

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $TiAl - TiB_2$

Институт проблем материаловедения НАН Украины, sirov@voliacable.com

Проведены сравнительные исследования поведения детонационных покрытий на основе $Ti-Al-B$, $Ti-Al-B-O$, $Ti-Al-B-N$ и покрытий из $AL153$, $KXH-35$ в условиях сухого трения в парах с различными материалами. Установлено, что наличие в структуре покрытий нитридов и оксидов улучшает характеристики трения при работе. Установлено, что наибольшей склонностью к схватыванию обладают пары, содержащие в своих составах одноименные металлы. Наиболее высокими показателями обладает покрытие со структурой из интерметаллидной матрицы с включениями твердых фаз в виде боридов титана и оксидов.

Введение. Наиболее эффективным средством защиты изделий из титана и его сплавов от изнашивания при работе в парах трения, работающих в условиях трения скольжения без смазки или ограниченной смазки, является разработка антифрикционных покрытий. Известно, что средство химических составов основы и покрытия во многих случаях создает хорошие условия для обеспечения между ними прочной адгезии – одного из важнейших условий высокой работоспособности изделия. В этой связи разработка титансодержащих износостойких антифрикционных покрытий для деталей аэрокосмической техники, изготавливаемых из сплавов титана, является актуальной и перспективной. Достижение благоприятных результатов при использовании таких покрытий можно ожидать и в медицине, в частности, в эндопротезных суставах.

Постановка задачи. За счет применения активированных механическим сплавлением нанокompозитных порошков $Ti-Al$, $Ti-Al-B$ и варьирования режимами взаимодействия их с рабочей газовой средой в процессе детонационного напыления можно

формировать покрытия с кардинально различными фазовыми составами и структурами [1; 2]. Было установлено, что использование аргона для транспортирования порошка на основе системы Ti–Al–B (рис. 1) в зону горючей газовой смеси в процессе детонационного напыления приводит к формированию микрокомпозитного покрытия с интерметаллидной матрицей и включениями боридов титана с размером около 1 мкм, среднее расстояние между ними – 5 мкм (рис. 2). При использовании воздуха при напылении в покрытия дополнительно к боридным фазам формируются твердые оксидные фазы типа $Ti_xAl_yO_z$. Использование азота приводит к формированию покрытия, содержащего нитридные, боридные и интерметаллидные фазы.

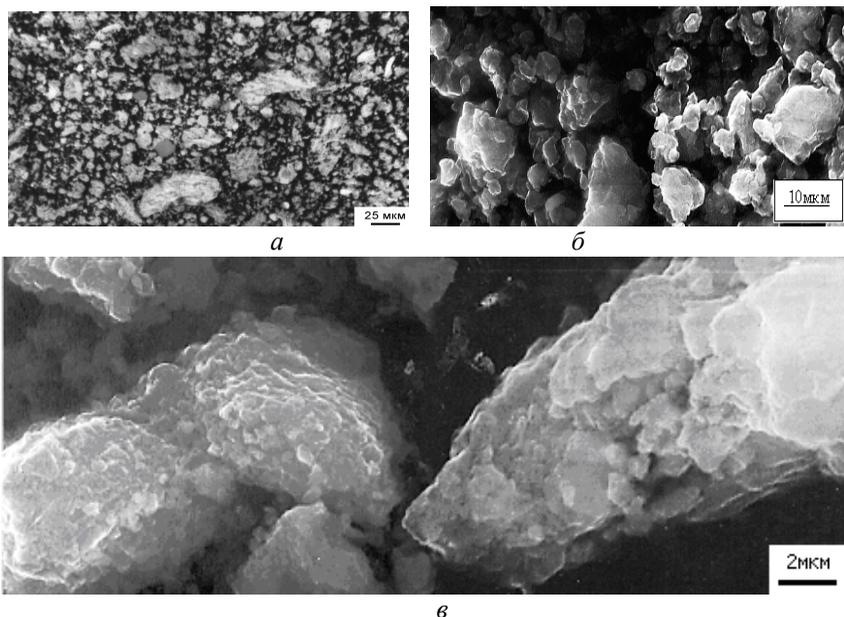


Рис.1. Внешний вид механически сплавленной частицы порошка Ti–Al–B:
 а – оптическая микроскопия; б – электронная микроскопия, $\times 4000$;
 в – электронная микроскопия, $\times 10000$

Целью данной работы является сравнительная оценка триботехнических характеристик покрытий, напыленных из порошков Ti–Al–B 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.

