

В.И. МИРНЕНКО

Национальный университет обороны Украины им. Черняховского

Е.Н. ЛISOVOY

Государственное авиационное предприятие «Украина»

С.С. БЫС

Хмельницкий национальный университет

ТРЕНИЕ И ИЗНОС ГЕТЕРОГЕННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДУЮ СМАЗКУ, В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

Наведено результати експериментальних досліджень у вакуумі характеристик тертя та зношування детонаційних покриттів $FeAl_2-Ti-Si$, які у складі містять структурно вільний дисульфід молибдену. Вивчено закономірності тертя досліджуваних покриттів, надано порівнювальні результати їх опору зносу з аналогічними даними детонаційних покриттів типу ВК15 та зразків, що зазнали дифузійного зміцнення.

Ключові слова: детонаційні покриття, зносостійкість, поверхневі шари, структурна пристосованість, дисульфід молибдену, вакуум.

V.I. MIRONENKO

National University of Defense of Ukraine, Chernyakhovsky

E.N. LISOVY

State Aviation Enterprise "Ukraine"

S.S. BYS

Khmelnytsky National University

FRICITION AND WEAR OF HETEROGENEOUS DETONATION COATINGS CONTAINING SOLID LUBRICANTS IN A VACUUM

Abstract – Wear resistance of detonation alloyed $FeAl_2-Ti-Si$ coatings in vacuum is studied in the aspect of the possibility to be improved due to introduction of dry-film lubricant MoS_2 into the initial powder. Molybdenum disulphide in the coating material, favors formation of the protective film in vacuum. This film effectively screens the contacting surfaces preventing from the adhesive interaction, which delays wearing and impedes development of adhesion. Such coatings can be used in friction units operating under vacuum conditions.

Keywords: detonation coating, wear resistance, surface layers, structural adaptability, molybdenum disulphide, vacuum

Вступление. Одним из направлений отечественного триботехнического материаловедения является использование недорогостоящих и недефицитных компонентов из ресурсной базы страны для разработки конструкционных материалов с существенным улучшением их структуры и повышением физико-механических свойств, в том числе и материалов покрытий.

Несмотря на достигнутые результаты, решение проблемы повышения эксплуатационной надежности и динамической долговечности пар трения за счет применения функциональных покрытий отстает от требования практики. При этом особенно важными остаются вопросы обеспечения их износостойкости и поверхностной прочности в экстремальных условиях эксплуатации, к которым относятся не только предельно высокие нагрузки и скорости перемещения, но и влияние окружающей среды, в частности, вакуума, где применение традиционных смазок ограничено [1].

В научной литературе нет достаточного количества обоснованных сведений о влиянии отдельных структурных составляющих композиционных порошковых материалов на прочностные свойства детонационных покрытий. И практически отсутствуют данные, отражающие влияние дисульфида молибдена на износостойкость детонационных покрытий в условиях вакуума. До настоящего времени основным способом разработки покрытий остается эмпирический поиск зависимостей состав-свойства.

В летательных аппаратах к деталям, подвижные сопряжения которых в процессе эксплуатации при нагружении трением подвергаются изнашиванию, приводящему к повреждаемости вследствие заедания и схватывания, относятся работающие в условиях разреженной атмосферы подшипники, зубчатые и фрикционные передачи, направляющие скольжения, торцевые опоры, пары с возвратно-поступательным перемещением, шарнирно-болтовые сопряжения, детали систем управления [2]. Обслуживание и поддержание их эксплуатационной готовности является одной из важнейших инженерно-технических задач систем обслуживания и ремонта авиационной техники [3].

Цель работы. Анализ результатов испытаний в условиях вакуума разработанных детонационных покрытий системы $FeAl_2-Ti-Si$, которые дополнительно содержат в качестве антифрикционного компонента добавки твердой смазки виде диспергированного дисульфида молибдена.

