

Гладкий Я.Н.,*
Лисовой Е.Н.**

*Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина,
**Государственное авиационное
предприятие "Украина"
г. Борисполь, Украина
E-mail: gladkiy@dn.tup.km.ua

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ FeAl₂-Ti-Si ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТРЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

УДК 621.891

Представлены результаты исследования детонационных покрытий из композиционных порошков FeAl₂-Ti-Si в условиях высокотемпературного трения. Показано, что при нагрузке 5,0 МПа и скорости скольжения 1,5 м/с покрытия на основе FeAl₂ в температурном диапазоне до 650 °С отличаются устойчивым проявлением структурной приспособляемости и по сопротивлению износу не уступают покрытиям на основе нихрома и оксида алюминия.

Ключевые слова: детонационное напыление, износостойкость, структурная приспособляемость, поверхность трения, покрытия.

Вступление

Процессы трения и изнашивания являются одной из наиболее важных научно-технических областей исследования, так как в них теоретическими и прикладными методами изучаются вопросы, с которыми приходится сталкиваться в повседневной практике. Характерной особенностью большинства подвижных сопряжений деталей машин, работающих в условиях трения, является необходимость выполнения рабочих и технологических функций при повышенных температурах. Температура, как один из эксплуатационных факторов, важный показатель условия трения, а тепловые процессы, возникающие при этом, оказывают непосредственное влияние на формирование физико-химических и механических свойств поверхностных слоев. Однако, несмотря на принципиальную важность, теоретические и практические работы, связанные с высокотемпературным изнашиванием детонационных покрытий, в научной литературе крайне немногочисленны, поэтому исследование влияния температурного фактора на закономерности изнашивания детонационных покрытий остается актуальной проблемой современной практики.

От качества и разнообразия ассортимента порошков в значительной степени зависят масштабы и эффективность практического применения покрытий. В связи с этим общий интерес в этой области неразрывно связан с разработкой новых порошковых материалов. При прочих равных условиях получения дешевых порошков является неперенным условием их массового использования, при этом технология их получения должна быть простой и производительной [1].

Постановка проблемы

Изучить состав, структуру и закономерности трения и изнашивания разработанных на базе природных ресурсов страны детонационных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si для защиты деталей машин, работающих в условиях высокотемпературного трения. Теоретические положения, обосновывающие сопротивление изнашиванию созданного детонационным методом поверхностного слоя, рассматривались с позиции структурно-энергетической теории трения и износа [2]. Композиционный порошок для напыления получали методом механохимического синтеза [3]. Покрытия наносили на детонационно-газовой установке "Днепр-3". Толщина покрытий после доводки составляла 0,20 - 0,25 мм при шероховатости $R_a = 0,63 - 0,32$. Для сравнения по аналогичным программам были испытаны детонационные покрытия, напыленные вольфрамсодержащим порошком ВК15, а также порошками на основе нихрома и оксида алюминия. Испытания на износ осуществляли на установке М-22ПВ [4] на кольцевых образцах в условиях распределенного контакта ($K_{B3} \approx 1$) при скорости скольжения 1,5 м/с и нагрузке 5,0 МПа. За основу исследования приняты общие технические требования методики испытания на износостойкость материалов при высоких температурах [5]. При этом были сделаны необходимые изменения с целью максимально приблизить процессы физико-химической механики трения и изнашивания к реальным условиям эксплуатации. Температура трения образцов измерялась хромель-копелевыми термопарами, изготовленными из паспортизированного провода.

При раскрытии взаимосвязей между свойствами материалов покрытий в условиях трения, их структурой, влиянием внешних факторов, определяющих надежность и работоспособность системы трения, ведущую роль играет выбор методов исследований. Возможности используемых методик и аппаратуры во многом определяют глубину и достоверность представлений о процессах, протекающих при контактном взаимодействии сопряженных поверхностей.

Изучение физико-химических свойств, микрофазовый анализ поверхностных слоев, обуславливающих закономерности активации, интенсификацию процессов механохимического окисления и схватывания, осуществлено использованием метода дифракции электронов. Исследования проводили на электронографе ЭМР-100 (съемка на отражение при напряжении 100 кВ), микрорентгеноспектральный анализ – на микроанализаторе "Камека". При определении истинных концентраций вносили поправки на основные эффекты по программам для ЭВМ [6].

