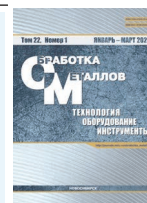




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Интерметаллидные покрытия Al_3Ti , сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки

Елена Корниенко^{1, а, *}, Анастасия Вялова^{1, б}, Владислав Шикалов^{2, в}, Владимир Косарев^{2, д},
Томила Видюк^{2, е}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

^а <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienkoe@gmail.com, ^б <https://orcid.org/0000-0003-2304-1166>, nastya13-29.98@mail.ru,

^в <http://orcid.org/0000-0002-0491-2803>, v.shikalov@gmail.com, ^д <https://orcid.org/0000-0001-8989-9646>, vkos@itam.nsc.ru,

^е <http://orcid.org/0000-0002-6819-8290>, vidyuk@itam.nsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.044

История статьи:

Поступила: 18 ноября 2019

Рецензирование: 16 декабря 2019

Принята к печати: 20 января 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2020

Ключевые слова:

Холодное газодинамическое

напыление

Термическая обработка

Покрyтия

Интерметаллид

Алюминид титана

Ti-Al

$TiAl_3$

Финансирование

Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А19-119051590004-5)

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ССМ НГТУ и ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН)

АННОТАЦИЯ

Введение. Титановые сплавы широко используются в аэрокосмической, морской и биомедицинской промышленности благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. К сожалению, они также характеризуются низкой стойкостью к окислению и низкой износостойкостью. Эффективным решением этой проблемы является формирование износостойких и жаростойких покрытий на поверхности титановых заготовок. **Цель работы:** исследовать влияние параметров термической обработки на формирование алюминид титана из двухслойных покрытий системы Ti-Al, полученных при помощи холодного газодинамического напыления. **Материалы и методики.** В настоящей работе на пластинах из титанового сплава марки ОТ4 формировали интерметаллидные покрытия типа Al_3Ti . Для этого при помощи технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) последовательно наносили слой титанового порошка марки ПТОМ-1 (Ti – основа, N < 0,08 %, C < 0,05 %, H < 0,4 %, Fe+Ni < 0,4 %, Si < 0,1 %, Cl < 0,004 %) и слой алюминиевого порошка марки АСД-1 А199.2 (Al > 99,7 %). Толщина каждого слоя составляла ~ 100 мкм. Образцы с покрытиями нагревали до температур 630, 640, 650 и 660 °C и выдерживали в печи 20, 120 и 300 мин (среда охлаждения – воздух). Структурные и фазовые исследования покрытий проводили с использованием световой микроскопии, растровой электронной микроскопии, рентгенофазового анализа. Приведены результаты измерений микротвердости. **Результаты.** Установлено, что интерметаллидная прослойка, сформировавшаяся на границе раздела между титановым и алюминиевым слоем, имеет химическую формулу Al_3Ti . Уровень микротвердости прослойки составляет ~ 600 HV. Показано, что толщина прослойки меняется в зависимости от режима термической обработки. Максимальную толщину (98,5 мкм) удалось сформировать после нагрева до 650 °C и выдержки 5 ч. Установлено, что увеличение времени выдержки оказывает большее влияние на рост толщины интерметаллида, чем увеличение температуры.

Для цитирования: Интерметаллидные покрытия Al_3Ti , сформированные при помощи холодного газодинамического напыления и термической обработки / Е.Е. Корниенко, А.Д. Вялова, В.С. Шикалов, В.Ф. Косарев, Т.М. Видюк // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 80–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89.

*Адрес для переписки

Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
 Новосибирский государственный технический университет
 пр. К. Маркса, 20,
 630073, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienkoe@gmail.com

Введение

Благодаря высокой удельной прочности, а также высокой коррозионной стойкости титановые сплавы широко используются в аэро-

космической, морской и биомедицинской промышленности [1, 2]. Однако несмотря на эти преимущества, сплавы на основе титана обладают низкой стойкостью к окислению (не более 600 °C) [2, 3] и низкой износостойкостью [4, 5], что ограничивает их применение в качестве высокотемпературных трибологических компонентов в двигателях внутреннего сгорания, например валов и лопаток газовых турбин. Эффективным решением указанной проблемы является формирование износостойких и жаростойких покрытий на поверхности титановых заготовок.

Известно, что титан активно взаимодействует со многими металлами и образует различные соединения с высоким уровнем механических свойств [6]. В настоящей работе использовали систему Ti–Al, которая позволяет получать интерметаллиды с химической формулой Al_3Ti . Отмечается, что данные интерметаллиды характеризуются низкой плотностью, высокой твердостью и жесткостью, а также стойкостью к окислению при высоких температурах [7, 8]. Благодаря этому такие покрытия можно применять для защиты деталей высокотемпературного использования [9].