Методика исследований. Материалы для напыления готовили по методике, изложенной в работе [4]. Частицы твердой смазки, соответствующие фракциям 3-10 мкм, смешивали мокрым способом с исходными металлическими порошками, затем смесь сушили, до полного удаления влаги. Детонационно-газовое покрытие осуществлялось по технологии и на оборудовании, разработанном в ИПМ НАНУ. Толщина напыленного слоя после обработки составляла 0,20-0,25 мм, шероховатость $R_a=0,63-0,32$, прочность сцепления с основой $\sigma_{сц}=87,5$ МПа. Испытания в условиях вакуума проводились на установке

предназначенной для лабораторно-экспериментальной оценки триботехнических характеристик и контроля качества триботехнических материалов [5]. Исследование поверхностной прочности покрытий при трении, их склонность к схватыванию и степень трибоактивации оценивались по интенсивности износа в вакууме (при разрежении $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па). Характеристики трения и изнашивания исследуемых композиционных покрытий сравнивались с аналогичными значениями характеристик широкого применения износостойких покрытий типа VK15 и поверхностных слоев, полученных в результате диффузионного легирования бором, ванадием и хромом.

Результаты исследований и обсуждения результатов. При сравнении с данными испытаний покрытий в условиях нормального атмосферного давления [6] с результатами исследования их износостойкости в вакууме, следует отметить, что в связи с увеличением разрежения воздуха и уменьшением пассивирующей способности среды проявляются качественные отличия закономерностей трения, которые обуславливают значительные количественные изменения триботехнических явлений, протекающих в контактной зоне.

Результаты испытаний представлены на рисунке 1 в виде зависимостей интенсивностей изнашивания как функции значений скорости скольжения при нагрузке равной 2,5 МПа, позволяющей максимально приблизить процессы физико-химической механики трения к реальным условиям эксплуатации.

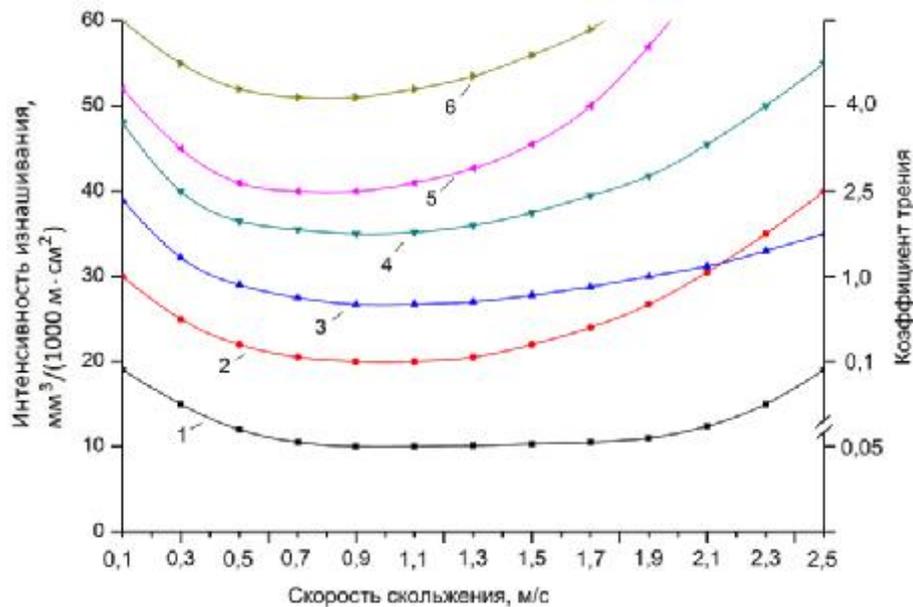


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости скольжения ($P=2,5$ МПа): 1 – покрытие FeAl₂-Ti-Si-MoS₂, 2 – покрытие твердого сплава VK15, 3 – ванадиевые образцы, 4 – хромовые образцы, 5 – покрытие FeAl₂-Ti-Si, 6 – борированные образцы.