Информацию о качественном и количественном составе, химическом состоянии элементов, наличии дефектов и функциональных групп в приповерхностных слоях получали с помощью метода оже-электронной спектроскопии на установке "Jamp-10S" по методике фирмы "JEOL". Оже-спектры регистрировали при токе $5 \cdot 10^{-8}$ А, ускоряющем напряжении 10 кВ, вакуум $2 \cdot 10^{-7}$ Па, диаметр зонда 30 мкм. Металлографические исследования проводились на микроскопе типа МИМ-8М. Важным этапом качественного изучения структуры покрытий являлось получение микрошлифов, которые изготавливались по методике изложенной в работе [7].

Результаты исследований

Проблема выбора рациональной композиции покрытий FeAl₂-Ti-Si связана с оценкой влияния компонентов на их структуру и свойства, которые осуществляли по структурному признаку [2]. Выбор в качестве исходного сырья порошка железа, являющегося достаточно дешевым, недефицитным стандартным материалом [8], обусловлен также его возможностью многократного легирования особенно элементами с ограниченной растворимостью [9]. На рис. 1 и 2 приведен характер зависимостей влияния содержания титана и кремния на микротвердость (H_n) и интенсивность изнашивания ($I_{из}$) покрытий.

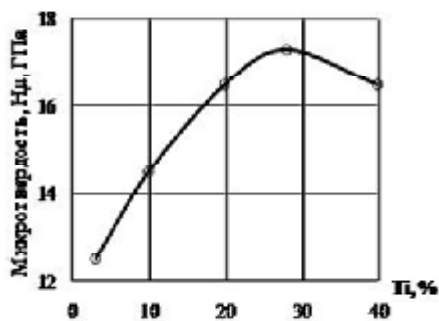


Рис. 1 – Зависимость изменения микротвердости покрытия FeAl₂ от содержания Ti

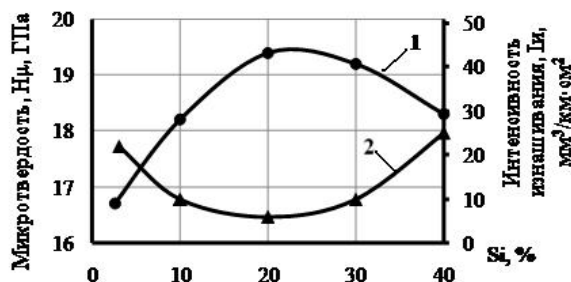


Рис. 2 – Зависимость микротвердости (1) и интенсивности изнашивания (2) покрытия FeAl₂-Ti от содержания Si

Как видно из графика, максимальную микротвердость имеют детонационные покрытия FeAl₂-Ti с содержанием титана ~ 28 %, при этом механические свойства полученного материала могут быть повышены путем дополнительного введения в его состав кремния, оптимальное содержание которого, как установлено, соответствует ~ 22 %. Введение титана и кремния, входящих в твердый раствор железа и упрочняющих его, способствуют образованию сложнолегированных высокотемпературных структур, вызывающих дисперсное твердение благодаря чему сопротивление износу вследствие образования значительного количества упрочняющих фаз с высокой термодинамической устойчивостью повышается. Положительное влияние на структуру и свойства покрытий легирующие элементы оказывают, как установлено в процессе испытаний, лишь при определенных концентрациях, оптимальные значения которых определено экспериментально.

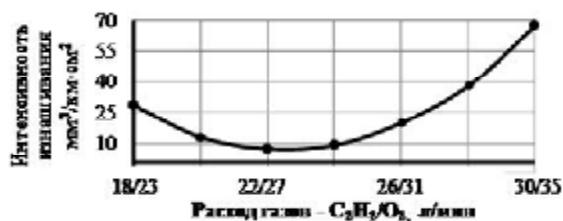
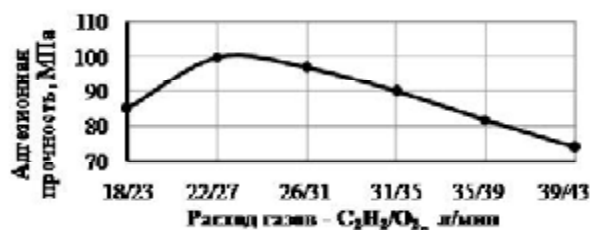
Рис. 3 – Зависимость интенсивности изнашивания покрытий FeAl₂-Ti-Si от расхода газовой смеси