В литературе достаточно широко рассмотрены особенности формирования, структура и свойства слоистых композиционных материалов системы Ti–Al, полученных из тонколистовых заготовок. В качестве основных способов получения многослойных материалов этой системы можно отметить диффузионную сварку и сварку взрывом с последующим отжигом на воздухе при температурах, близких к температуре плавления алюминия [10–12]. Формировать интерметаллидные покрытия из порошкового материала можно разными способами. Так, в работе [13] такого типа покрытия получают из порошка Al_3Ti на титановых подложках. Авторы работ [9, 14–17] наносят композиционные покрытия из смеси металлических порошков Ti и Al. Влияние параметров последующей термической обработки на особенности структуры таких покрытий отражено в работах [14, 18]. Авторы работы [19] методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки алюминиевого порошка формировали поверхностные интерметаллидные слои на заготовках из технического чистого титана. В настоящей работе описан процесс формирования интерметаллидного слоя

Al_3Ti , который осуществлялся в два этапа: предварительно наносили слой титанового и алюминиевого порошка, а затем проводили нагрев композиции для формирования интерметаллидного слоя. Для того чтобы взаимодействие титана и алюминия во время термической обработки протекало максимально эффективно, необходим плотный контакт поверхностей частиц, а также отсутствие оксидных пленок. Умеренная температура и высокая скорость напыления частиц при холодном газодинамическом напылении (ХГН) в полной мере удовлетворяют этим требованиям [20]. Стоит отметить, что несмотря на значительный интерес к покрытиям системы Ti–Al, особенности формирования интерметаллидов из слоистых порошковых покрытий с последующей термической обработкой изучены недостаточно. В настоящей работе исследовано влияние параметров термической обработки (температура нагрева и время выдержки) на формирование алюминидов титана из двухслойных покрытий системы Ti–Al, полученных при помощи холодного газодинамического напыления.

Методика экспериментального исследования

В качестве материалов для формирования слоистых покрытий использовали коммерческие порошки титана марки ПТОМ-1 (Ti – основа, N < 0,08 %, C < 0,05 %, H < 0,4 %, Fe + Ni < 0,4 %, Si < 0,1 %, Cl < 0,004 %) и алюминия марки АСД-1 Al99.2 (Al > 99,7 %). Средние размеры частиц порошков титана и алюминия составляли 17 и 30 мкм соответственно. На поверхность пластины из титанового сплава марки ОТ4 (Ti – основа, Al – 2 %, Mn – 1,4 %) размерами 50×50 мм и толщиной 5 мм наносили последовательно слои титанового и алюминиевого покрытия.

Напыление было выполнено в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН на ХГН-стенде, оснащенный шестиосевым роботом KUKA KR 16-2 (KUKA, Германия) для управления соплом. Ускорение частиц порошка осуществлялось в сопле Лаваля диаметром критического сечения 2,8 мм и диаметром выходного сечения 6,5 мм. В качестве рабочего газа использовали сжатый воздух с давлением торможения 2,7 МПа. При

напылении титанового порошка температура торможения была равна 770 К, скорость и шаг сканирования – 800 мм/с и 3 мм соответственно. При напылении алюминиевого порошка температура торможения составляла 570 К, скорость и шаг сканирования – 200 мм/с и 3 мм соответственно. В обоих случаях расстояние от среза сопла до преграды было равно 30 мм.

Затем из пластин с покрытиями вырезали образцы размером 10×10 мм, которые нагревали в лабораторных электрических печах камерного типа (СНОЛ-1,6.2,5.1/11-ИЗ) до температур 630, 640, 650 и 660 °С. Время выдержки составило 20, 120 и 300 мин, охлаждение проводили на воздухе.

Образцами для структурных исследований, а также измерений микротвердости являлись поперечные микрошлифы, подготовленные по стандартной методике: механическое шлифование – с использованием суспензий, содержащих частицы Al_2O_3 различной зернистости (9, 6, 3 и 1 мкм), и финишное полирование на сукне – с использованием коллоидного раствора оксида кремния зернистостью 0,04 мкм. Микроструктуру образцов исследовали с применением оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer Alm, а также растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Фазовый состав изучали на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA в $CuK\alpha$ излучении. Дифрактограммы регистриро-

вали в режиме времени $t = 3$ с и шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Для выявления фазового состава с каждого образца со стороны покрытия снимали слой толщиной 100 мкм (толщина алюминиевой прослойки). Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 10 г.

Результаты и их обсуждение

Общий вид образца с двухслойным покрытием Ti-Al представлен на рис. 1, а. Толщина каждого слоя составляла около 100 мкм. Границы раздела между основным металлом и титановым слоем, а также между прослойками Ti и Al плотные.

Измерения микротвердости проводили в направлении от края покрытия к основному металлу. Было зафиксировано резкое изменение микротвердости только при переходе из алюминиевого слоя в титановый (рис. 1, б). Средняя величина микротвердости алюминиевого слоя составляет 38,5 HV, титанового – 213 HV.

Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что непосредственно после холодного газодинамического напыления формируется качественное двухслойное покрытие, алюминидов титана в котором не обнаружено. Это обусловлено кратковременностью процессов теплового воздействия контактируемых поверхностей. Ранее было отмечено, что прак-

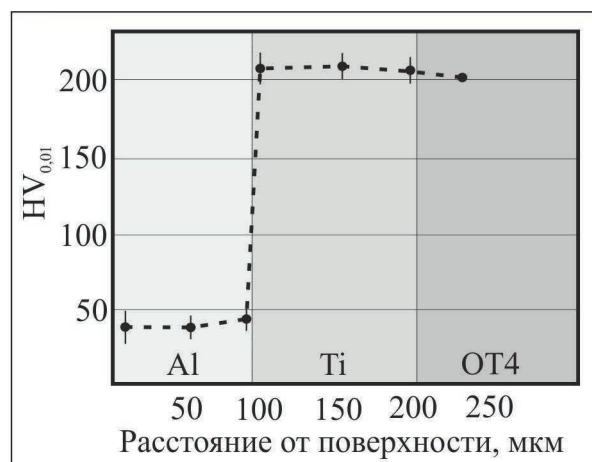
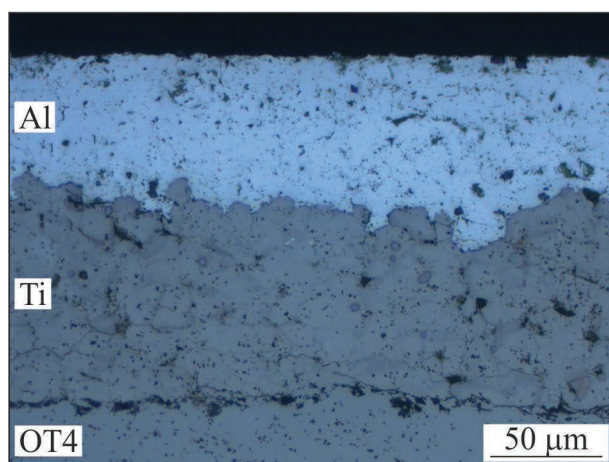


Рис. 1. Изображение двухслойного покрытия Ti-Al после холодного газодинамического напыления (а) и значения микротвердости (б)

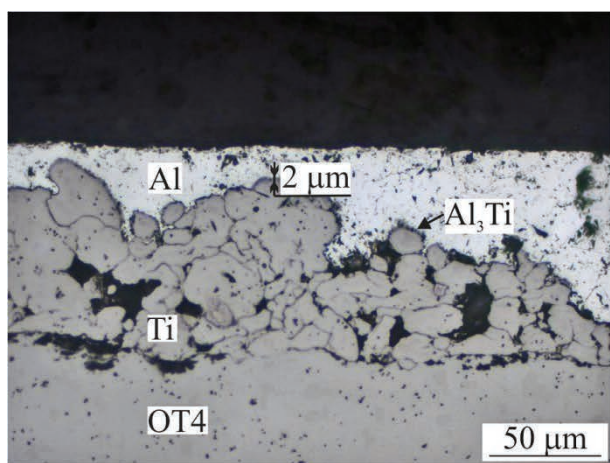
Fig. 1. The image of Ti-Al duplex coating after gas dynamic cold spray (a) and coating microhardness (b)

тическое значение имеют слоистые покрытия типа «металл – интерметаллид», толщина интерметаллидной прослойки в которых соизмерима либо превышает толщину металлического слоя. Известно, что образование алюминидов титана связано с протеканием диффузионных процессов, для активизации которых была проведена дополнительная термическая обработка покрытий.

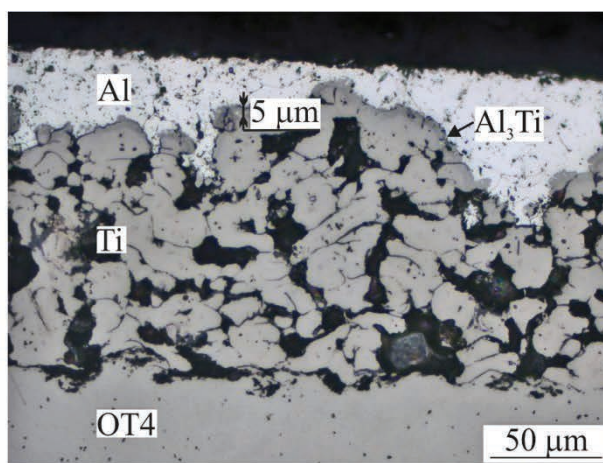
С целью формирования интерметаллидной прослойки исходные покрытия выдерживали 30 и 120 мин при 630 °С. Выбор этой температуры обусловлен тем, что алюминий еще не плавится,

но при этом скорость прохождения диффузионных процессов является близкой к максимальной в условиях твердофазной диффузии.