Высокая износостойкость при данных условиях трения покрытий FeAl₂-Ti-Si-MoS₂, (кривая 1) обусловлена структурной приспособляемостью, которая как универсальное явление реализуется, во-первых, за счет структурно-свободного дисульфида молибдена, который обеспечивает в процессе трения создание защитной пленки (рис. 2.). Данные металлографического анализа и изучение поверхностей трения подтверждают наличие пассивирующей твердофазной смазочной пленки дисульфида молибдена, препятствующей адгезионному взаимодействию ювенильных поверхностей, при этом отдельные очаги разрушений локализируются в тонких приповерхностных слоях и аннигилируют в процессе зернограничного скольжения исключая любые виды повреждаемости.

Во-вторых, склонность покрытия к пассивации обеспечивается протеканием в данных условиях трения диффузионных и трибохимических реакций компонентов с образованием ультрадисперсных фаз (рис. 3).

На представленной микродифракционной картине от поверхности трения видны кристаллические области – электронограмма содержит четкие рефлексы, соответствующие мелкокристаллической ориентированной структуре. При изучении характера и закономерностей образования поверхностного слоя, обуславливающего сопротивление износу, было установлено, что он представляет композиционную тонкодисперсную квазислоистую структуру на основе MoS₂, армированную интерметаллидами Ti₃Al, Fe₃Si, Fe₂Al₅, Ti₅Si₃, кроме того халькогенид молибдена в результате трибохимического взаимодействия с деформационным поверхностным слоем образует сульфиды FeS, TiS, что создает благоприятные предпосылки к существенному повышению износостойкости и, как установлено, увеличение несущей способности.

Изменение структуры твердофазных поверхностных пленок вызывает изменение коэффициента трения, который во всем диапазоне испытания (рис. 1.) составляет 0,05-0,09. По мнению авторов в данных

условиях значения коэффициента трения являются не столько функцией нормальной нагрузки, сколько функцией трибофизических процессов, возникающих в результате аддитивного сочетания нагрузки, скорости скольжения, температуры и обобщенного вектора параметров трения (материалов, среды, условий и т.п.). Таким образом, твердосмазочная поверхностная пленка или активный подповерхностный слой, кроме антифрикционного действия обладает и антикоррозионными свойствами, что в данных условиях трения обеспечивает высокую стойкость покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si-MoS}_2$ против износа в вакууме.