Рис. 4 – Зависимость адгезионной прочности покрытий от расхода газовой смеси при напылении

Важное значение в обеспечении высокого качества многокомпонентных покрытий, имеют влияние технологические параметры напыления. Была проведена серия экспериментов по определению влияния соотношения рабочих газов и степени заполнения ствола газовой смесью на эксплуатационные характеристики покрытий. На рис. 3 приведена зависимость интенсивности изнашивания от заполнения ствола газовой смесью на основе ацетилен-кислорода соотношением (1:1,1). Как видно напыление при расходах рабочих газов в соотношении для ацетилен-кислорода 22/27 - 24/29 обеспечивает наибольшую износостойкость, которая однозначно коррелируется с прочностью связи покрытия, что иллюстрируется рис. 4.

Неизменность химического состава и параметров процесса напыления обуславливают постоянство свойств покрытий, относительная плотность которых ~ 99 %.

Полученные в результате оптимизации покрытий FeAl₂-Ti-Si по данным микрорентгеноспектрального анализа позволило классифицировать структуру как тонкий конгломерат включений (более 65 % объема) типа алюминидов железа (Fe₃Al, FeAl₂, Fe₃Al₅, FeAl₃), титана (Ti₃Al, TiAl₂, TiAl₃) и силицидов (Fe₃Si, Fe₂Si, Fe₃Si₃; TiSi, TiSi₂), кроме бинарных интерметаллидных включений, наложение соответствующих концентрационных максимумов указывает на возможность существования сложных тугоплавких фаз типа (Fe,Ti)Al, (Fe,Si)Al, твердых растворов Ti₅Si₃-Fe₅Si₃, установлено, что интерметаллидные соединения, растворяя исходные компоненты, обуславливают образование твердых растворов.

В табл. 1 приведены изменения физико-механических свойств покрытий в результате легирования.

Таблица 1

Физико-механические свойства покрытий при изменении фазового состава

Состав покрытия	Толщина, мм	σ_c , ГПа	$\sigma_{изг.}$, МПа	$\sigma_{сц.}$, МПа	H μ , МПа
FeAl ₂	0,15 - 0,25	0,45 - 0,50	380 - 430	45 - 51	11 000
FeAl ₂ -Ti	0,15 - 0,25	0,53 - 0,66	550 - 600	62 - 79	17 000
FeAl ₂ -Ti-Si	0,20 - 0,30	0,80 - 0,97	670 - 840	89 - 110	19 500

Известно, что при нагружении трением поверхностный слой вследствие пластической деформации переходит в термодинамически неравновесное активированное состояние, из которого путем диффузии и химического взаимодействия с окружающей средой стремится перейти в пассивное, в результате чего образуются тонкоплочные вторичные структуры [2].

Данные испытаний определяющие функциональную зависимость интенсивности изнашивания от температуры вблизи поверхностей трения исследуемых покрытий, представлены на рис. 5. С ростом температуры вплоть до 600 °C изнашивание покрытий FeAl₂-Ti-Si (кривая 1) практически стабильно, имеет место нормальный механохимический износ.

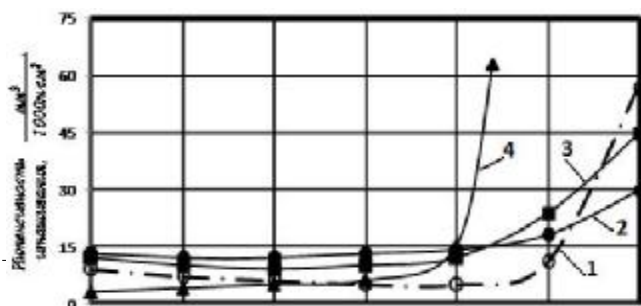


Рис. 5 – Зависимость интенсивности изнашивания от температуры:

Согласно исследованиям состав поверхностных пленок, экранирующих адгезионные взаимодействия в зоне трибоконтакта, представляют наряду с основной фазой переиспеченные твердые растворы на основе Fe, Si в α -Al, оксидов Fe₂O₃-Al₂O₃, Al₂O₃-TiO₂, а также