Экспериментальная часть. Напыление покрытий осуществляли с помощью детонационно-газовой установки «Днепр – 5МА», разработанной в ИПМ НАН Украины. Из механически сплавленного порошка Ti-Al-B были напылены следующие покрытия: 1) с применением аргона – «Ar», 2) с применением воздуха – «Air», 3) с применением азота – «N». Условия формирования покрытий приведены в работе [2].

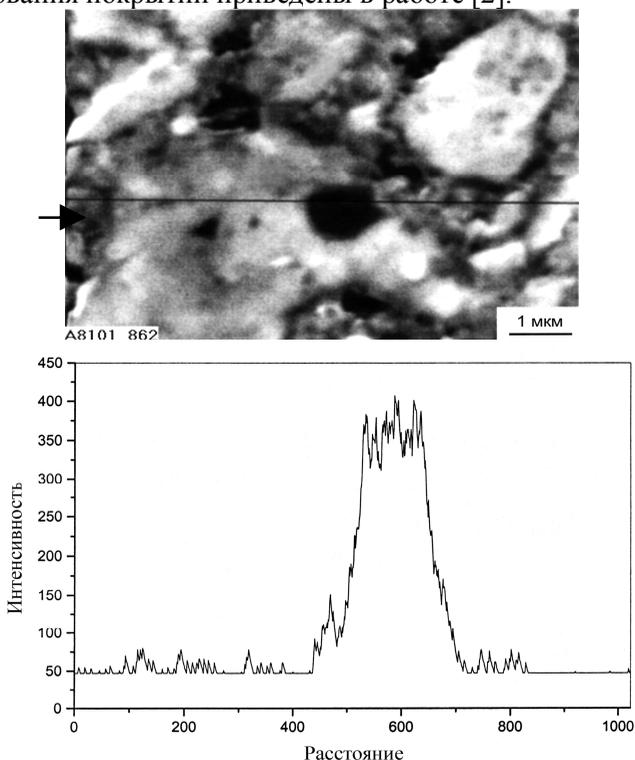


Рис. 2. Распределение бора по поперечному пересечению механически сплавленной частицы Ti-Al-B

Использование аргона для транспортирования порошка в зону горячей газовой смеси приводит к формированию покрытия из физически непрерывной интерметаллидной матрицы и

изолированных включений боридов титана. При использовании воздуха фазовый состав покрытия дополняется включениями оксидов и оксинитрида, что приводит к росту его твердости. Использование азота приводит к формированию покрытия, основа микроструктуры которого представляет собой случайную двухфазную смесь из интерметаллидных и нитридных фаз TiN, AlN, содержащую включения боридов, а также Al и Ti.

Характеристики трения и поведения разработанных покрытий в парах трения с контртелами, изготовленными из трех материалов (Ст45; коррозионно-стойкости стали 07X16H6; титанового сплава марки OT4) оценивали путем сравнения с характеристиками двух типов коммерческих износостойких покрытий, полученных в аналогичных условиях. Одно из них, имеющее фазовый состав в виде триалюминида $(Al, Cr)_3Ti$, было напылено из порошка, полученного из слитка механическим дроблением. Химический состав порошка был аналогичен составу коммерческого порошка марки AL153 $(Al_{66}Cr_9Ti_{25})$ [3]. Второе покрытие из карбидохромистого твердого сплава марки КХН-35 (число указывает на содержание никеля, остальное — карбид хрома) [4]. Оба покрытия были напылены с использованием воздуха – среды, транспортирующей порошок в зону действия детонации.