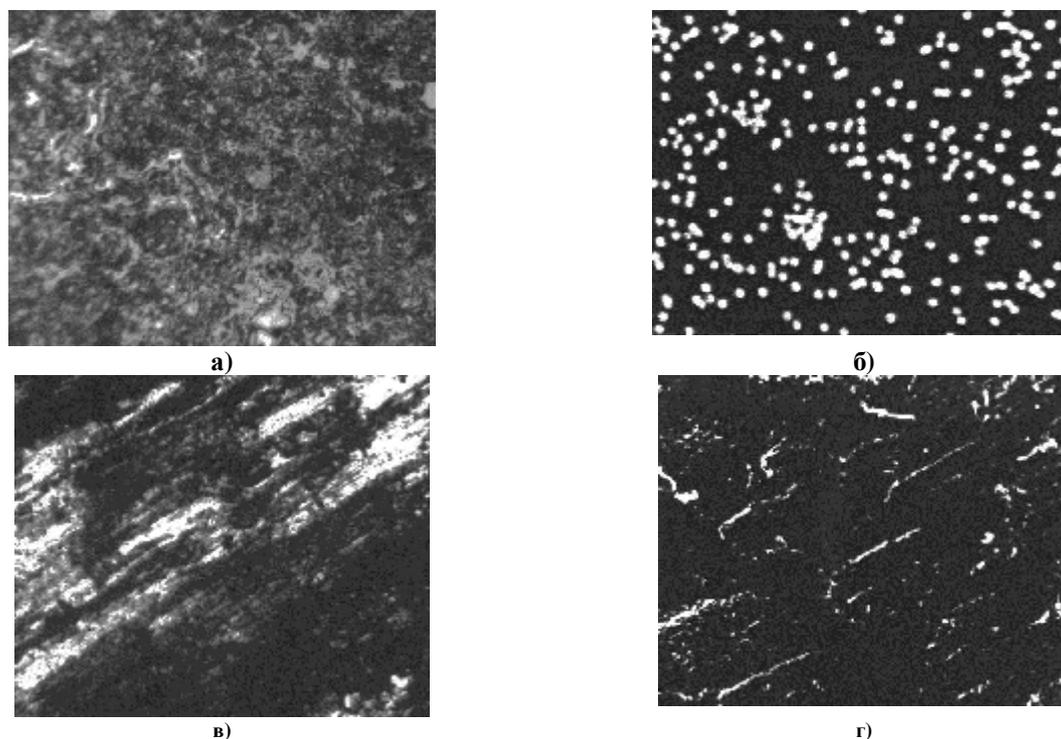


Рис. 2. Поверхность трения покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si-MoS}_2$: а) исходное состояние, б) структура в рентгеновском излучении MoS_2 K_{α} , в) после испытаний на трение при $V=0,3$ м/с, $\times 320$, г) после испытаний на трение при $V=2,3$ м/с, $\times 320$.

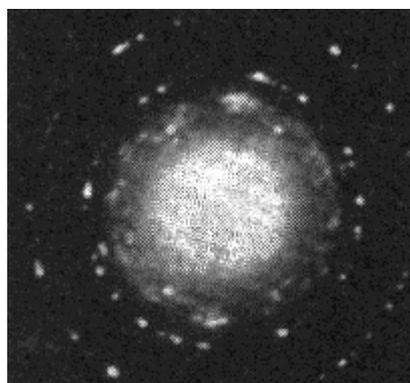


Рис. 3. Электронограмма от поверхности трения покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si-MoS}_2$, испытанных при $V=1,5$ м/с, $P=5,0$ МПа.

Для покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, в составе которых отсутствует дисульфид молибдена (кривая 5), характер изменения интенсивности изнашивания и зависимость коэффициента трения от скорости существенно изменяется.

С целью изучения поверхностного слоя, в котором протекают процессы активирования, использован электронографический анализ, выполненный на установке типа ЭРМ (съемка на отражение при $U=35$ кВ). Электронограмма (рис. 4.), фиксирующая изменение тонкой структуры, показывает, что в поверхностном слое происходит диспергирование с измельчением кристаллитов, о чем свидетельствует наличие максимумов интенсивностей на диффузионных ореолах. Исследуемый тонкопленочный объект представляет ультрадисперсную ориентированную структуру тонкого поверхностного слоя, соответствующего $1000\text{-}5000$ Å.

Необходимо отметить, что для покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ при скоростях скольжения менее $0,9$ м/с имеют место минимальные параметры трения. Износостойкость покрытий обеспечивается при этом созданием разделяющего ювенильные поверхности тонкопленочного объекта, представляющего собой продукт бескислородных структур на основе металлических фаз химических элементов, входящих в состав покрытия, природа организации которых в условиях дефицита кислорода, по нашему мнению связана, с фазовыми превращениями, когда в результате механотермического легирования и фрикционной закалки

формируются безкислородные поверхностные структуры по механизму образования и свойствам близкие к строению мартенситных фаз. При этом поверхностные структуры, образованные в экстремальных температурно-временных и нагрузочных условиях по мартенситному механизму, по механическим свойствам отличаются от свойств мартенсита закалки, полученного традиционной термообработкой. Так, твердость мартенсита после термической обработки составляет $\sim 7,5-9,5$ ГПа, а соответствующие значения для мартенситных структур, образованных на поверхностях трения, достигают $\sim 10,5-13,5$ ГПа.

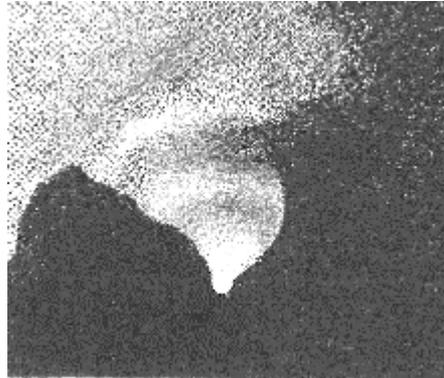


Рис. 4. Электронограмма от поверхности трения покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$.

