



УДК 621.793 (045)

Бабак В.П.<sup>1</sup>, Лисовой Е.Н.<sup>2</sup>, Мирненко В.И.<sup>3</sup>, Щепетов В.В.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт технической теплофизики НАНУ. Украина, г. Киев<sup>2</sup> Государственное авиационное предприятие «Украина». Украина, г. Киев<sup>3</sup> Национальный университет обороны Украины. Украина, г. Киев

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТРЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

*Исследовано трение и износ детонационных композиционных покрытий FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si в условиях высокотемпературного трения. Обоснован выбор композиции и ее оптимальный состав для напыления износостойких покрытий, нагруженных трением в условиях высоких температур. Отмечено, что положительное воздействие на структуру, свойства и качество многокомпонентных покрытий оказывают легирующие элементы при определенных концентрациях, а также технологические параметры напыления. Показано, что кремний и титан способствуют образованию сложнолегированных высокотемпературных соединений, обладающих повышенным сопротивлением износу. Максимальную микротвердость имеют покрытия FeAl<sub>2</sub>-Ti при содержании титана ~28%, при этом механические свойства материала повышаются путем дополнительного легирования кремнием ~22% бора. В свою очередь, при расходах рабочих газов ацетилена-кислорода ~ (22–27) г/л обеспечивается стабильность технологических параметров напыления, неизменность химического состава и постоянство свойств покрытий. При нагрузке 5,0 МПа, скорости скольжения 1,5 м/с и температуре до 650 °С покрытия системы FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si проявляют устойчивую структурную приспособляемость, обеспечивающую минимизацию параметров трения и изнашивания. Металлографический анализ и профилографирование образцов свидетельствуют о том, что на поверхностях трения отсутствуют заметные повреждения, а отдельные очаги схватывания локализируются в тонкопленочных поверхностных слоях. Определены высокая адгезия, физико-механические характеристики и сопротивление износу покрытий в условиях повышенных температур, современными физико-химическими методами анализа изучены структура и свойства тонкопленочных поверхностных объектов. Установлено что, сочетание механических и физико-химических характеристик обеспечивает широкие возможности использования покрытий FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si в условиях высокотемпературного износа.*

Ключевые слова: детонационное покрытие; износостойкость; поверхностный слой; структурная приспособляемость; температура.

### Введение

Процессы трения и изнашивания являются одной из наиболее важных научно-технических областей исследования, так как в них теоретически 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 непримен-

ным 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  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$  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-газовую установку «Днепр-3». Толщина покрытий после доводки составляла 0,20-0,25 мм при шероховатости  $R_a = 0,63\text{-}0,32$ . Для сравнения по аналогичным программа 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 ( $K_{вз} \approx 1$ ) 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 паспортизованного 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 опре-

делении 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 изготовлялись по методике изложенной в работе [7].

### Результаты исследований

Проблема выбора рациональной композиции покрытий  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$  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 влия-

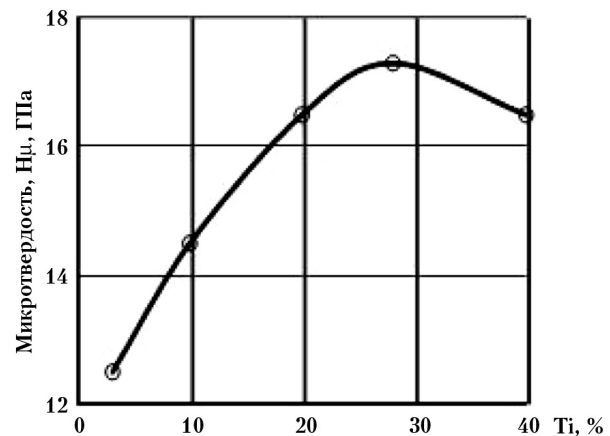


Рис. 1. Зависимость изменения микротвердости покрытия  $\text{FeAl}_2$  от содержания Ti