Триботехнические испытания проводили на машине трения ВМТ-75, обеспечивающей торцевое трение цилиндрического образца ($h = 20$ мм, $d = 10$ мм) по кольцевому контртелу (рис. 3). Во всех случаях испытания велись при скорости скольжения 0,18 м/с в режиме сухого трения при нагрузке $P = 3,12$ МПа в течение 20 мин. Материалы имели седьмой класс шероховатости. Распределение элементов в структуре исследовали с помощью микрорентгеноспектрального анализатора марки «САМЕВАХ SX-50» (Франция). Оптическую микроскопию осуществляли с помощью прибора Jenaphot-2000 (Германия).

Результаты и обсуждение. Анализируя поведение материалов при трении, можно сделать заключение, что в случае со Ст45 оно в значительной степени существенно отличается для разных материалов. Наименьший коэффициент трения зафиксирован (рис. 4) в паре стали с твердым и не склонным к

адгезионному взаимодействию с ним покрытием на основе из алюминидов титана ($H_{\mu} = 6$ ГПа), содержащего твердые и химически стойкие включения нитрида титана ($H_{\mu} = 20,5$ ГПа) и диборида титана ($H_{\mu} = 34$ ГПа).

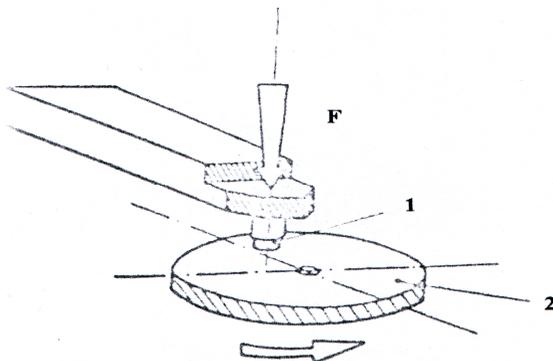


Рис. 3. Схема трения образец – контртело: 1 – образец; 2 – контртело

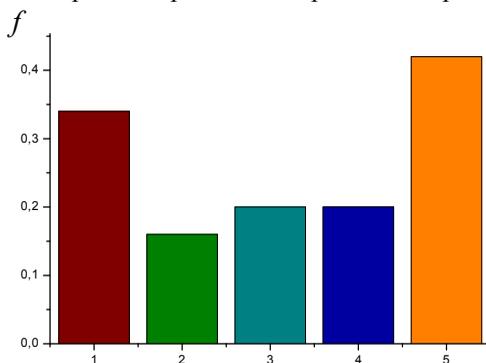


Рис. 4. Коэффициенты трения по стали 45 покрытий, напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков: 1 – Ti–Al–B (аргон); 2 – Ti–Al–B (азот); 3 – Ti–Al–B (воздух); 4 – AL153 (воздух); 5 – KXH-35(воздух)

Этому соответствуют минимальные потери массы рассматриваемых объектов, контактирующих в процессе трения (рис. 5). Причем изнашиванию в указанных парах трения подвергается главным образом менее твердое стальное контртело.

Поверхности дорожек трения на обоих компонентах пары трения Ст 45 – покрытие «N» после приработки имеют стабильный профиль без задиоров, заеданий и выкрашиваний (рис. 6). При этом

поверхность менее твердого контртела закономерно характеризуется более высокой шероховатостью.