конгломерат сложных оксидных соединений типа Fe₂TiO₅, Fe₂(TiO₃)₃, FeAl₃O₄, β-тиалита Al₂TiO₅, муллита Al₂SiO₅ и силиката фаялитного типа FeSiO₄, которые в результате спекания обуславливают образование тонкопленочных гетерогенных поверхностных структур, микротвердость при этом составляет 21 - 23 ГПа, при исходной – до 19 ± 0,5 ГПа. Таким образом, при повышении температур под действием касательных и сжимающих напряжений в поверхностных структурах и приповерхностном слое интенсивно протекают термомеханические процессы, существенные структурно-фазовые изменения. На рис. 6 представлены микроструктуры и электронограммы, отражающие кинетику распада структур на поверхности трения покрытий FeAl₂-Ti-Si. Повышение температуры активирует процессы коагуляции и рекристаллизации, развивающиеся на различных масштабных уровнях, о чем свидетельствует постепенное исчезновение колец и появление на электронограммах точечных рефлексов, указывающих на аморфное состояние [9].

В настоящее время общепризнано, что на основные закономерности трения и изнашивания немаловажное влияние оказывает эволюция последовательно усложняющихся конфигураций поверхностных структур, имеющих высокопрочное тонкодисперсное строение, которые способствуют локализации пластических деформаций и экранированию недопустимых процессов схватывания.

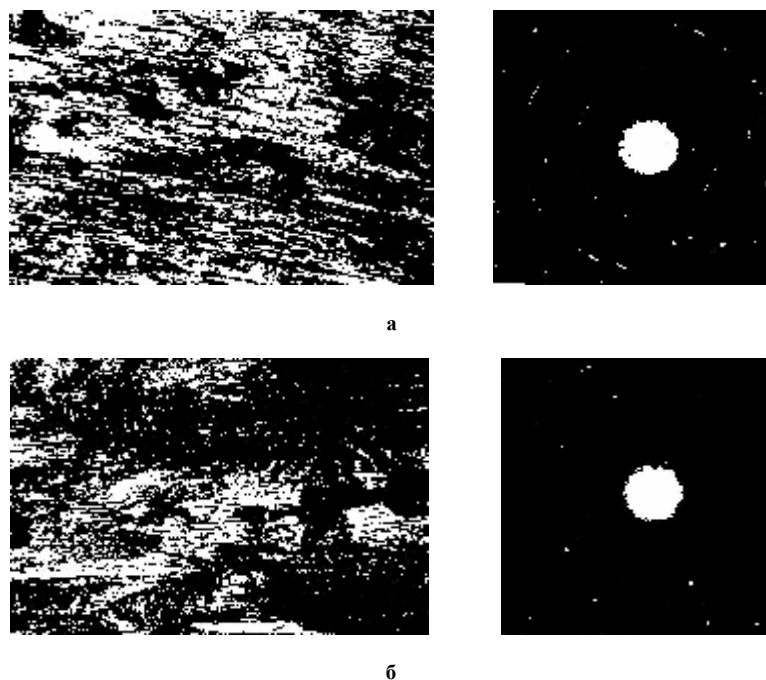


Рис. 6 – Поверхности трения и электронограммы покрытий FeAl₂-Ti-Si, испытанных при температурах:
а – 400 °С (x240);
б – 550 °С (x28000)

С энергетической точки зрения данную трансформацию вторичных структур можно рассматривать в качестве адекватных элементарных механизмов адаптации поверхностных слоев в процессе структурной приспособляемости системы трения. Так, с одной стороны, вследствие статистических закономерностей фазы образования и фрагментации вторичных структур на различных участках контактных поверхностей не совпадают, но их аддитивное распределение представляет устойчивое структурно-временное состояние, с другой – формирование структуры поверхностного слоя не является индетерминированным, а управляется минимальными принципами диссипативных процессов [9, 10].

С повышением температуры (рис. 5) комплекс поверхностных явлений интенсифицируется, что обусловлено на наш взгляд искажением кристаллических решеток при пластической деформации за счет флуктуирующих напряжений, возникающих при трении, кроме того, появление точечных и многомерных дефектов активируют трибохимические реакции.

Но при достижении критического значения, которые для испытываемого покрытия (кривая 1) составляет ~650 °С, вызывает деструкционные процессы и обуславливает переход к недопустимым явлениям повреждаемости (рис. 7).