При нагреве на поверхности прилегающих друг к другу слоев алюминия и титана начинается диффузия, приводящая к образованию новой фазы. Посредством световой микроскопии выявлено, что уже после 30 мин выдержки толщина интерметаллидной прослойки на границе раздела достигает ~ 2 мкм (рис. 2, а). С увеличением времени выдержки до 2 ч средняя толщина прослойки возрастает и достигает ~ 5 мкм (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Двухслойное покрытие после нагрева до 630 °С и выдержки 30 мин (а) и 2 ч (б)

Fig. 2. Duplex coating after heating up to 630 °C and holding 30 min (a) and 2 h (b)

Повышение температуры до 660 °С (температура плавления алюминия) также способствует росту толщины слоя интерметаллида. На рис. 3, а показано, что выдержка в течение 30 мин при этой температуре позволяет сформировать слой толщиной до 5,6 мкм. Стоит отметить, что ширина сформированного слоя незначительно отличается от ширины слоя, сформированного при температуре 630 °С и выдержке 2 ч (рис. 2, б). Увеличение времени выдержки до 2 ч при 660 °С позволяет увеличить толщину прослойки в шесть раз (до 37 мкм (рис. 3, б)). Частицы титанового слоя, не вступившие в реакцию с алюминием, при нагреве окисляются по границам, и при подготовке микрошлифов выкрашиваются.

На рис. 4 представлено распределение химических элементов по линии, пересекающей сформировавшуюся прослойку и области прилегающих к ней алюминиевого и титанового слоев.

Видно, что содержание алюминия и титана в прослойке одинаково по всей ее длине. Можно предположить, что прослойка представляет собой интерметаллид алюминия и титана. Согласно данным микрорентгеноспектрального анализа (см. таблицу) атомное содержание алюминия, равное 71,89 %, свидетельствует об образовании интерметаллида Al_3Ti .

Согласно данным рентгенофазового анализа фаза Al_3Ti наблюдается в покрытиях уже после нагрева до 630 °С и выдержке 30 мин (рис. 5, б). С увеличением времени выдержки и температуры нагрева объемная доля интерметаллидной фазы увеличивается. Титана после нагрева до 660 °С и выдержки 2 ч в покрытии не наблюдается (рис. 5, д).

При проведении дюрометрических испытаний в направлении от верха покрытия к основному металлу установлено, что сформировавшаяся прослойка характеризуется максимальными

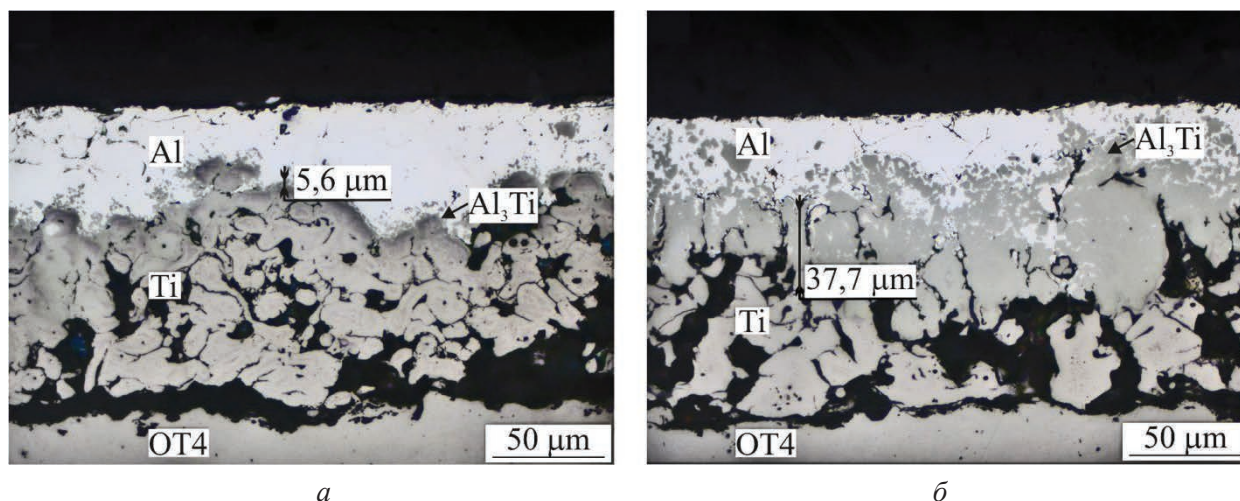


Рис. 3. Толщина интерметаллидной прослойки после нагрева до 660 °С и выдержки 30 мин (а) и 120 мин (б)

Fig. 3. Thickness of intermetallic layer after heating up to 660 °C and holding 30 min (a) and 120 min (b)

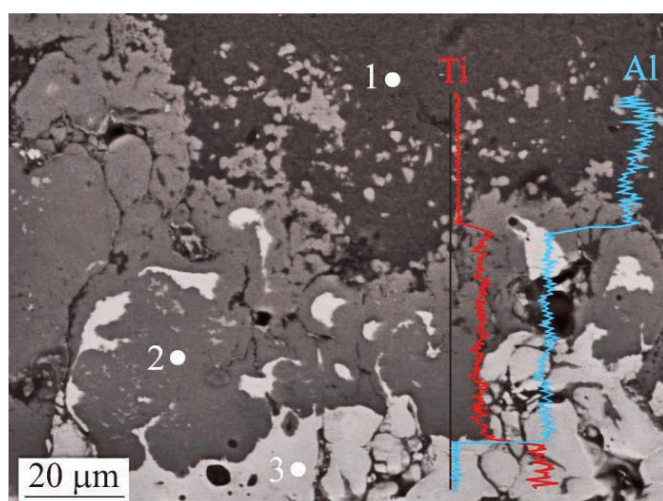


Рис. 4. Распределение химических элементов по линии. Режим термической обработки: температура нагрева – 660 °С, время выдержки – 2 ч