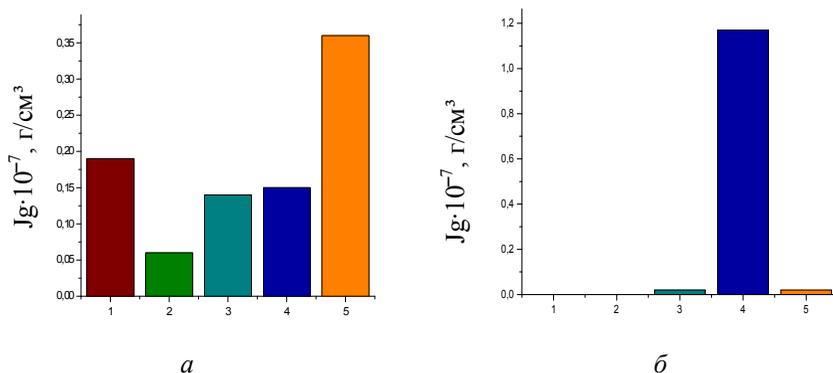


Рис. 5. Потеря массы при трении контртела из Ст 45 (*а*) покрытий (*б*), напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков: 1 – Ti–Al–B (аргон); 2 – Ti–Al–B (азот); 3 – Ti–Al–B (воздух); 4 – AL153 (воздух); 5 – KXH-35 (воздух)

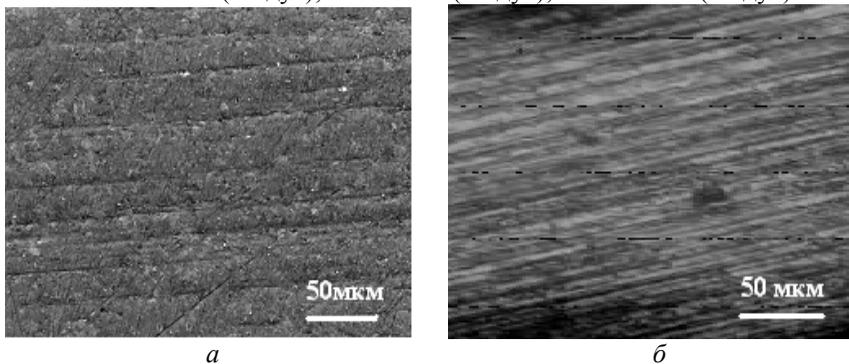


Рис. 6. Изображение поверхностей трения пары Ст45–Ti–Al–B (азот): *а* –покрытие; *б* – контртело

Наличия в структуре нитридов можно отнести к закономерному, поскольку покрытия TiN известны как износостойкие и широко применяются для снижения коэффициента трения рабочих поверхностей, в частности режущего инструмента, именно при обработке сталей [5]. Это объясняется тем, что нитридтитановые покрытия обладают высокой стойкостью к диффузии и химическому взаимодействию с железом.

Наибольшее значение коэффициента трения в паре со Ст45 зафиксировано для покрытия КХН-35. При этом большой износ зафиксирован и контртела, и покрытия, что объясняется активным адгезионным взаимодействием мягкой никелевой связки композиционного покрытия со сталью, сопровождающимся задирами и приводящим к повышенному износу(рис.7).

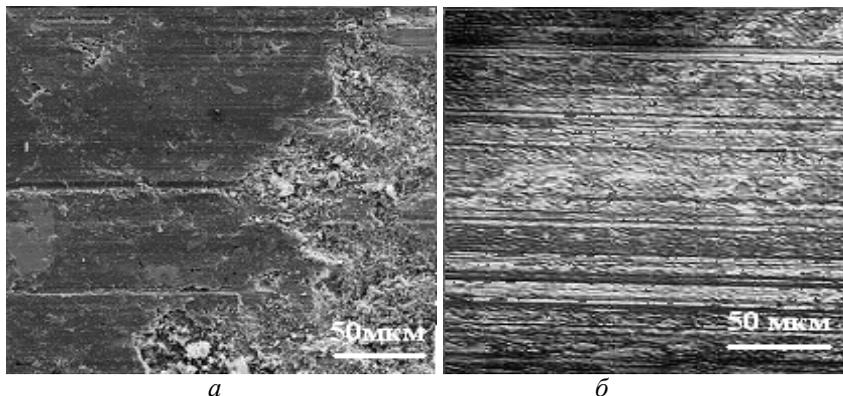


Рис. 7. Изображение поверхностей трения пары Ст45–Ti–Al–В (азот):
а – покрытие; *б* – контртело

На поверхности покрытия видны места выломанных крупных участков структуры, а на поверхности контртела – грубые канавки, образовавшиеся в результате и микрорезания, и пластического воздействия твердой карбидтитановой структурной составляющей покрытия.