При скоростях испытаний более 1,0 м/с нарушается термодинамический баланс системы трения и происходят необратимые изменения свойств твердофазной поверхностной пленки в результате деструкции и распада поверхностного мартенсита, что приводит к утрате защитных функций тонкопленочного объекта и потере экранирующей способности. Ведущим видом изнашивания покрытий становится развивающийся процесс схватывания. На рисунке 5 представлена кинетика разрушения поверхностных слоев покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ в зависимости от скорости испытаний.

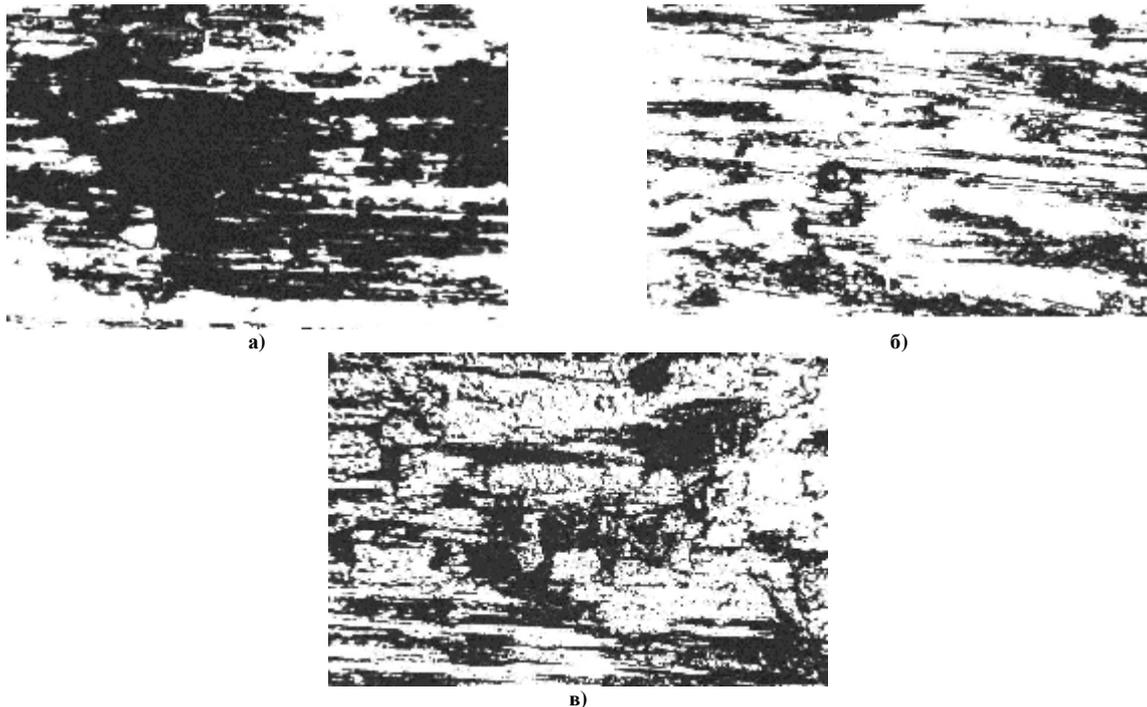


Рис. 5. Поверхность трения покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, испытанного при (x320): а) 0,9 м/с, б) 1,3 м/с, в) 1,7 м/с ($P=2,5$ МПа).

Высоким сопротивлением износу обладают покрытия, напыленные порошком твердого сплава типа ВК15 (кривая 2). Как известно, покрытия ВК15 представляют собой классическую структуру антифрикционного материала [7]. Повышенная износостойкость твердосплавных покрытий обусловлена как природой входящих в них компонентов, так и структурой. Однако при скоростях скольжения более 1,0 м/с на стойкость покрытий начинает оказывать влияние температура как основной сильнодействующий рабочий параметр [8].