Fig. 4. The chemical elements distribution in the line. The heat treatment regime is heating 660 °C and holding 2 h

Данные микрорентгеноспектрального анализа The data of micro-X-ray spectral analysis

Спектр/ Spectrum	Химический элемент, ат. %/ Chemical element, at. %	
	Al	Ti
1	100	–
2	71,89	28,11
3	–	100

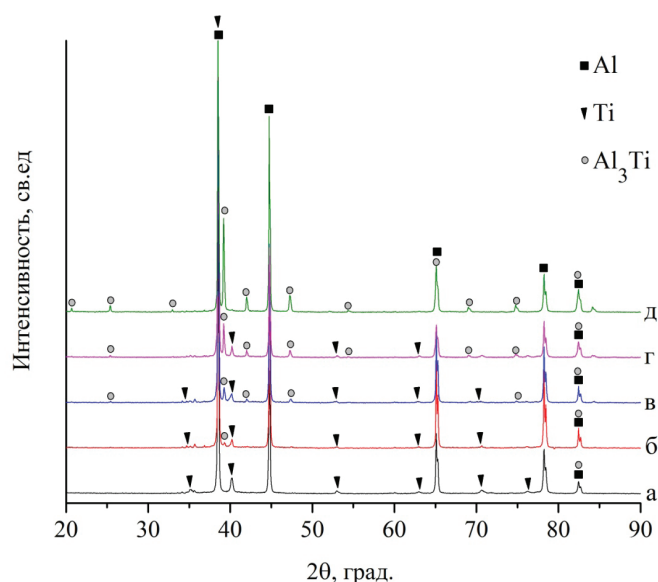


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ:

а – покрытие без термической обработки; б – 630 °С, 30 мин; в – 630 °С, 2 ч; г – 660 °С, 30 мин; д – 660 °С, 2 ч

Fig. 5. X-ray diffraction analyses:

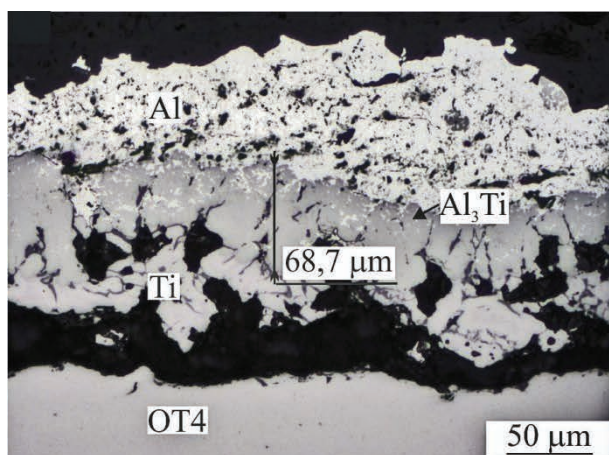
а – initial coating; б – 630 °C, 30 min; в – 630 °C, 2 h; г – 660 °C, 30 min; д – 660 °C, 2 h

значениями микротвердости (≈ 600 HV). Это намного выше, чем микротвердость алюминия и титана, и соответствует микротвердости интерметаллида Al₃Ti.

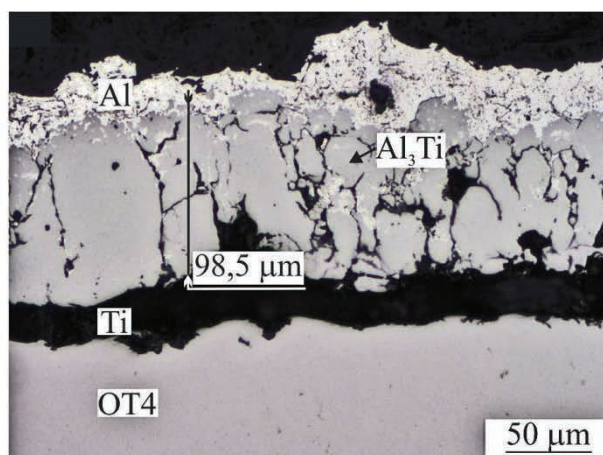
При выполнении работы образцы также нагревали до промежуточных температур 640 и 650 °С и выдерживали в течение двух и пяти часов. Выдержка в течение двух часов при этих

температурах способствует незначительному росту толщины интерметаллидной прослойки (по сравнению с температурой 630 °C) до ~ 6,3 и ~ 12,5 мкм соответственно. Увеличение времени

выдержки до пяти часов при этих же температурах привело к значительному росту толщины прослоек: до ~ 68,7 (рис. 6, а) и ~ 98,5 мкм (рис. 6, б) соответственно.