Наименьший коэффициент трения в паре со сталью 07X16H6 зафиксирован при работе с покрытием Ti–Al–В (воздух) (рис. 8). При этом оба компонента имеют высокую стойкость к изнашиванию (рис. 9). Состояние контактирующих поверхностей закономерно выглядит наиболее качественным (рис. 10).

Как видно из рис. 9, наибольший износ произошел в паре 07X16H6–AL153. В этом случае фазовый состав покрытия представлен $(Al,Cr)_3Ti$ (рис. 11).

Покрытие Ti–Al–В (азот) при работе в паре с 07X16H6 подверглось также большому износу (рис. 12). На фотографии поверхности этого покрытия видны крупные борозды со сглаженными краями.

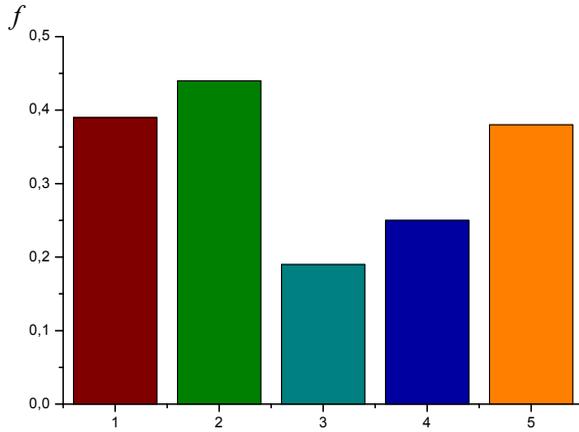


Рис. 8. Коэффициенты трения по стали 07X16H6 покрытий, напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков: 1 – Ti-Al-B (аргон); 2 – Ti-Al-B (азот); 3 – Ti-Al-B (воздух); 4 – AL153 (воздух); 5 – KXN-35 (воздух)

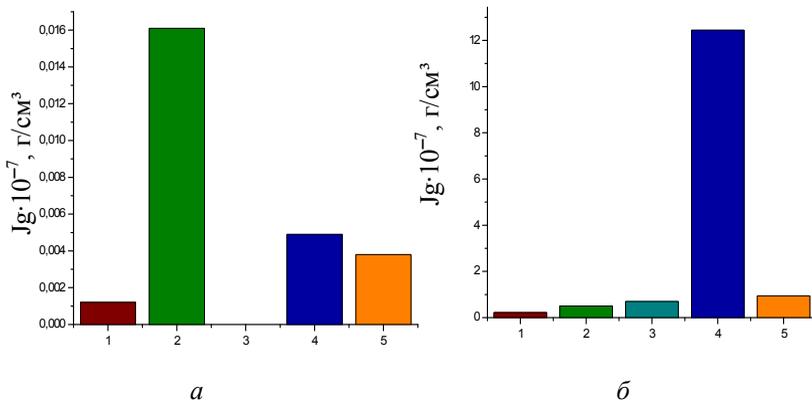


Рис. 9. Потеря массы при трении по стали 07X16H6 (а) покрытий (б), напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков: 1 – Ti-Al-B (аргон); 2 – Ti-Al-B (азот); 3 – Ti-Al-B (воздух); 4 – AL153 (воздух); 5 – KXN-35 (аргон)