Рис. 7 – Поверхности трения покрытия FeAl₂-Ti-Si, иллюстрирующие кинетику процесса разрушения, после испытаний при 650 °С

Для покрытий системы Al₂O₃-Cr₂O₃ (кривая 3) предельная критическая температура при данных условиях трения составляет ~ 680 °С, у покрытий типа Ni-Cr-Al-B (кривая 2) диапазон нормального трения ограничен температурной ~ 600 °С, а покрытия на основе WC (кривая 4) сохраняют работоспособность до 530 °С.

Тонкоплочный конгломерат оксидных фаз, препятствующий адгезионно-молекулярному взаимодействию контактных поверхностей, представляет собой сложный объект, интегральные свойства

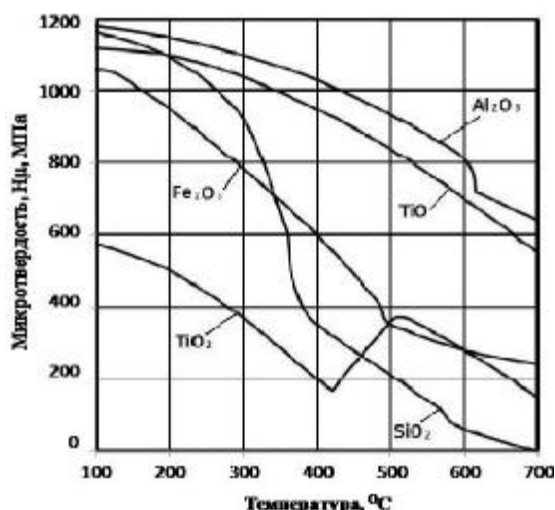


Рис. 8 – Зависимость микротвердости оксидных структур на поверхностях трения детонационных покрытий от температуры

которого в свою очередь зависят от характеристических особенностей и индивидуальных свойств простых оксидов как субстантных самостоятельных единиц, свойства которых могут быть исследованы в терминах своеобразия их структур. Так, микротвердость поверхностных структур и характер зависимости от температуры представлены на рис. 8.

Микротвердость вюстита FeO, образующегося на поверхностях трения покрытий FeAl₂-Ti-Si при понижении температуры монотонно уменьшается, а вблизи значения 520 °С скачок микротвердости, что происходит в результате твердофазного превращения FeO в более стабильный оксид Fe₂O₃. При чем значения микротвердости данных оксидов при понижении температуры не совпадают с результатами измерений, полученными при нагреве, что, с нашей точки зрения, обусловлено различными значениями структурно-термической активации и, следовательно, контактной упругопластической деформацией, влияющей на аномальную диффузионную активность как кислорода, так

и других элементов, включая железо. Микротвердость гематита Fe₂O₃ при повышении температуры уменьшается и имеет место скачок микротвердости вследствие полиморфного β→α – превращения. При охлаждении гематита с выдержкой в момент измерения микротвердости наблюдается скачкообразное понижение микротвердости до значений, совпадающих со значениями микротвердости магнетита Fe₃O₄, более рыхлого и менее плотного, чем γ-Fe₂O₃. Продукты износа представляют собой порошок темно-бурого цвета. Результаты рентгенофазового анализа подтверждают превращение гематита в магнетит, являющийся более стабильным оксидом железа в данных условиях.

Микротвердость однооксида титана, которая не претерпевает полиморфных превращений, при повышении температуры монотонно уменьшается. Также следует отметить, что простые оксиды склонны к образованию твердых растворов, растворение в них легирующих элементов, как правило, обуславливает повышение микротвердости.

Двуокись титана TiO₂ претерпевает полиморфное превращение при 500 °С, причем увеличение микротвердости в момент превращения свидетельствует о переходе менее плотно упакованной кристаллической решетки брукита (ромбической) в более плотноупакованную тетрагональную решетку рутила. Микротвердость двуоксида титана при растворении в нем железа почти не изменяется.

При введении в качестве легирующей присадки в состав детонационных покрытий кремния на поверхности трения образуется двуокись, которая в исследуемом температурном диапазоне претерпевает

два полиморфных превращения, первое при 500 °С и второе при 700 °С. Рентгенофазовым анализом установлено, что в первом случае низкотемпературный β-кварц превращается в высокотемпературный α-кварц.

Микротвердость образующихся на поверхностях трения оксидных пленок трехвалентных металлов в данном случае Fe₂O₃ и Al₂O₃ при повышении температуры уменьшается, однако вблизи 550 ÷ 600 °С кривая изменения микротвердости Al₂O₃ имеет перегиб, свидетельствующий о полиморфном превращении.