а



б

Рис. 6. Двухслойное покрытие после нагрева до 640 °C (а) и 650 °C (б) и выдержки 5 ч

Fig. 6. Duplex coating after heating up to 640 °C (a) and 650 °C (б) and holding 5 h

На рис. 7 представлена зависимость толщины интерметаллидной прослойки от режимов термической обработки. Видно, что отжиг в течение пяти часов образцов со слоистыми покрытиями Ti-Al, полученными холодным газодинамическим напылением, привел к формированию максимальной толщины интерметаллида. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод: увеличение времени выдержки оказывает большее влияние на рост толщины интерметаллида, чем температура.

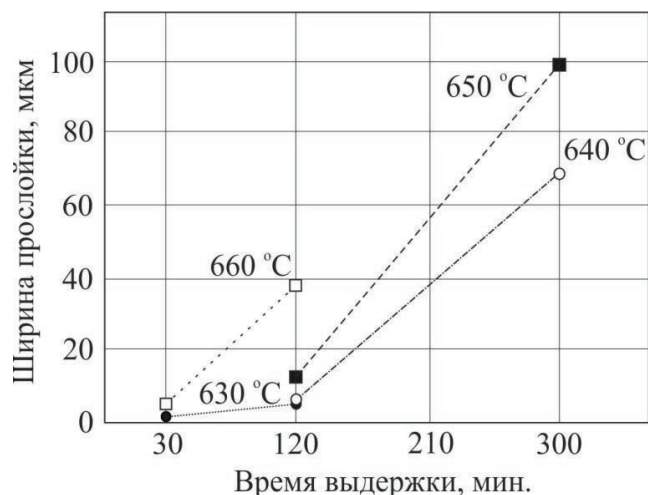


Рис. 7. Зависимость толщины интерметаллидной прослойки от режимов термической обработки

Fig. 7. Dependence of intermetallic layer thickness on heat treatment regimes

Выводы

1. Холодное газодинамическое напыление является эффективным технологическим процессом для формирования высококачественных слоистых покрытий типа «титан – алюминий». Границы раздела между основным металлом и титановым слоем, а также между прослойками Ti и Al плотные, без наличия оксидных пленок.

2. Методами микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализа установлено, что интерметаллидной прослойке, формирующейся на границе раздела между титановым и алюминиевым слоем, соответствует химическая формула Al_3Ti . Уровень микротвердости прослойки составляет ~ 600 HV.

3. Методом световой и растровой микроскопии показано, что толщина прослойки меняется в зависимости от режима термической обработки. Максимальную толщину прослойки (98,5 мкм) удалось сформировать после нагрева до 650 °C и выдержки в течение пяти часов.

4. Установлено, что увеличение времени выдержки оказывает большее влияние на рост толщины интерметаллида, чем увеличение температуры.

Список литературы

1. Valkov S., Bezduzhnyi R., Petrov P. Synthesis, structure and mechanical properties of Ti-Al-Nb coatings formed by electron beam additive technique // Vacuum.

2018. – Vol. 156. – P. 140–145. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.07.021.
2. *Chen C., Feng X., Shen Y.* Oxidation behavior of a high Si content Al–Si composite coating fabricated on Ti-6Al-4V substrate by mechanical alloying method // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 701. – P. 27–36. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.078.
3. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of Ti-Al-Nb coatings on a Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser surface alloying / J. Dai, S. Li, H. Zhang, H. Yu, C. Chen, Y. Li // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 344. – P. 479–488. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.060.
4. *Tavoosi M., Arjmand S.* In situ formation of Al/Al₃Ti composite coating on pure Ti surface by TIG surfacing process // *Surfaces and Interfaces*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.surfin.2017.04.002.
5. *Sitek R., Bolek T., Mizera J.* Microstructure and properties of Ti-Al intermetallic/Al₂O₃ layers produced on Ti6Al2Mo2Cr titanium alloy by PACVD method // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 437. – P. 19–27. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.169.
6. *Mitra R.* Structural intermetallics and intermetallic matrix composites. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 301 p. – ISBN 978-1-4665-1188-0.
7. Intermetallics research progress / Y.N. Berdovsky, ed. – New York: Nova Science Publishers, 2008. – 290 p. – ISBN 978-1600219825.
8. *Salehi M., Tahvilian A., Karimzadeh F.* Surface characteristics and tribological properties of Ti-Al intermetallic compound coatings on ferrous substrates // *Surface Engineering*. – 2002. – Vol. 18. – P. 368–372. – DOI: 10.1179/026708402225006231.
9. Formation of detonation coatings based on titanium aluminide alloys and aluminium titanate ceramic sprayed from mechanically alloyed powders Ti-Al / V.E. Oliker, V.L. Sirovatka, I.I. Timofeeva, T.Ya. Gridasova, Ye.F. Hrechyshkin // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 200, iss. 11. – P. 3573–3581. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.139.
10. The formation of TiAl₃ during heat treatment in explosively welded Ti-Al multilayers / F. Foadian, M. Soltanieh, M. Adely, M. Etminanbakhsh // *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 11, iss. 4. – P. 12–19.
11. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites / V. Mali, D. Lazurenko, I. Bataev, A. Bataev, A. Smirnov, P. Yartsev, V. Bazarkina // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 311. – P. 236–239. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.236.
12. *Chen Q., Li W., Yang R.* Investigation of growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coating on Al-Ti double-layer composite plate // *Materials (Basel)*. – 2019. – Vol. 12, iss. 2. – P. 272. – DOI: 10.3390/ma12020272.
13. Detonation spraying of Ti-Al intermetallics: phase and microstructure development of the coatings / D. Dudina, I. Batraev, V. Ulianitsky, N. Bulina, M. Korchagin, O. Lomovsky // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2014. – Vol. 30, iss. 6. – P. 724–729. – DOI: 10.1080/10426914.2014.984221.
14. Fabrication of TiAl intermetallic phases by heat treatment of warm sprayed metal precursors / J. Sienkiewicz, S. Kuroda, R.M. Molak, H. Murakami, H. Araki, S. Takamori, K.J. Kurzydłowski // *Intermetallics*. – 2014. – Vol. 49. – P. 57–64. – DOI: 10.1016/j.intermet.2013.12.011.
15. Cold-spray coatings: recent trends and future perspectives / P. Cavaliere, ed. – Cham: Springer, 2018. – 569 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-67183-3_14.
16. *Adachi S., Nakata K.* Study of bonding strength of plasma sprayed Ti-Al coating on mild steel substrate // *Plasma Processes and Polymers*. – 2007. – Vol. 4, iss. S1. – P. S512–S515. – DOI: 10.1002/ppap.200731217.
17. *Adachi S., Nakata K.* Improvement of adhesive strength of Ti-Al plasma sprayed coating // *Surface and Coating Technology*. – 2007. – Vol. 201, iss. 9–11. – P. 5617–5620. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.014.
18. Oxidation resistance and modification reaction mechanism of Al coating sprayed on pure Ti substrate / Q. Jia, D. Li, S. Guan, Z. Zhang, N. Zhang, W. Zhao // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 1403521. – DOI: 10.1155/2018/1403521.
19. Поверхностное легирование титана алюминием с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей / И.А. Батаев, Д.В. Лазуренко, М.Г. Голковский, И.С. Лаптев, И.К. Чакин, И.С. Иванчик // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. – № 1. – С. 51–60. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60.
20. Холодное газодинамическое напыление: теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клишков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. – М.: Физматлит, 2010. – 539 с. – ISBN 978-5-9221-1210-9.