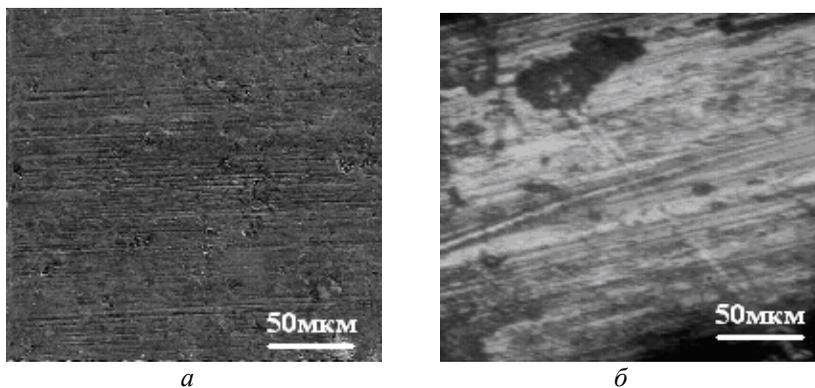


Рис. 10. Изображение поверхностей трения пары 07X16H6–Ti–Al–V (воздух): *a* – покрытие; *б* – контроло.

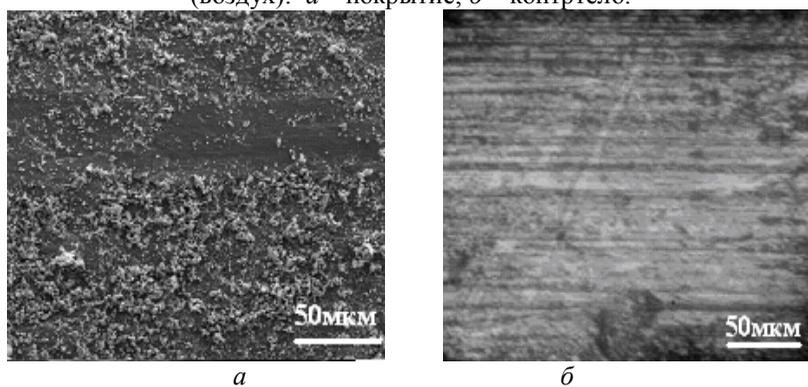


Рис. 11. Изображение поверхностей трения пары 07X16H6 –AL153: *a* – покрытие; *б* – контроло

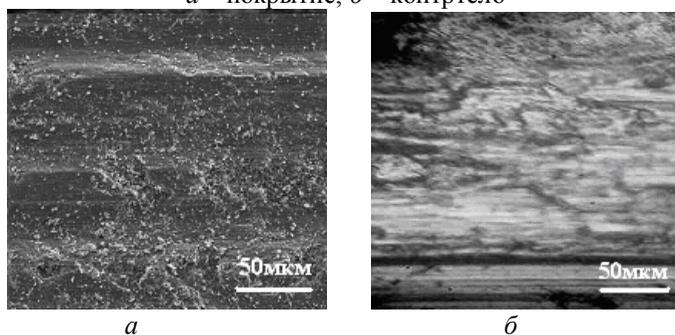


Рис.12. Изображение поверхностей трения пары 07X16H6–Ti–Al–V (азот): *a* – покрытие; *б* – контроло

Можно предположить, что наряду со съемом материала происходило пластическое оттеснение (деформирование) из-за наличия мягких структурных составляющих (Al, Ti, AlN). Однако поверхность контртела выглядит также поврежденной.

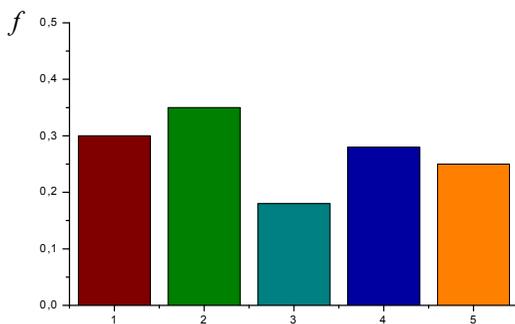


Рис. 13. Коэффициенты трения по сплаву ОТ4 покрытий, напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков: 1 – Ti–Al–B (аргон); 2 – Ti–Al–B (азот); 3 – Ti–Al–B (воздух); 4 – AL153 (воздух); 5 – Cr₂C₃–Ni (аргон)

