флюсів на границі поділу металів.*

**Ключові слова:** титан, алюміній, шаруваті композитні матеріали, інтерметаліди системи Ti—Al.

### **Features of intermetallic layers formation, according to different modes of titanium and aluminum smelting in an air media**

O. S. Savelyeva, M. M. Voron, S. N. Kotlyar, D. A. Berest, Ya. N. Shalenyi

*The method of producing composite Ti—Al material with an intermetallic layer by smelting aluminum and titanium in an atmosphere of air is overviewed. The features of the different thicknesses layers formation, depending on the time-temperature parameters of technology and fluxes at the interface between metals are investigated.*

**Keywords:** titanium, aluminum, layered composite materials, Ti—Al intermetallic system.