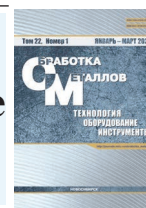
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Al₃Ti Intermetallic Coatings obtained with Help Gas Dynamic Cold Spray and Heat Treatment

Elena Kornienko^{1, a,*}, *Anastasiya Vyalova*^{1, b}, *Vladislav Shikalov*^{2, c}, *Vladimir Kosarev*^{2, d},
Tamila Vidyuk^{2, e}

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

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  kornienkoe@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-2304-1166>,  nastya13-29.98@mail.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-0491-2803>,  v.shikalov@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-8989-9646>,  vkos@itam.nsc.ru,

^e  <http://orcid.org/0000-0002-6819-8290>,  vidyuk@itam.nsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 November 2019

Revised: 16 December 2019

Accepted: 20 January 2020

Available online: 15 March 2020

Keywords:

Gas dynamic cold spray

Heat treatment

Coating

Intermetallic

Titanium aluminide

Ti-Al

TiAl₃

Funding

The research was partly carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences in 2013-2020 (project No. AAAA-A19-119051590004-5)

Acknowledgements

The research was conducted at NSTU Materials Research Center and with using the equipment of the Joint Access Center "Mechanics" of ITAM SB RAS.

ABSTRACT

Introduction. Titanium alloys are widely used in aerospace, marine and biomedical industries due to its high strength-to-weight ratio and corrosion resistance. Unfortunately, these alloys are also characterized by low oxidation resistance and low wear resistance. An effective solution of this problem is the formation of wear-resistant and heat-resistant coatings on the surface of titanium workpieces. **The work purpose** is to investigate the influence of heat treatment parameters on the formation of titanium aluminide from Ti-Al duplex coatings obtained by gas dynamic cold spray. **Materials and methods.** Al₃Ti intermetallic coatings were formed on plates made of titanium alloy (Ti – base, Al < 2.5 %, Mn < 1.5 %). A layer of titanium powder (Ti – base, N < 0.08 %, C < 0.05 %, H < 0.4 %, Fe + Ni < 0.4 %, Si < 0.1 %, Cl < 0.004 %) and a layer of aluminum powder (Al > 99.7 %) were applied on the substrate using the technology of gas dynamic cold spray. The thickness of each layer was ~ 100 μm. Then the samples with coatings were heated in different regimes (heat temperature was 630, 640, 650, and 660 °C; time holding was 20, 120, and 300 min; cooling medium was air). Structural and phase studies of coatings were carried out with using light microscopy, scanning electron microscopy, and X-ray phase analysis. The results of microhardness measurements are presented. **Results.** It is established that the intermetallic layer formed at the interface between the titanium and aluminum layers is Al₃Ti. The microhardness level of the intermetallic layer is ~ 600 HV. It is showed that the Al₃Ti layer thickness varies depending on the heat treatment regimes. The maximum thickness (98.5 μm) of intermetallic layer is observed after heating up to 650 °C and holding during 5 hours. It is established that an increase in the holding time has a greater effect on the increase in the thickness of the Al₃Ti than an increase in temperature.