Лучше других в парах с контртелом из титанового сплава проявило себя покрытие из порошка Ti–Al–B, напыленное с применением сжатого воздуха. В этой паре зафиксирован и минимальный коэффициент трения (рис. 13) и минимальный износ покрытия (рис. 14). Износ контртела при этом такой, как и в других сравниваемых парах. Можно предположить, что положительный эффект в этом случае достигнут благодаря дополнительному наличию в структуре твердых и не склонных к диффузионному взаимодействию с титановым контртелом таких фаз, как оксиды и оксинитриды. Поверхность покрытия после трения выглядит однородной и имеет минимальную шероховатость. Следов грубых повреждений на поверхности контртела не обнаружено (рис. 15). Принципиальное отличие в их структуре заключается в наличии у первого твердых боридных включений.

Худшим для работы в паре с титановым сплавом оказалось покрытие Ti–Al–B (азот) (рис. 16). На поверхности покрытия видны наросты материала. В отличие от покрытия поверхность трения контртела имеет однородные царапины со сглаженным профилем, но

при этом имеются места вырывов материала. Структурные составляющие покрытия по-разному взаимодействуют с поверхностью контртела.

Таким образом, активное адгезионное взаимодействие контактирующих сухих поверхностей химически родственных фаз Ti_2Al , Ti в покрытии и Ti в контртеле приводит к схватыванию в условиях повышенных температур, возникающих при трении без смазки.

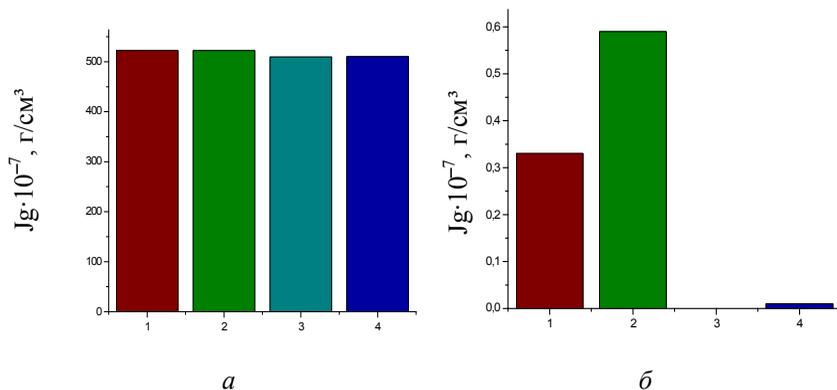


Рис. 14. Потеря массы при трении по сплаву OT4 (а) покрытий (б), напыленных с использованием различных газовых сред для транспортировки порошков: 1 – Ti–Al–В (аргон); 2 – Ti–Al–В (азот); 3 – Ti–Al–В (воздух); 4 – AL153 (воздух)

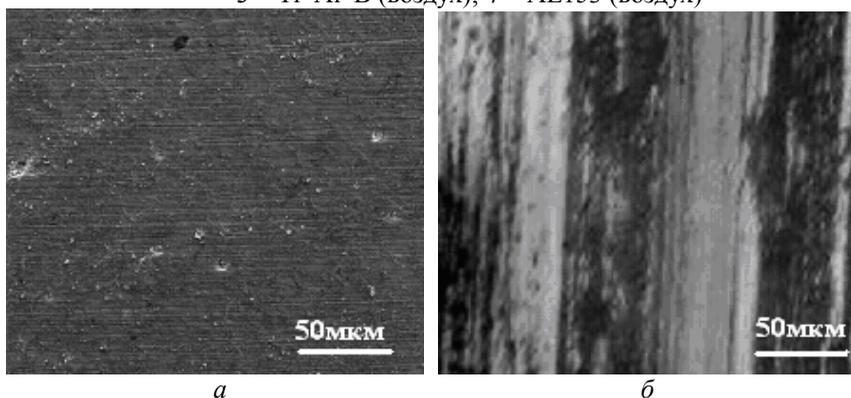


Рис. 15. Изображение поверхностей трения пары сплав OT4–Ti–Al–В (воздух): а – покрытие; б – контртело