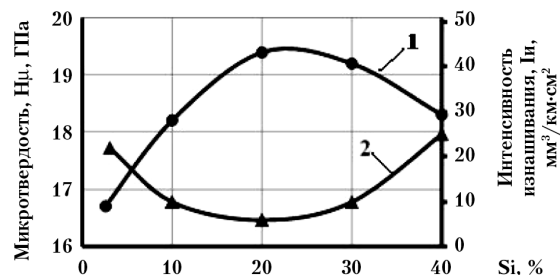


Рис. 2. Зависимость микротвердости (1) и интенсивности изнашивания (2) покрытия  $\text{FeAl}_2\text{-Ti}$  от содержания Si

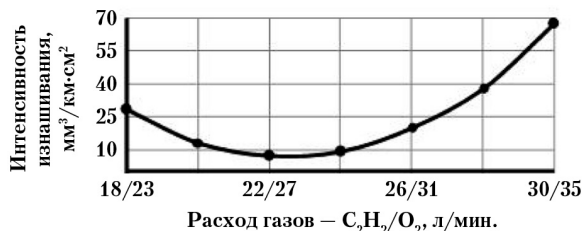


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si от расхода газовой смеси

ния содержания титана и кремния на микротвердость (Нμ) и интенсивность изнашивания (I<sub>и</sub>) покрытий.

Как видно из графика, максимальную микротвердость имеют детонационные покрытия FeAl<sub>2</sub>-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 сложнлегированных 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.

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.

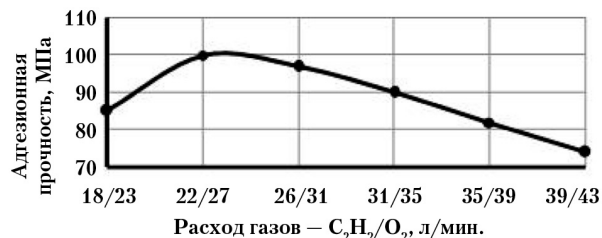


Рис. 4. Зависимость адгезионной прочности покрытий от расхода газовой смеси при напылении

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

Полученные в результате оптимизации покрытий FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si по данным микрорентгеноспектрального анализа позволило классифицировать структуру как тонкий конгломерат включений (более 65% объема) типа алюминидов железа (Fe<sub>3</sub>Al, FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>3</sub>), титана (Ti<sub>3</sub>Al, TiAl<sub>2</sub>, TiAl<sub>3</sub>) и силицидов (Fe<sub>3</sub>Si, Fe<sub>2</sub>Si, Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>; TiSi, TiSi<sub>2</sub>), кроме бинарных интерметаллидных включений, наложение соответствующих концентрационных максимумов указывает на возможность существования сложных тугоплавких фаз типа (Fe,Ti)Al, (Fe,Si)Al, твердых растворов Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, установлено, что интерметаллидные соединения, растворяя исходные компоненты, обуславливают образование твердых растворов.

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

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 образуются тонкопленочные 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 °С изнашивание покрытий FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si (кривая 1) практически стабильно, имеет место нормальный механохимический износ. Согласно исследованиям состав по-

Таблица 1.

Физико-механические свойства покрытий при изменении фазового состава

Состав покрытия	Толщина, мм	σ <sub>в</sub> , ГПа	σ <sub>изг</sub> , МПа	σ <sub>сн</sub> , МПа	Нμ, МПа
FeAl <sub>2</sub>	0,15–0,25	0,45–0,50	380–430	45–51	11 000
FeAl <sub>2</sub> -Ti	0,15–0,25	0,53–0,66	550–600	62–79	17 000
FeAl <sub>2</sub> -Ti-Si	0,20–0,30	0,80–0,97	670–840	89–110	19 500

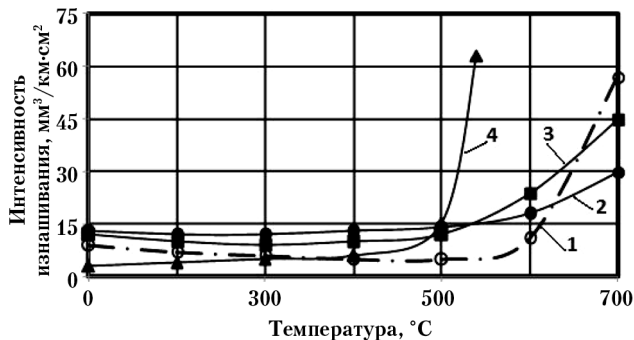


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания от температуры:

