

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕХАНОСИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ Ti–Al–B

Институт проблем материаловедения НАН Украины, sirov@voliacable.com

Исследована износостойкость детонационных композиционных покрытий Ti–Al–B с разным структурным строением к абразивному изнашиванию. Установлено, что наиболее высокими показателями обладает покрытие со структурой из интерметаллидной матрицы с включениями твердых фаз в виде боридов титана и оксидов. Покрытие, основа микроструктуры которого представляет собой случайную двухфазную смесь из сравнительно мягких интерметаллидных и нитридных фаз, в которой твердая составляющая представлена только боридами, обладает наиболее низкой стойкостью к абразивному изнашиванию.

Введение. Во многих случаях работоспособность изделий определяется свойствами поверхности. Упрочняя поверхностный слой, удастся более чем на порядок повысить срок эксплуатации валов, подшипников, резцов и других изделий, подвергающихся интенсивному износу. Износостойкие покрытия распространены в аэрокосмической промышленности, атомной энергетике, автомобилестроении. Использование покрытий позволяет увеличить в несколько раз срок эксплуатации изделий, сэкономить дорогостоящие и дефицитные металлы.

Известно, что титан и его сплавы при работе в парах трения с металлами склонны к значительному адгезионному взаимодействию, сопровождаемому заеданием поверхностей трения. Одним из эффективных средств защиты изделий из титана и его сплавов от изнашивания при трении скольжения без смазки или в условиях ограниченной смазки является напыление износостойких покрытий. Средство химического состава основы и покрытия, как известно, во многих случаях создает хорошие условия для прочной адгезии между ними – одного из важнейших условий высокой работоспособности изделия. В этой связи

разработка титаносодержащих износостойких покрытий для деталей аэрокосмической техники, изготавливаемых из сплавов титана, является актуальной и перспективной [1–5].

Формирование структуры покрытий на основе алюминидов титана в виде композита, содержащего в алюминидной матрице включения высокомодульных и малопластичных тугоплавких твердых соединений (в частности карбидов), обеспечивает их повышенную стойкость к абразивному изнашиванию [6]. Чаще всего дисперсно-упрочняющая фаза вводится в исходную порошковую смесь для напыления в виде добавки. Имеется возможность получения порошков для напыления путем механического сплавления, которое осуществляется в науглероживающей среде. В этом случае возможно формирование покрытий с ультратонкими композиционными структурами, состоящими, например, из наноразмерных карбидных включений в интерметаллидной матрице.

Постановка задачи. Ранее в было показано [7; 8], что за счет применения активированных механическим сплавлением нанокompозитных порошков Ti–Al, Ti–Al–B и варьирование режимами взаимодействия их рабочей газовой средой в процессе детонационно-газового напыления можно формировать покрытия с кардинально различными фазовыми составами и структурами. Так, было установлено, что использование аргона для транспортирования порошка Ti-50%ат. Al-25%ат. В в зону горючей газовой смеси в процессе детонационного напыления приводит к формированию микрокомпозитного покрытия с интерметаллидной матрицей (Al_3Ti , $\gamma-TiAl$), в которой распределены включения боридов титана (TiB , TiB_2) с размером около 1,5 мкм, а среднее расстояние между ними ~ 5 мкм. Известно, что на ряду с экстремально высокой твердостью диборид титана характеризуется высокой химической стойкостью к различным агрессивным средам в широком интервале повышенных температур. При использовании воздуха при напылении в покрытие дополнительно к боридным фазам формируются включения твердых оксидов и оксинитридов. Использование азота приводит к формированию покрытия, основа микроструктуры которого представляет собой случайную двухфазную смесь из интерметаллидных и нитридных фаз TiN , AlN , которая содержит включения боридов, а также Al и Ti.

Целью данной работы является осуществить сравнительную оценку износостойкости покрытий, напыленных из порошка Ti-50% ат. Al-25% ат. В при различных режимах детонационно-газового метода. Среди достоинств этого метода следует отметить возможность формировать покрытия с минимальной пористостью, что во многих случаях является необходимым условием их успешной работы, в частности, при изнашивании в коррозионных средах.