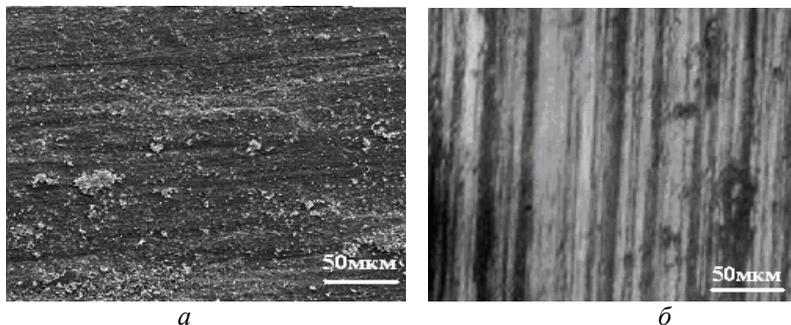


Рис.16. Изображение поверхностей трения пары сплав ОТ4–Ti–Al–B (азот): *a* – покрытие; *б* – контртело

При этом твердые включения боридов и нитридов осуществляют царапающее воздействие более мягкой поверхности титанового контртела, формируя царапины. Наряду с твердыми фазами покрытие содержит и более мягкие (Al, AlN, TiAl), что, в свою очередь, негативно сказывается на его сопротивлении изнашиванию.

Выводы. Сравнительными исследованиями поведения детонационных покрытий на основе Ti–Al–B, Ti–Al–B–N и Ti–Al–B–O в условиях сухого трения в парах с различными материалами установлено, что наличие в структуре покрытий нитридов и оксидов улучшает характеристики трения при работе. Наибольшей склонностью к схватыванию обладают пары, содержащие в своих составах одноименные металлы. Наиболее высокими показателями обладают покрытия 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 износостойкостью в условиях сухого трения.

Список литературы

1. *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. – vol. 200 – (2006). – P. 3573–3581.

2. Оликер В.Е. Эволюция структуры и фазового состава в процессе напыления детонационных покрытий из механохимически синтезированных порошков Ti-Al-B / Оликер В.Е., Сироватка В.Л., Гридасова Т.Я., Тимофеева И.И., Гречишкин Е.Ф., Яковлева М.С // Порошковая металлургия. –2009.– № 11/12.– С. 34–42.

3. 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.

4. 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.

5. Гнесин Г.Г. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах (Обзор) / Гнесин Г.Г., Фоменко С.Н. // Порошковая металлургия.–1996.– № 9/10.–С. 17–28.

Сироватка В.Л. Антифрикційні властивості детонаційних покриттів на основі механічно синтезованого дисперсно-зміцненого інтерметаліда // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С.201–213.

Проведено порівняльні дослідження поведінки детонаційних покриттів на основі Ti-Al-B, Ti-Al-B-O, Ti-Al-B-N та покриттів з AL153, KHN-35 в умовах сухого тертя в парах з різними матеріалами. Установлено, що наявність у структурі покриттів нітридів та оксидів поліпшує характеристики тертя під час роботи. З'ясовано, що найбільшу схильність до схоплення мають пари, що вміщують у своїх складах однойменні метали. Найбільш високими показниками володіє покриття зі структурою з інтерметалідної матриці з включеннями твердих фаз у вигляді боридів титану та оксидів.

Рис. 4, табл.2, список літ.: 7 найм.

A comparative study of detonation coatings based on Ti-Al-B, Ti-Al-B-O, Ti-Al-B-N coatings and of the AL153, KHN-35 under conditions of dry friction in pairs with different materials. It was found that the presence in the structure of coatings of nitrides and oxides improves the characteristics of friction at work. It was found that most tend to have a pair of grip, with their combinations of the same metals. Most have high rates of coatings with the structure of the intermetallic matrix with inclusions of solid phases in the form of borides and titanium oxides.

Стаття надійшла до редакції 21.04.10