1 — FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si; 2 — Ni-Cr-Al-B; 3 — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

4 — WC-Co ( $V = 1,5$  м/с;  $P = 5,0$  МПа)

верхностных пленок, экранирующих адгезионные взаимодействия в зоне трибоконтакта, представляют наряду с основной фазой пересыщенные твердые растворы на основе Fe, Si в  $\alpha$ -Al, оксидов Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>, а также конгломерат сложных оксидных соединений типа Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>, Fe<sub>2</sub>(TiO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, FeAl<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,  $\beta$ -тиалита Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>, мулита Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> и силиката фаялитного типа FeSiO<sub>4</sub>, которые в результате спекания обуславливают образование тонкопленочных гетерогенных поверхностных структур, микротвердость при этом составляет 21-23 ГПа,

при исходной — до  $19 \pm 0,5$  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 FeAl<sub>2</sub>-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.

С энергетической точки зрения данную трансформацию вторичных структур можно рассматривать в качестве адекватных элементарных механизмов адаптации поверхностных слоев в процессе

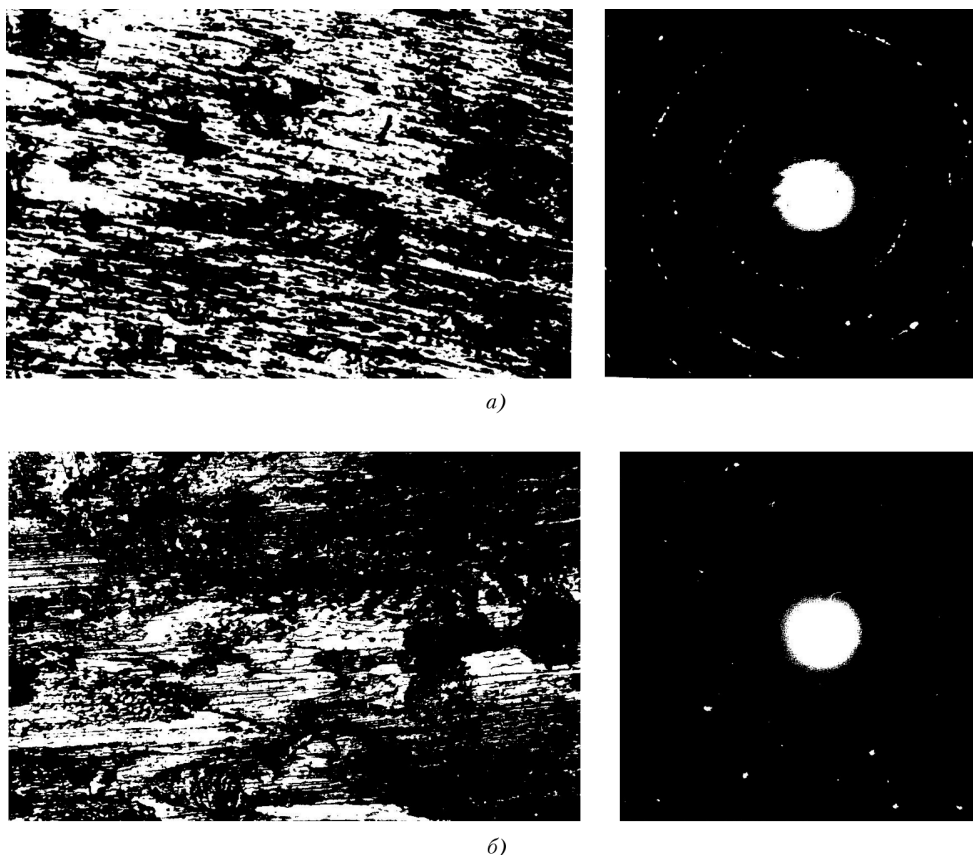


Рис. 6. Поверхности трения и электронограммы покрытий FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si, испытанных при температурах: а) 400 °C (x240); б) 550 °C (x28000)