В результате исследования микротвердости оксидных структур, образующихся в условиях высокотемпературного изнашивания на поверхностях трения детонационных покрытий, можно отметить некоторые характерные особенности, а именно, исследуемые структуры в зависимости от химического состава могут находиться в различных состояниях. При повышенных температурах, оксидные структуры переходят в более стабильное состояние, что обуславливает изменение их физических свойств. Зависимость микротвердости поверхностных структур от температуры, как правило, монотонная, если они не полиморфны, и скачкообразная, если происходят полиморфные превращения или превращения метастабильных состояний в более стабильные и устойчивые при нагреве или охлаждении. Перегибы на кривых изменения микротвердостей в большинстве плавные, так как в оксидных структурах растворены и присутствуют частицы внедрений и примесей, которые существенно влияют на микротвердость, а следовательно, и на свойства оксидов как простых, так и сложных составов.

При всем многообразии конструктивных форм и функциональных особенностей машин и механизмов, требование износостойкости является общим параметром, который определяет безотказность и долговечность. И создание универсального покрытия для их защиты от износа ограничено той же проблемой, что и получение износостойкого монолитного материала, удовлетворяющего всем требованиям, которые реализуются в практике машиностроения.

Общий интерес в этой области неразрывно связан с созданием новых материалов. При разработке которых учитывались технико-экономические ограничения, обуславливаемые требованиями производства, в том числе затрату дефицитных и дорогих компонентов.

Результаты сопротивления износу детонационных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si при повышенных температурах подтверждают целесообразность и перспективность продолжения испытаний с целью всестороннего исследования их эксплуатационных возможностей в экстремальных условиях защиты деталей от износа.

Выводы

1. Установлена правомерность используемых методологий и алгоритма проведения экспериментальных исследований покрытий FeAl₂-Ti-Si, которые в воздушной среде при отсутствии смазки в условиях высокотемпературного трения показали высокие значения износостойкости, не уступающие таковым для покрытий на основе нихрома, оксида алюминия и твердого сплава ВК.

2. Установлено оптимальное содержание компонентов в покрытии, соответствующее максимальной износостойкости, и исследованы их физико-механические свойства. Определен структурно-фазовый состав покрытий, что позволило классифицировать их состав как структуру тонкого конгломерата упрочняющих фаз (более 65 % объема).

3. Установлено, что износостойкость покрытий в режиме структурной приспособляемости обусловлена устойчивым образованием в результате кооперативных поверхностных трибохимических эффектов тонкопленочных структур, представляющих собой дисперсные гетерогенные оксиды типа шпинельных фаз. Наличие на поверхностях трения оксидных пленок типа β-тиалита, муллита, силикатов препятствует адгезионно-молекулярному взаимодействию, выполняя роль твердой смазки, и способствует аккомодации зернограничного скольжения.

4. Установлены оптимальные соотношения рабочих газов и степени заполнения ствола газовой смесью. При этом отмечено, что, управляя технологическим процессом напыления детонационных покрытий, удалось реализовать не только прогнозируемый химический состав, но получить при этом заданную структуру, позволяющую обеспечить минимальные показатели трения в данных условиях испытаний.

5. Разработаны композиционные покрытия системы FeAl₂-Ti-Si, не содержащие дефицитных и дорогостоящих компонентов, с целью повышения износостойкости узлов трения, которые, как показали результаты испытаний, обеспечивают их эксплуатационную надежность в соответствии с требованиями и возможностями, открывающимися с применением нового конкурентоспособного материала для износостойких покрытий, полученных детонационным методом.

Литература

1. Лисовой Е.Н. Сопротивление износу детонационных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si при трении без смазки / Е.Н. Лисовой // Проблемы техники. – 2012. – № 4. – С. 46-54.

2. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Караулов и др. – К.: Техника. – 1976. – С. 296.