For citation: Kornienko E.E., Vyalova A.D., Shikalov V.S., Kosarev V.F., Vidyuk T.M. Al₃Ti Intermetallic Coatings obtained with Help Gas Dynamic Cold Spray and Heat Treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 80–89. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-80-89. (In Russian).

* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienkoe@gmail.com

References

1. Valkov S., Bezdushnyi R., Petrov P. Synthesis, structure and mechanical properties of Ti-Al-Nb coatings formed by electron beam additive technique. *Vacuum*, 2018, vol. 156, pp. 140–145. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.07.021.
2. Chen C., Feng X., Shen Y. Oxidation behavior of a high Si content Al–Si composite coating fabricated on Ti-6Al-4V substrate by mechanical alloying method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 701, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.078.
3. Dai J., Li S., Zhang H., Yu H., Chen C., Li Y. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of Ti-Al-Nb coatings on a Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser surface alloying. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 344, pp. 479–488. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.060.
4. Tavoosi M., Arjmand S. In situ formation of Al/Al₃Ti composite coating on pure Ti surface by TIG surfacing process. *Surfaces and Interfaces*, 2017, vol. 8, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.surf.2017.04.002.
5. Sitek R., Bolek T., Mizera J. Microstructure and properties of Ti-Al intermetallic/Al₂O₃ layers produced on Ti6Al2Mo2Cr titanium alloy by PACVD method. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 437, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.12.169.
6. Mitra R. *Structural intermetallics and intermetallic matrix composites*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 301 p. ISBN 978-1-4665-1188-0.
7. Berdovsky Y.N., ed. *Intermetallics research progress*. New York, Nova Science Publishers, 2008. 290 p. ISBN 978-1600219825.
8. Salehi M., Tahvilian A., Karimzadeh F. Surface characteristics and tribological properties of Ti-Al intermetallic compound coatings on ferrous substrates. *Surface Engineering*, 2002, vol. 18, pp. 368–372. DOI: 10.1179/026708402225006231.
9. Olier V.E., Sirovatka V.L., Timofeeva I.I., Gridasova T.Ya, Hrechyshkin Ye.F. Formation of detonation coatings based on titanium aluminide alloys and aluminium titanate ceramic sprayed from mechanically alloyed powders Ti-Al. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, iss. 11, pp. 3573–3581. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.02.139.
10. Foadian F., Soltanieh M., Adely M., Etminanbakhsh M. The formation of TiAl₃ during heat treatment in explosively welded Ti-Al multilayers. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 11, iss. 4, pp. 12–19.
11. Mali V., Lazurenko D., Bataev I., Bataev A., Smirnov A., Yartsev P., Bazarkina V. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 311, pp. 236–239. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.236.
12. Chen Q., Li W., Yang R. Investigation of growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coating on Al-Ti double-layer composite plate. *Materials (Basel)*, 2019, vol. 12, iss. 2, p. 272. DOI: 10.3390/ma12020272.
13. Dudina D., Batraev I., Ulianitsky V., Bulina N., Korchagin M., Lomovsky O. Detonation spraying of Ti-Al intermetallics: phase and microstructure development of the coatings. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, vol. 30, iss. 6, pp. 724–729. DOI: 10.1080/10426914.2014.984221.
14. Sienkiewicz J., Kuroda S., Molak R.M., Murakami H., Araki H., Takamori S., Kurzydowski K.J. Fabrication of TiAl intermetallic phases by heat treatment of warm sprayed metal precursors. *Intermetallics*, 2014, vol. 49, pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.12.011.
15. Cavaliere P., ed. *Cold-spray coatings: recent trends and future perspectives*. Cham, Springer, 2018. 569 p. DOI: 10.1007/978-3-319-67183-3_14.
16. Adachi S., Nakata K. Study of bonding strength of plasma sprayed Ti-Al coating on mild steel substrate. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, vol. 4, iss. S1, pp. S512–S515. DOI: 10.1002/ppap.200731217.
17. Adachi S., Nakata K. Improvement of adhesive strength of Ti–Al plasma sprayed coating. *Surface and Coating Technology*, 2007, vol. 201, iss. 9–11, pp. 5617–5620. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.014.
18. Jia Q., Li D., Guan S., Zhang Z., Zhang N., Zhao W. Oxidation resistance and modification reaction mechanism of Al coating sprayed on pure Ti substrate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 2018, art. 1403521. DOI: 10.1155/2018/1403521.

19. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Golkovski M.G., Laptev I.S., Chakin I.K., Ivanchik I.S. Surface alloying of titanium with aluminium by non-vacuum electron beam cladding of power mixtures. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017, no. 1, pp. 51–60. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-51-60. (In Russian).

20. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. *Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie: teoriya i praktika* [Cold gas-dynamic spraying. Theory and practice]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 539 p. ISBN 978-5-9221-1210-9.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).