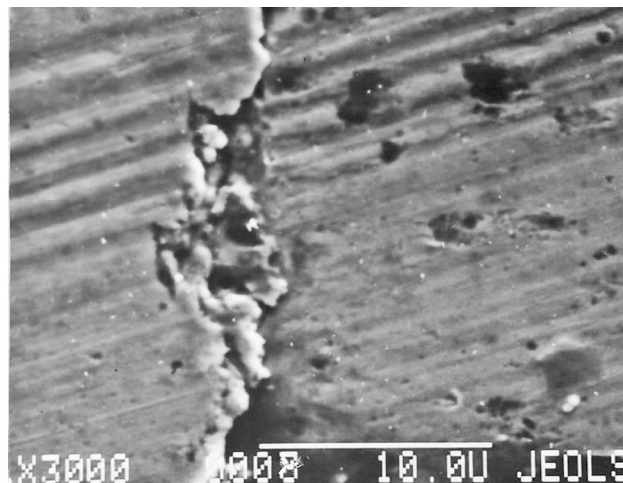
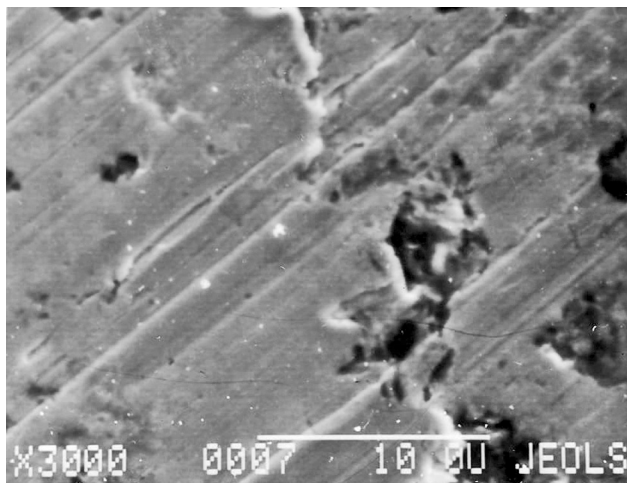


Рис. 7. Поверхности трения покрытия  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ , иллюстрирующие кинетику процесса разрушения, после испытаний при  $650\text{ }^\circ\text{C}$

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 мно-

гомерных дефектов активируют трибохимические реакции.

Но при достижении критического значения, которые для испытываемого покрытия (кривая 1) составляет  $\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$ , вызывает деструкционные процессы и обуславливает переход к недопустимым явлениям повреждаемости (рис. 7).

Для покрытий системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  (кривая 3) предельная критическая температура при данных условиях трения составляет  $\sim 680\text{ }^\circ\text{C}$ , у покрытий типа Ni-Cr-Al-B (кривая 2) диапазон нормального трения ограничен температурной  $\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ , а покрытия на основе WC (кривая 4) сохраняют работоспособность до  $530\text{ }^\circ\text{C}$ .

Тонкопленочный конгломерат оксидных фаз, препятствующий адгезионно-молекулярному взаимодействию контактных поверхностей, представляет собой сложный объект, интегральные свойства 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 FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si при понижении температуры монотонно уменьшается, а вблизи значения  $520\text{ }^\circ\text{C}$  скачок микротвердости, что происходит в результате твердофазного превращения FeO в более стабильный оксид Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 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 диффу-

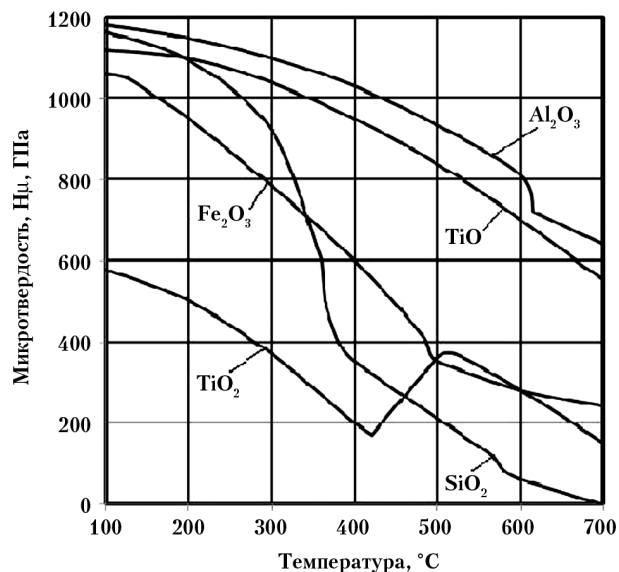


Рис. 8. Зависимость микротвердости оксидных структур на поверхностях трения детонационных покрытий от температуры