- Степанчук А.Н. Технология порошковой металлургии / А.Н. Степанчук, И.И. Билык, П.А. Бойко. – К.: Вища шк. – 1991. – С. 415.
4. Полотай В.В. Машина трения М-22ПВ / В.В. Полотай. – К.: ИПМ. – 1995. – С. 20.
5. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л.И. Тушинский. – Новосибирск: Наука; Сиб. отд-ние. – 1990. – С. 306.
6. Андриященко Н.С. Математическая обработка данных микрорентгеновского анализа / Н.С. Андриященко // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. – 1997. – № 17. – С. 179-192.
7. Носовский И.Г. Авиационное материаловедение / И.Г. Носовский, В.В. Щепетов. – К: КИ ВВС. – 1998. – С. 287.
8. Машков Ю.А. Трибология конструкционных материалов / Ю.А. Машков. – Омск: ОмГТУ. – 2001. – С. 299.
9. Владимиров В.И. Физика износостойкости поверхности металлов / В.И. Владимиров. – Л.: ФТИ. – 2001. – С. 252.
10. Бершадский Л.И. Адаптивность и обучаемость трибосистем / Л.И. Бершадский. – К.: Знание. – 1989. – С. 20.

Поступила в редакцию 24.04.2013

Gladkiy Ya.N., Lisovoy E.N. **Wear-resistant FeAl₂-Ti-Si detonation spray coatings under friction loading at elevated temperatures.**

Performing working and operating functions at elevated temperatures is inherent in most of mating and moving machinery parts which operate under friction.

In disclosing interrelations between tribological properties of materials, their structure, effect of outside factors, which determine a friction system reliability, the state-of-art physicochemical analysis techniques have been employed. This allowed the investigation of friction and wear behavior of FeAl₂-Ti-Si detonation coatings developed (using domestically available resources) to protect machinery components operating under high temperature friction. An optimal content of components corresponding to the maximal coating wear resistance has been found in the process, their physicochemical properties examined. The structure-phase composition has been defined thus enabling the composition of the coatings to be categorized as a structure of fine conglomerate of strengthening phases. It has been established that coating wear resistance in the regime of a structural adaptability is due to the stable formation of thin-film structures of oxide type as a result of the cooperating areal tribochemical effects.

The quantitative changes of microhardness in oxide structures of both simple and complex compositions minimizing the destruction of surface layer under high temperature friction have been obtained.

It has been demonstrated that the presence of oxide films of β -tialite (Al₂TiO₅), mulite (Al₂SiO₅), silicates of FeSiO₄ type, and others on friction surfaces opposes the adhesive-molecular interaction of working surfaces, acting as a solid lubricant, and is beneficial for accommodating a grain-boundary glide.

The process-dependent parameters of sputtering have been optimized. Thus, the efficient ratios of working gases and extents of barrel filling have been found, making it possible not only to implement the predicted chemical composition but to obtain the set structure enabling the minimal friction factors to be provided under the given test conditions.

The FeAl₂-Ti-Si composition coatings not containing scarce and costly components have been developed for the purpose of enhancing the wear resistance of tribological units which, as proved by the test findings, provide their production safety to suit the requirements and opportunities to be offered by developing a new competitive material for wear resistant coatings fabricated through the detonation spraying technique.

Keywords: detonation spraying, wear resistance, structural adaptability, friction surface, cover.

References

1. Lisovoy E.N. Soprotivlenie iznosu detonacionnyh pokrytij sistemy FeAl₂-Ti-Si pri trenii bez. Problemy tehniki. 2012. No 4. pp.46 – 54.
2. Kosteckij B.I., Karaulov I.G. i dr. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii. K.: Tehnika. 1976. 296p.
3. Stepanchuk A.N., Bilyk I.I., Bojko P.A. Tehnologija poroshkovej metallurgii. K.: Vishha shk. 1991. 415p.
4. Polotaj V.V. Mashina trenija M-22PV. K.: IPM. 1995. 20p.
5. Tushinskij L.I. Teorija i tehnologija uprochnenija metallicheskih spлавov. Novosibirsk: Nauka; Sib. otd-nie. 1990. 306 p.
6. Andrijshhenko N.S. Matematicheskaja obrabotka dannyh mikrorentgenovskogo analiza. Apparatura i metody rentgenovskogo analiza. 1997. No 17. pp. 179–192.
7. Nosovskij I.G., Shhepetov V.V. Aviacionnoe materialovedenie. K: KI VVS. 1998. 287p.
8. Mashkov Ju.A. Tribologija konstrukcionnyh materialov. Omsk: OmGTU. 2001. 299p.
9. Vladimirov V.I. Fizika iznosostojkosti poverhnosti metallov. L.: FTI. 2001. 252p.

-
10. Bershadskij L.I. Adaptivnost' i obuchaemost' tribosistem. K.: Znanie. 1989. 20p.