Из образцов, подвергнутых диффузионному легированию, наименьший износ соответствует ванадированным поверхностям трения (кривая 3), что связано с образованием рабочего слоя, насыщенного карбидами ванадия, характеризующегося высокими механическими свойствами, в частности твердостью и тугоплавкостью [9], причем наряду с карбидами VC образуются карбиды V_2C , обладающие гексагональной

плотнупакованной кристаллической решеткой, кроме того в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, также способствующие повышению прочности.

Характер изнашивания стальных образцов, упрочненных путем термодиффузионного хромирования (кривая 4), аналогичен общим закономерностям изнашивания ванадированных сталей. Повышенные значения износа хромированных образцов обусловлены склонностью к схватыванию, вызванной сравнительно высокой поверхностной прочностью при трении в вакууме [10].

Выводы. Трудности получения и накопления методически оправданных и статически достоверных триботехнических исследований сдерживают разработку и внедрение покрытий и представляются на сегодня актуальной частью общей проблемы повышения надежности и ресурса в машиностроении.

Основное влияние на развитие прикладных аспектов науки оказывают требования практики. Разработанные для нужд практики исследуемые детонационные покрытия $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si-MoS}_2$ показали высокие триботехнические характеристики во всем диапазоне испытаний, моделирующих работу узла трения в условиях разреженной атмосферы. При этом средством регулирования износа и обеспечения высокой антифрикционности покрытий в вакууме является применение в их составе твердосмазочного материала, через структуру оказывающего влияние на уровень адаптации при трении за счет модификации поверхностных слоев, способных блокировать разрушение и экранировать недопустимые процессы схватывания.

В заключении отметим, что разработка триботехнических материалов покрытий на базе ресурсно-сырьевых возможностей страны и испытания с целью определения их оптимальных технико-экономических условий применения, является необходимостью технического и социального развития общества.

Литература

1. Носовский И.Г. Влияние газовой среды на износ металлов / И.Г. Носовский . – К.: Техника, 1988. – 179с.
2. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов / Д.Н. Гаркунов, А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1989. – 200с.
3. Кудрін А.П. Ремонт повітряних суден та авіаційних двигунів/ А.П. Кудрін, Г.М. Зайвенко, Г.А. Волосович, В.Д. Хижко. – К.: НАУ, 2003. – 491с.
4. Лисовой Е.Н. Износостойкость детонационных покрытий $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, содержащих дисульфид молибдена / Е.Н.Лисовой, В.И.Мирненко, С.С.Бысь // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – №3. – С.124-129.
5. Полотай В.В. Машина трения М-22ПВ / В.В. Полотай. – К.: Знание, 1988. – 20с.
6. Лисовой Е.Н. Сопротивление износу детонационных покрытий системы $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ при трении без смазки / Е.Н. Лисовой // Проблемы техники. – 2012. – №4. – С. 46-54.
7. Зверев А.И. Детонационное напыление покрытий / А.И. Зверев, Ю.С. Шаривкер, Е.А. Астахов. – Л.: Судостроение, 1979. – 230с.
8. Носовский И.Г. Износостойкость детонационных покрытий в экстремальных условиях/ И.Г. Носовский, В.Х. Кадыров, В.В. Щепетов. – К.: Техніка, 1986. – С. 46-51.
9. Носовский И.Г. Исследование трения и изнашивания некоторых диффузионных и детонационных покрытий в вакууме / И.Г. Носовский, В.В. Щепетов. – Трение и износ. – 1986 . – №5. – С.796-800.
10. Носовский И.Г. Влияние борирования хромомарганцовистокремниевых сталей на их износостойкость при трении в вакууме / И.Г. Носовский, Е.А. Миронов. – Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техніка, 1988. –С.48-50.

Рецензія/Peer review : 15.10.2015 р.

Надрукована/Printed : 1.11.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією