УДК 621.891

С. Д. Недайборщ, ассистент
В. В. Щепетов, д-р техн. наук, проф.,

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВМЕСТИМОСТИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Национальный авиационный университет, vrkk@ukr.net

Исследованы в широких нагрузочно-скоростных диапазонах триботехнические характеристики совместимости детонационных покрытий системы Pr-Si-B с антифрикционными и конструкционными материалами

Вступление. Отказы при эксплуатации кинематических пар вследствие деструкции материалов по эпюрам неравномерного износа в современных машинах могут достигать более половины от их общего количества, то есть, явления, происходящие в контактной зоне рабочих поверхностей, оказывают первостепенное влияние как на безотказность, так и на долговечность машин и механизмов. Таким образом, физической основой разработки оптимальных пар является обеспечение их совместимости как способности трущейся пары в заданных условиях эксплуатации приспосабливаться в процессе взаимного перемещения, обеспечивая заданную долговечность. И решением первоначальной задачи, обеспечивающей эксплуатационную надежность современных механизмов, работающих в условиях трения, становится комплексное исследование таких достижений физической химии и поверхностной прочности, как катализ, теория полупроводников в связи с адсорбцией, теория дислокаций, химия поверхности твердого тела, триботехническое металловедение.

Внедрение перспективных материалов и технологий сегодня не мене важно, чем их создание, при этом главным является прикладной эффект, получаемый от них в технике.

Цель работы. Экспериментальные исследования триботехнических характеристик детонационных покрытий системы Cr-Si-B в парах трения с материалами типа БрО10Ц2, которые используют, как правило, для арматуры высокого давления, шестерен, дисков, втулок и т.п., а также БрАЖ9-4, получивший распространение в

авиационной технике для изготовления упорных колец, опорных пят, секторов управления, втулок, зубчатых колес, клапанов и т.п. Кроме того для определения совместимости материалов были испытаны образцы из авиационной стали 30ХГСНА и применяемых в машиностроении с сталей 45 и азотированной типа 38ХМЮА.

Выбор в качестве объекта исследования данных материалов не является случайным. С одной стороны, это характерные представители обширных классов, различных как по типу, так и по структуре, в которых наблюдаются все типичные процессы, с другой – именно в этих материалах, на наш взгляд, основные свойства выражены наиболее отчетливо. Также путем оптимизации технологического процесса формирования детонационных покрытий исследуемой системы, была достигнута возможность получения их стабильного качества (варьирование прочностных и пластичных характеристик в напыляемых образцах одной партии – 5–10%) [3]. Таким образом, кроме непосредственного контроля качества покрытий осуществлялась заданная технологичность процесса напыления, неизменность которых гарантирует постоянство их свойств.

Методика исследований. Раскрытие взаимосвязи между свойствами материалов в условиях трения, их структурой, влияние внешних факторов, определяющих надежность и работоспособность трибосистем, обусловлено ведущей ролью методов исследования. Возможности используемых методик и аппаратуры во многом определяют глубину и достоверность представлений о процессах, протекающих при взаимодействии сопряженных поверхностей.

Изучение физико-химических свойств, микрофазовый анализ поверхностных слоев, обуславливающих закономерности активации, интенсификацию протекания 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 [1]. Металлографические исследования выполняли на микроскопе МИМ-8. Триботехнические свойства испытываемых материалов оценивали при торцевом трении модельных образцов в условиях распределенного контакта ($К_{вз}$=1) по методике, изложенной в работе [2].

Результаты исследования и их обсуждение. Главным фактором, от которых зависят закономерности, определяющие протекание процессов трения и изнашивания в контактной зоне исследуемых материалов, являются внешние воздействия (скорость скольжения, давление). Они обуславливают степень и градиенты упругопластической деформации, температуру, уровень активирования, ряд производных явлений и в конечном счете определяют ведущий вид износа.

Анализ результатов влияния скорости скольжения на интенсивность изнашивания (рис. 1.) испытываемых материалов показывает, что сопротивление износу пар трения с покрытием Cr-Si-B практически одинаково, хотя интенсивность изнашивания покрытий с алюминиевой бронзой несколько ниже, во всем диапазоне скоростей скольжения, ведущим у них является механохимический износ. Характерные микрофотографии поверхностей трения детонационных покрытий, напыленных порошком Cr-Si-B представлены на рис. 2.

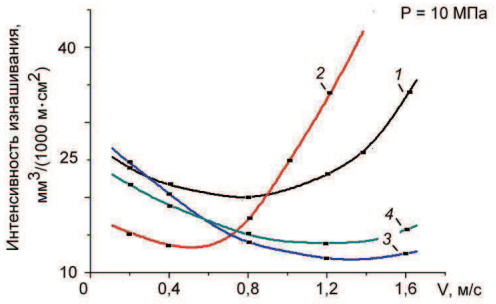


Рис. 1. Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от скорости: *1* – 30ХМЮА – сталь 45; *2* –30ХГСНА – сталь 45; *3* – Cr-Si-B – 30ХГСНА; *4* – Cr-Si-B – 38ХМЮА

Нормализация их процессов терния и изнашивания является следствием термодинамической природы и способностью при данных условиях спонтанно организовать устойчивые упорядоченные состояния вторичных структур, которые по результатам исследований, представляют собой сложный трудноактивируемый комплекс в виде соединений типа шпинелей на основе оксидов металлов, входящих в состав материалов трения. Электронно-

микроскопические исследования подтвердили характерную особенность поверхностных пленок, которые представляют конгломераты субмикрообъемов сложного фазового состава. Следствием этого является изменение диапазона микротвердости. Структура поверхностных пленок настолько мелкодисперсна, что представляет возможным получит отпечаток индентора строго на отдельных фазах и можно говорить только об усредненных значениях микротвердости в результате большого числа измерений (рис. 3).

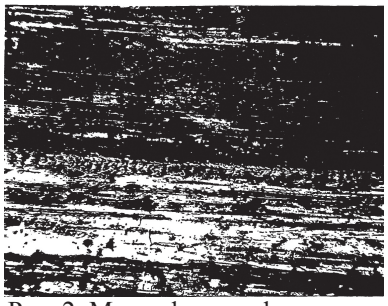


Рис. 2. Микрофотография поверхностей трения детонационных покрытий, напыленных порошком Cr-Si-B (×320)

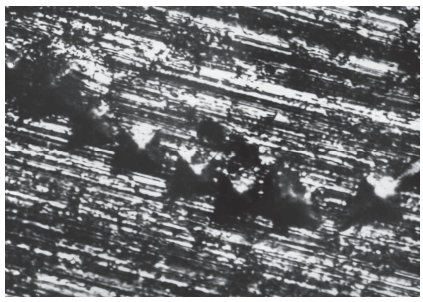


Рис. 3. Микрофотография поверхности трения (×320)

Кроме того, наличие борного ангидрида (B_2O_3), который образуется при взаимодействии высших боридов хрома и кислорода среды и являющегося химически активной формой борной кислоты, превращает оксиды метолов в метабораты типа $Cr(BO_2)_3$, что способствует образованию вязкой плотной «глазури». Также установлено присутствие пленки, состоящей из двух слоев, определяемых как металлографическим так и рентгенографическим анализом, непосредственно приповерхностный слой представляет гексагональный нитрид хрома (Cr_2N), последующий - твердый раствор N в оксиде Cr_2O_3 без определенной структуры, кроме того, самоорганизация поверхностных структур выражается в образовании изомерных оксидов Al_2O_3-Cr_2O_3 и термостабильного SiO_2. Как установлено комплекс структур, обуславливаемых приспосабливаемость при нагружении тернием обладает экстремальными свойствами и экранирует основной материал сопряжений от непосредственного контакта и разрушения.

Механизм образования вторичных структур данного типа обусловлен протеканием пластической деформации в результате чего изменяется структура поверхностного слоя. Дальнейшее образование вторичных структур, по мнению авторов, можно представить как процесс аморфизации механического легирования, включающего диспергирование материалов поверхностей, разлом дисперсоида с частицами оксидов, интерметаллидов и преобразование этих ультрадисперсных поверхностных фаз под действием локальных температур и давлений в новую ультрадисперсную структуру. О чем свидетельствует электронограмма (рис. 4.), имеющая максимумы интенсивностей на диффузионных ореолах.

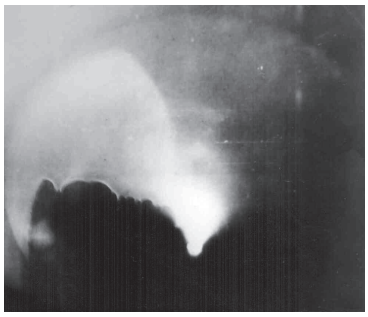


Рис. 4. Электронограмма поверхностного слоя (×650)

Отличительная особенность, которой заключается в том, что в частицах наноразмеров поверхностные слои атомов создают избыточные давления [4]. Это существенно искажает кристаллическую решетку, влияет на энергию активирования [5] и в итоге структура характеризуется комплексом новых свойств, определяющих высокие антифрикционные характеристики трущейся пары. При этом были проанализированы цифровые карты распределения химических элементов по площади (рис. 5.), полученные результаты подтверждают данные теоретических и экспериментальных исследований и находятся в соответствии с современными представлениями о природе дисперсного состояния.

Микроструктура сечения покрытий, напыленных композиционными порошками системы Cr-Si-B, представлена на рис. 6. Как видно покрытие копирует рельеф, прилегание к подложке достаточно плотное. Прочность сцепления определялась на специальных образцах [5].

При металлографическом анализе сечение напыленного слоя пленки оксидов, шлаковых включений и других загрязнений на деформируемых частицах не обнаружены, дефекты в виде пор, пустот и трещин не удалось выявить даже при ×1200. На шлифах отчетливо видны включения малодеформированных упрочняющих частиц.

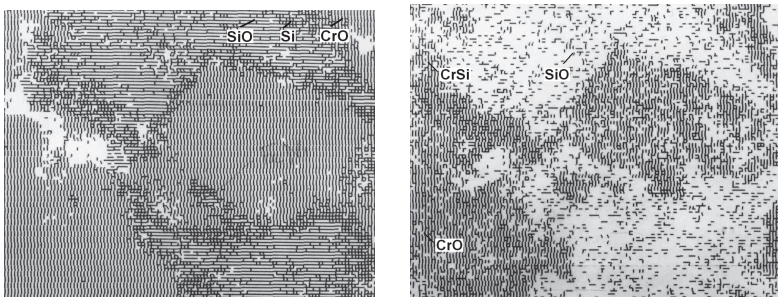


Рис. 5. Цифровая карта распределения химических элементов по рабочей поверхности рабочего образца

Реализуя разработанную схему приготовления композиционных порошков и управления технологическими параметрами напыления, удалось воздействовать на уровень дисперсности структуры покрытий, при этом, как показали исследования, меняются как размеры упрочняющих фаз, так и расстояния между фазовыми составляющими, что в свою очередь оказывает влияние на их поверхностную прочность при трении [6].

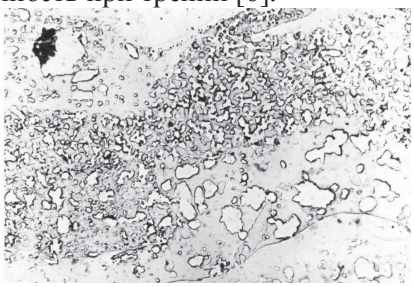


Рис. 6. Микроструктура сечения покрытия Cr-Si-B (×650)

Таким образом, результатом эволюции процессов механохимического изнашивания при оптимальной согласованности уровней активирования и пассивации, основу которых составляют кооперативные действия, адаптирующиеся к данным условиям де-

формационных, тепловых, диффузионных и химических реакций, является образование мелкодисперсных гетерофазных, устойчивых вторичных структур, обладающих высокими износостойкими свойствами. Можно отметить, что по своему строению исследуемые поверхностные тонкопленочные объекты близки к структуре дисперсно-упрочненного композиционного материала. Как известно, такие материалы обладают уникальным сочетанием высокой пластичности и прочности, имеют высокую стабильность данных характеристик во времени [7].

Процессы, протекающие на контактах, существенно зависят от давления. На экспериментальных кривых (рис. 7) видно, что характерным для детонационных покрытий является незначительное увеличение износа с ростом нагрузки.

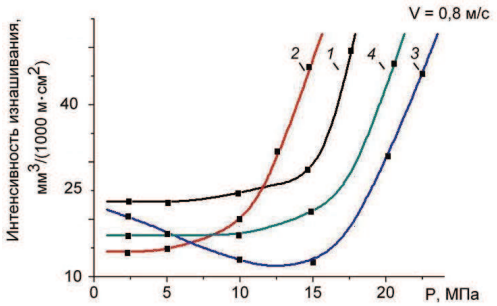


Рис. 7. Изменение интенсивности изнашивания в зависимости от нагрузки:
1 – 38ХМЮА – БрАЖ9-4; *2* –30ХГСНА – БрО10Ц2;
3 – Cr-Si-B – БрАЖ9-4; *4* – Cr-Si-B – БрО10Ц2