Методы испытаний. Напыление покрытий осуществляли с помощью детонационно-газовой установки «Днепр-5МА», разработанной в ИПМ НАН Украины. Из механически сплавленного порошка Ti-50 % ат. Al-25% ат. В были напылены следующие покрытия: 1) с применением аргона – «Ti-Al-B» (Ar); 2) с применением воздуха «Ti-Al-B-O» (Air); 3) с применением азота – «Ti-Al-B-N» (N). Условия формирования покрытий приведены в работе [1]. Оценка стойкости к абразивному изнашиванию разработанных покрытий осуществляли путем сравнения с характеристиками коммерческого износостойкого покрытия марки КХН-35 (число указывает на содержание никеля, остальное – карбид хрома). В качестве среды, транспортирующей порошок в зону действия детонации при напылении, использовали аргон.

Распределение элементов в структуре исследовали с помощью микрорентгеноспектрального анализатора марки «САМЕВАХ SX-50» (Франция). Оптическая микроскопия осуществлялась с помощью прибора Jenaphot-2000 (Германия). Микротвердость измеряли по методу Виккерса (по величине диагонали остаточного пластического отпечатка). Абразивное изнашивание осуществлялось с помощью устройства, обеспечивающего взаимодействие поверхности покрытия с абразивными частицами, прижимаемыми к ней вращающимся резиновым роликом. Абразивные частицы карбида кремния размером 60–200 мкм подавали в зону контакта ролика с покрытием со скоростью 20 г/мин. Ролик имел диаметр 70 мм, ширину – 20 мм, частота его вращения – 125 об/мин, нагрузка $P=1,08$ МПа, путь трения – 274 м. Изнашивание оценивали по объёму снятого материала с покрытия.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Причина разного поведения покрытий, безусловно, связана с их фазовыми и

структурными отличиями. О различном характере разрушения покрытий можно судить по состоянию дорожек изнашивания (рис. 1). На микрофотографиях (рис. 1, *з*) видно, что покрытие КХН-35 имеет наиболее поврежденную поверхность. Можно заключить, что характер повреждений в этом случае состоит в «выламывании» структурных фрагментов. Механизм разрушения при этом можно представить следующим образом. В процессе взаимодействия с твердой абразивной частицей карбида кремния происходит вырезание мягкой никелевой составляющей из композиционной структуры покрытия, после чего растрескивается и удаляется хрупкая карбидная фаза.

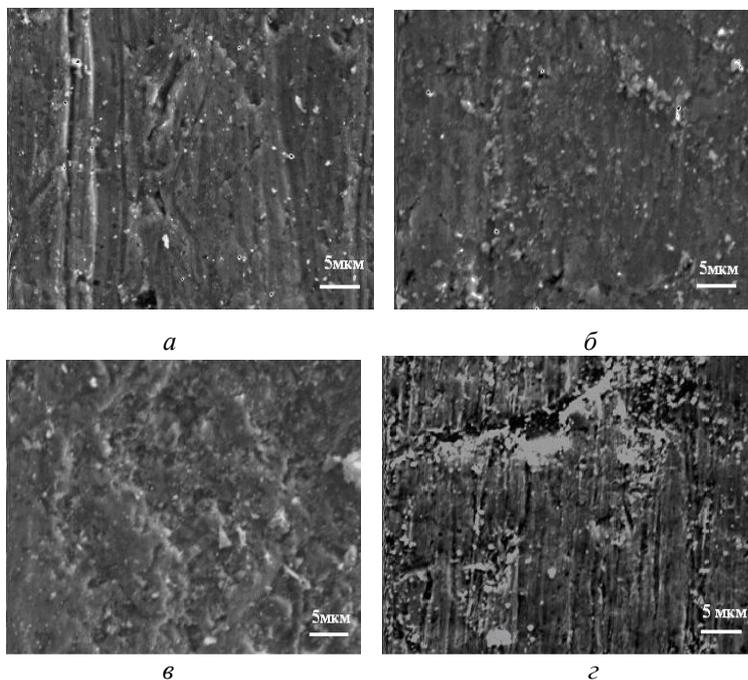


Рис. 1. Оптическая микрофотография поверхности после абразивного изнашивания покрытий, напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков:

а – Ti–Al–B(Ar); *б* – Ti–Al–B(Air); *в* – Ti–Al–B(N); *з* – КХН-35 (Ar)

Для самого «мягкого» и наименее пористого покрытия «N» (табл. 1) характерно «пластическое» изнашивание, при котором материал интенсивно удаляется с изнашиваемой поверхности

главным образом за счет истирания (рис.1, в). На поверхности этого покрытия наблюдаются следы от пластической деформации в виде канавок со сглаженным профилем. В результате зафиксирован максимальный съём материала с изнашиваемой поверхности (табл. 2).