зионную активность как кислорода, так и других элементов, включая железо. Микротвердость гематита  $Fe_2O_3$  при повышении температуры уменьшается и имеет место скачок микротвердости вследствие полиморфного  $\beta \rightarrow \alpha$  — превращения. При охлаждении гематита с выдержкой в момент изменения микротвердости наблюдается скачкообразное понижение микротвердости до значений, совпадающих со значениями микротвердости магнетита  $Fe_3O_4$ , более рыхлого и менее плотного, чем  $\gamma-Fe_2O_3$ . 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 диоксида 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.

Диоксид титана  $TiO_2$  претерпевает полиморфное превращение при  $500^\circ C$ , причем увеличение микротвердости в момент превращения свидетельствует о переходе менее плотно упакованной кристаллической решетки брукита (ромбической) в более плотноупакованную тетрагональную решетку рутила. Микротвердость диоксида титана при растворении в нем железа почти не изменяется.

При введении в качестве легирующей присадки в состав детонационных покрытий кремния на поверхности трения образуется диоксид, которая в исследуемом температурном диапазоне претерпевает два полиморфных превращения, первое при  $500^\circ C$  и второе при  $700^\circ C$ . Рентгенофазовым анализом установлено, что в первом случае низкотемпературный  $\beta$ -кварц превращается в высокотемпературный  $\alpha$ -кварц.

Микротвердость образующихся на поверхностях трения оксидных пленок трехвалентных металлов в данном случае  $Fe_2O_3$  и  $Al_2O_3$  при повышении температуры уменьшается, однако вблизи  $550-600^\circ C$  кривая изменения микротвердости  $Al_2O_3$  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  $FeAl_2-Ti-Si$  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  $FeAl_2-Ti-Si$ , которые в воздушной среде при отсутствии смазки в условиях высокотемпературного трения показали высокие значения износостойкости, не уступающие таковым для покрытий на основе никрома, 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  $\beta$ -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  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ , 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. Сопrotивление износу детонационных покрытий системы  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$  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.

[3] Wang C. Self-formed pencil-like bulk composite materials consisting of copper alloy and stainless steel / C.Wang, X.Lin, I. Ohnuma et al.// J. Matter. Res. — 2008.- vol.23, №4.- p. 933-940

[4] Полота́й В.В. Машина трения М-22ПВ / В.В. Полота́й // — К.: ИПМ. — 1995. — С. 20.

[5] Susuki K. Reactive diffusion between Ag and solid state temperatures/ Ken Susuki, Satoru Kano, Masanori Kajihara et al.// Mat. Trans.2005.-Vol.46, №5. — p. 969-973

[6] Андрущенко Н.С. Математическая обработка данных микрорентгеновского анализа / Н.С. Андрущенко // 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] Li Yan. Effect microstructure and mechanical properties of ultrafine grade./ Yan Li. Ming Lin, Chunlan Rong// Int.I. Retract. Met. Hard Mater.- 2008.- Vol.26.-p.190-196

[9] Владимиров В.И. Физика износостойкости поверхности металлов / В.И. Владимиров // — Л.: ФТИ. — 2001. — С. 252.

[10] Kogut L. Analysis of the spherical indentation cycl for elastic-perfectly plastics solid/ L. Kogut, R. Komvopoulos // J.Matter. Res.-2004.-Vol.19, №.12 — p. 364-373

*Babak V.P.<sup>1</sup>, Lisovoy E.N.<sup>2</sup>, Mirnenko V.I.<sup>3</sup>, Shchepetov V.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Institute for Technical Termal Physics, National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> State Aviation Enterprise "Ukraine". Ukraine, Kiev

<sup>3</sup> National University of Defence of Ukraine. Ukraine, Kiev

#### WEAR-RESISTANT $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ DETONATION SPRAY COATINGS UNDER FRICTION LOADING AT ELEVATED TEMPERATURES