Такая высокая работоспособность покрытий обуславливается широким диапазоном структурной приспосабливаемости материалов при трении. Образование вторичных структур, экранирующих основной материал, происходит при наличии динамического равновесия процессов. Однако при дальнейшем повышении нагрузки до 17–19 МПа динамическое равновесие увеличивается в сторону повышения энергии активирования и процесс изнашивания качественно изменяется. Таким образом, повышение нагрузки приводит к тому, что взаимодействие процессов, характеризующих развитие пластической деформации при трении, и механизмов, сопутствующих фазовому наклепу, интенсивно стимулируют лавинообразное развитие очагов микросхватывания, и разрушении покрытий при

достижении $P_{кр.}$ происходит преимущественно путем растрескивания и выкрашивания поверхностного слоя (рис. 8.)

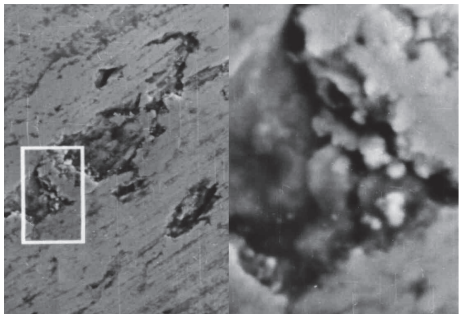


Рис. 8. Микрофотография поверхностей трения детонационных покрытий, напыленных порошком Cr-Si-B (×280, ×650)

Выводы. Таким образом, обобщая экспериментальные данные отметим, что эксплуатационная надежность в значительной мере зависит от состояния материалов в паре трения, от конструкции узла и внешних условий. Поэтому каждый новый материал должен иметь четко установленную область его применения. Кроме того, работоспособность узла трения зависит не только от состояния материалов, но и от применяемой смазки. Так в ряде случаев обоснованный выбор смазки явился решающим в надежности узла трения. Испытанные детонационные покрытия системы Cr-Si-B обладают высокими эксплуатационными свойствами, позволяющими использовать их в сочетании с антифрикционными и конструкционными материалами.

В дальнейших исследованиях номенклатура совместимых материалов с детонационными покрытиями, их режимы эксплуатации в различных средах будет непрерывно расширяться с целью определения технического паспорта с четким указанием их технико-экономических областей применения. Но уже сейчас, основываясь на полученных результатах, можно отметить, что использование покрытий системы Cr-Si-B сулит существенный экономических эффект и способствует уже в ближайшие годы повышению качества и долговечности машин и механизмов, снижению затрат на ремонтные работы, производство запасных частей и значительной экономии металлов.

Список литературы

1. *Андрющенко Н.С.* Математическая обработка данных микрорентгеноспектрального анализа / Н.С. Андрющенко // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. – 1985. – №17. – С.179 – 192.

2.*Носовский И.Г.* Повышение долговечности узлов трения за счет создания на их рабочих поверхностях износостойких покрытий / И.Г. Носовский, В.В. Щепетов // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1989. – №11. – С.83 – 89.

3. *Недайборщ С.Д.,* Математичне моделювання впливу технологічних та експлуатаційних факторів на формування детонаційних покриттів / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов, А.М. Петренко // Вісник ЧДТУ. – 2010. – №4. – С.166 – 172.

4. *Уайт Р.,* Дальний порядок в твердых телах / Р.Уайт, Т. Джебелл // М.: Мир. – 1999. – 446 с.

5. *Харламов Ю.А.,* Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю.А. Харламов, Н.А.Будигьянц // - Луганск: Из-во им. В.Даля. – 2003. – 496 с.

6. *Недайборщ С.Д.,* Зносостійкість детонаційних покриттів системи Cr-Si-B в умовах граничного змащування / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Проблеми техніки. – 2010. – №4. – С.39 – 47.

7. *Костецкий Б.И.* Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И.Костецкий, И.Г.Носовский, А.К.Караулов и др.// – К.: Техника. – 1976. – 296 с.

Недайборщ С Д., Щепетов В. В. **Фізичні аспекти сумісності детонаціних покриттів із триботехнічними матеріалами** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2011. – Вип. 55. – С.189–197.

Досліджені у широких навантажувально-швидкісних діапазонах триботехнічні характеристики сумісності детонаційного покриття системи Cr-Si-B з антифрикційними та конструкційними матеріалами.

Рис. 8, список літ.: 7 найм.

Physical aspects of the compatibility of detonation coatings with tribological materials

Tribological characteristics of the compatibility of detonation coatings of Cr-Si-B with anti-friction and structural materials are investigated over a wide load-speed range.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2011