Таблица 1

**Характеристики структуры детонационных покрытий
из порошка Ti-Al-B**

Газ, транспортирующий порошок в процессе напыления	Микротвердость HV, ГПа	Пористость, %
Азот (N)	3,456 ± 0,76	0,468 ± 0,29
Аргон (Ar)	4,483 ± 0,68	0,676 ± 0,32
Воздух (Air)	5,070 ± 0,78	6,158 ± 2,80

Таблица 2

**Объём удаленного материала при абразивном изнашивании
покрытий, напыленных с использованием различных газовых сред**

Покрытие	Объём удаленного материала ($V \cdot 10^{-3}$, см ³)
Ti-Al-B(Ar)	7,62
Ti-Al-B(N)	14,25
Ti-Al-B (Air)	2,71
KXH-35 (Ar)	6,44

Именно наличие в структуре металлических составляющих, а также сравнительно «мягкого» нитрида алюминия (табл. 3), можно объяснить такой важный для практического применения факт, что покрытие «N» характеризуется наименьшим значением микротвердости, несмотря на минимальную пористость по сравнению с покрытиями «Air» и «Ar». В отличие от рассматриваемого выше покрытия «N» на поверхности более твердого (см. табл. 1) и более пористого покрытия «Ar» образовались царапины с острым профилем (см. рисунок, а). Размер боридных включений в этом покрытии значительно меньше, чем размеры абразивных частиц, и потому они не в состоянии эффективно препятствовать процессу микрорезания.

Кроме того, на изнашивании сказываются сравнительно большие расстояния между включениями упрочняющей фазы. Наиболее высокой стойкостью к абразивному изнашиванию обладает наиболее твердое покрытие «Al₂O₃» (см. табл. 1), основа которого упрочнена по сравнению с покрытием «Al» дополнительным присутствием оксидов и оксинитридов. Поверхность этого покрытия выглядит наиболее «гладкой», а объём удаленного с нее материала минимальный. Оценивая механизмы разрушения сравниваемых покрытий, необходимо отметить, что характер абразивного изнашивания зависит от локальной нагрузки. Если нагрузка выше чем напряжение разрушения покрытия под сжимающим грузом, то механизм изнашивания является хрупким. В обратном случае имеем пластическое («податливое») изнашивание. Для второго типа изнашивания характерно постепенное и более интенсивное удаление материала с поверхности покрытия. Для обеспечения максимальной стойкости к абразивному изнашиванию необходимо минимизировать интервал между хрупким компонентами, который обеспечивал бы уменьшение области «податливых» компонентов.

В рассматриваемом случае к хрупким компонентам структуры могут быть отнесены оксиды, бориды и карбиды, характеризующиеся наиболее высокими значениями микротвердости (табл. 3). Преимущество покрытия с повышенным содержанием твердых и хрупких компонентов обеспечивается в определенном интервале нагрузок, при превышении которых наступает катастрофический износ.

Таблица 3

Микротвердость химических соединений

Соединение	H _ц , МПа	Лит. источник
Al ₂ O ₃	20700	[9]
TiN	20500	[9]
TiB ₂	34000	[10]
TiAl	5000	[4]
AlN	12000	[9]
TiB	27500	[10]

Пористость покрытия «Al₂O₃» на порядок выше по сравнению с другими сравниваемыми покрытиями и, тем не менее, «Al₂O₃»

характеризуется максимальной износостойкостью. Сравнивая размеры пор (максимальный размер не превышает 1–2 мкм) и абразивной частицы (минимальный размер около 80 мкм), можно сделать вывод, что отличия между ними настолько велики, что фактор пористости на характере изнашивания при выбранных условиях почти не сказался.

Выводы

Сравнительными исследованиями стойкости к абразивному изнашиванию детонационных композиционных покрытий на основе Ti–Al–B, Ti–Al–B–O и Ti–Al–B–N было установлено, что наиболее высокими показателями обладает покрытие со структурой из интерметаллидной матрицы с включениями твердых фаз в виде боридов титана и оксидов. Наиболее низкой стойкостью к абразивному изнашиванию обладает покрытие, основа микроструктуры которого представляет двухфазную смесь сравнительно мягких интерметаллидных и нитридных фаз, твердую составляющую которых составляет только бориды. Таким образом, вопрос обеспечения работоспособности титановых сплавов в различных машиностроительных конструкциях может быть успешно решен за счет применения покрытий из механически синтезированных порошков на основе системы Ti–Al–B. Предлагаемый детонационный метод напыления этих покрытий при его правильном применении обеспечивает хорошую адгезию получаемых покрытий, в чем легко убедиться, визуальное проанализировав представленные здесь покрытия, частично изношенные до основного материала потоком абразивных частиц. Переход от основы к покрытию носит плавный характер, отсутствует ступенька, что свидетельствует о высокой адгезионной прочности, способной удержать покрытие вплоть до его полного износа частицами.

Список литературы

1. Brady M.P., Brindley W.J., Smialec J.L., Lossi I.E. Oxidation and protection of γ titanium aluminides // JOM. – 1996. – November. – P.46-50.
2. Dimiduk D.M. Gamma titanium aluminide alloys – an assessment within the competition of aerospace structural materials // Mat. Sci. and Eng., A 262 (1999), 281–288.

3. *Gauthier V., Dettenwanger F., Schutze M.* Oxidation behaviour of γ -TiAl coated with zirconia thermal barriers // *Intermetallics* 10 (2002), 667–674.
4. *Oliker V.E., Kresanov V.S.* Scandium-containing gamma titanium aluminide alloys and coatings for aerospace structural parts // *Advanced materials and processes for gas turbines. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).*–2003. – p.293–300.
5. *Narita T., Izumi T., Nishimoto T., Shibata Y., Thosin K.Z., Hayashi S.* Advanced coatings on high temperature application // *Materials Science Forum* Vols. 522–523 (2006), p.1–14.
6. *Dewald D., Austin M., Laitila E. and Mikkola D.* Cubic Titanium Trialuminide Thermal Spray Coatings – A Review // *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 10 (1), March (2001). – p.111-117.
7. *Oliker 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* 200 (2006).– p.3573–3581.
8. *Оликер В.Е.* Влияние газовой среды на эволюцию структуры и фазового состава в процессе напыления детонационных покрытий из механохимически синтезированных порошков системы Ti-Al-B / Оликер В.Е, Сироватка В.Л., Гридасова Т.Я., Тимофеева И.И., Гречишкин Е.Ф., Яковлева М.С., Елисеева. Е.Н. // *Порошковая металлургия.* – 2009. – № 11/12. – С. 34–42.
9. *Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский и др.; Отв. Ред. И.М. Федорченко.* – Киев: Наук. Думка, 1985.– 624 с.
10. *Свойства, получение и применение тугоплавких соединений.* Справ. Изд. Под ред. Косолаповой Т.Я. – М.: Металлургия, 1986. – 628 с.

Ключевые слова: покрытия, структура, бориды, оксиды, интерметаллид, износ.

Сироватка В.Л. Зносостійкість детонаційних покриттів на основі механосинтезованих порошків системи Ti-Al-B // *Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб.* – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С.233–241.

Досліджено зносостійкість детонаційних композиційних покриттів Ti-Al-B з різною структурною будовою до абразивного зносу. Встановлено, що найбільш високі показники має покриття зі структурою з

інтерметалідної матриці з вкрапленнями твердих фаз у вигляді боридів титану та оксидів. Покриття, основа мікроструктури якого являє собою випадкову двофазну суміш з порівняно м'яких інтерметалідних фаз, у якій тверда складова містить тільки бориди, має найнижчий стійкість до абразивного зносу.

Рис. 1, табл. 3, список літ.: 10 найм.

Sirovatka V.L. **The studied wear-resistance of detonation coatings of composite Ti-Al-B with different structural structure to abrasion.**

Found that the highest rate of coatings has the structure of the intermetallic matrix with inclusions of solid phases in the form of borides of titanium oxides. The basis of the microstructure of coatings which is a random two-phase mixture of a relatively soft intermetallic and nitride phases in which the solid component is represented only borides has the lowest resistance to abrasion.

Стаття надійшла до редакції 21.04.10