*The investigation results of friction and wear of the developed detonation composite coatings  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$  under high-temperature friction conditions are presented. The choice of  $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$  composition and its optimal content for spraying of wear-resistant coatings loaded with friction under high-temperature conditions are justified. It is noted that the alloying elements at definite concentrations and technological parameters of spraying have positive influence on structure, properties and quality assurance of multicomponent coatings. It is shown that the introduction of silicon and boron promote the formation of hard-alloy high-temperature compounds with increased wear resistance. The maximum microhardness corresponds to the Cr-Si coatings with ~28% titan content. Besides, the mechanical properties of the obtained material are improved by additional*

*alloying of ~22% silicon. In turn, the coatings plating at working gas flow rate in a ratio for acetylene ~ (20/25) l/min and oxygen ~ (22/27) l/min provides the chemical composition and spraying process parameters permanence as well as constant properties of coatings. The obtained results show that for the coatings of FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si system at loading 5.0 MPa, sliding speed 1.5 m/s and temperature up to 650 °C the stable performance of structural adaptability, which provides the friction and wear parameters minimization, is demonstrated. The metallographic analysis and strip chart recording of specimens indicate that the friction surfaces are characterized with the absence of visible defects; the separate cold-welded regions are located in thin-film surface layers. The composition, structure and tribological durability of coatings produced from the elements of resource base of the country were studied; their high adhesion, physical and mechanical characteristics and wear resistance under high-temperature conditions were defined. The thin-film surface structures pattern and properties were investigated with the help of modern physical and chemical methods of analysis. It was determined that the combination of mechanical, physical and chemical properties of the investigated coatings provides wide opportunities for their usage as effective materials under high-temperature wear conditions. According to the test results, the application of the investigated composite coatings for friction units efficiency improvement provides their operational reliability in accordance with requirements and opportunities that appear with the development of a new competitive material for wear-resistant coatings obtained with the help of detonation method.*

*Keywords:* detonation coating; wear resistance; surface layer; structural adaptability; temperature.

### References

- [1] Lisovoy E.N. Soprotivlenie iznosu detonacionnyh pokrytij sistemy FeAl<sub>2</sub>-Ti-Si pri trenii bez smazki / E.N.Lisovoy // Problemy tehniki. – 2012. – No 4. – pp. 46 – 54.
- [2] Kosteckij B.I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / B.I. Kosteckij, I.G. Karaulov i dr. // – K.: Tehnika. – 1976. – 296 p.
- [3] Wang C. Self-formed pencil-like bulk composite materials consisting of copper alloy and stainless steel / C.Wang, X.Lin, I. Ohnuma et al.// J. Matter. Res. – 2008. – vol. 23, №4. – p. 933-940
- [4] Polotaj V.V. Mashina trenija M-22PV / V.V. Polotaj // – K.: IPM. – 1995. – 20 p.
- [5] Susuki K. Reactive diffusion between Ag and solid state temperatures/ Ken Susuki, Satoru Kano, Masanori Kajihara et al.// Mat. Trans. 2005. – Vol. 46, №5. – p. 969-973
- [6] Andrijshhenko N.S. Matematicheskaja obrabotka dannyh mikrorentgenovskogo analiza / N.S. Andrijshhenko // Apparatura i metody rentgenovskogo analiza. – 1997. – No 17. – pp. 179–192.
- [7] Nosovskij I.G. Aviacionnoe materialovedenie / I.G. Nosovskij, V.V. Shhepetov // – K: KI VVS. – 1998. – 287 p.
- [8] Li Yan. Effect microstructure and mechanical properties of ultrafine grade./ Yan Li. Ming Lin, Chunlan Rong// Int.I. Retract. Met. Hard Mater. – 2008. – Vol. 26. – p. 190-196
- [9] Vladimirov V.I. Fizika iznosostojkosti poverhnosti metallov / V.I. Vladimirov // – L.: FTI. – 2001. – 252 p.
- [10] Kogut L. Analisis of the spherical indentation cycl for elastic-perfectly plastics solid/ L. Kogut, R. Komvopoulos // J.Matter. Res. – 2004. – Vol. 19, №.12 – p. 364-373