

Гладкий Я.Н.*,
Харченко Е.В.,**
Щепетов В.В.***

*Хмельницкий национальный университет, г. Хмельницкий, Украина,

**Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина,

***Институт технической теплофизики НАНУ, г. Киев, Украина

ТРЕНИЕ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

УДК 620.178: 621.793

Приведены результаты испытаний в условиях граничного трения детонационных покрытий Zr-Al-B в широком диапазоне изменений условий трения.

Выполнен сравнительный анализ полученных характеристик трения и износа, с целью оценки триботехнических свойств аморфно-кристаллических покрытий. Полученные результаты сравнивались с параллельно испытанными покрытиями на основе карбида вольфрама типа ВК-15, образцами из закаленной стали 30ХГСНА, бронзы БрОЦС6-6-3 и подшипникового сплава АО-20.

Оценка качественного и количественного состава поверхностных слоев принимающих участие в условиях граничного трения, проводилась с помощью современных физических методов анализа. Представлены профилограммы и микрофотографии поверхностей трения аморфно-кристаллических покрытий показывающие, что в условиях граничного трения образцы покрытий выглаживаются и приобретают зеркальный блеск, что приводит к уменьшению шероховатости поверхности.

Установлено наличие образования твердых растворов внедрения кислорода в цирконии, что соответствует формированию на поверхностях трения вторичных структур первого типа, характерной особенностью которых является их поверхностная локализация, ультрадисперсное строение, способность минимизировать разрушение и экранировать недопустимые адгезионные явления. С применением оже-электронной микроскопии подтверждено, что кислород полностью замещает серу в поверхностных структурах.

Показано, что разработанные для практики исследуемые детонационные покрытия Zr-Al-B, имеют высокие триботехнические характеристики во всем диапазоне испытаний в условиях граничного трения. При этом, следует подчеркнуть что в результате исследований механизма трибохимических превращений углеводородов и свойств трансформированных поверхностных пленок, установлено, что они сохраняют смазочные свойства и обеспечивают высокие антифрикционные характеристики системы трения во всем широком диапазоне изменений условий граничного трения.

Ключевые слова: граничное трение, детонационное покрытие, изнашивание, адсорбционный слой, граничная смазка, активация поверхности.

Триботехнические процессы и явления проявляются в подавляющем большинстве машин и механизмов. Снижение сил трения и уменьшение их износа является одной из основных проблем техники.

Современные тенденции минимизации износа поверхностей, нагруженных трением, предусматривают и создание в контактной зоне смазочных пленок. В присутствии смазочной среды работоспособность подвижных сопряжений зависит от комплекса свойств масла и определяется режимом трения.

В условиях эксплуатации наиболее неблагоприятным является трение в условиях граничной смазки, которое остается наименее разработанным разделом физической проблемы смазки машин [1,2,3].

До настоящего времени теоретические и прикладные исследования смазочных материалов в условиях граничной смазки не прошли систематизированного и всестороннего обобщения. Не разработаны надежные методы идентификации физико-химических механизмов действия смазочных материалов. Кроме того, сведения об износостойкости аморфных покрытий в условиях граничной смазки носят, в основном, иллюстративный характер, систематические исследования в литературе отсутствуют. Попытка выделить общие закономерности изнашивания из частных зависимостей, которые получены на конкретных материалах при заданных условиях испытаний, свидетельствуют о том, что характер изменения химического состава и организации структуры в присутствии граничного слоя смазки в контактной зоне значительно многообразнее и сложнее, чем постулируется в современных гипотезах [4,5].

Существующие теоретические концепции не в состоянии непротиворечиво объяснить многообразие экспериментальных результатов.

Вместе с тем, анализ немногочисленных научно-технических источников и практического опыта позволяет констатировать, что задача минимизации износа и повышение ресурса деталей машин остается актуальной для современной техники и стимулирует развитие достижений современной инженерии поверхности в области трения, смазывающего действия и износа.

Целью работы является обобщение результатов испытаний на износ разработанных аморфно-кристаллических покрытий на основе циркония [6] и исследование механизма трения в режиме граничной смазки минеральным маслом МС-20.

Разработка аморфно-кристаллических покрытий системы Zr-Al-B для защиты узлов трения от износа обусловлена, с одной стороны, потребностями практики в создании на базе минерально-сырьевого потенциала страны материалов с высокими эксплуатационными трибохарактеристиками, не содержащих дефицитных и дорогостоящих компонентов, с другой, логикой развития области порошковой металлургии, а именно, расширение ассортимента высококачественных композиций для газотермического напыления. Использование минерального масла типа МС-20 в качестве смазки обусловлено как парком авиатехники, которая использует данный смазочный материал, так и широкими возможностями отечественной нефтепереработки по его производству.

Методика исследований

Испытания на трение и износ проводили на установке УМТ-1 в условиях граничной смазки маслом МС-20 по методике, изложенной в работе [7].

Триботехнические свойства покрытий оценивались на модельных образцах по схеме торцевого трения с коэффициентом взаимного перекрытия ($K_{вз}$) $\approx 0,5$ в условиях воздушной среды. Реализация режима граничного трения осуществлялась сконструированной системой смазки, работающей по замкнутому циклу, при этом скорость скольжения изменяли в диапазоне от 0,5 до 2,5 м/с, последовательное приложение нагрузки осуществляли в интервале 5,0-20 МПа.

Исследование процессов, инициируемых трением и изнашиванием аморфно-кристаллических покрытий, их глубина и достоверность определялись современными методами физико-химического анализа с учетом специфики решаемых задач. Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре Дрон-3М в $Fe_{K\alpha}$ излучении. Объемное содержание аморфной фазы определяли по методике, изложенной в работе [8] и основанной на разделении дифракционных отражений от аморфной и кристаллической фаз при сопоставлении площадей под кривыми интенсивности рассеивания рентгеновского излучения [9]. Электронно-микроскопические исследования осуществляли на электронном микроскопе SamScan. Исследования с применением оже-электронной спектроскопии поверхности проводили на оже-растровом электронном микроскопе типа JAMP-10S.

Металлографический анализ шлифов проводили на оптическом микроскопе МИМ-8. Состав травителей и режимы травления полированных образцов выбирали в соответствии с методическими рекомендациями [10]. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,49Н, прочность сцепления покрытий (толщина 250-300 мкм) с основой определяли по методике конусного штифта [11].

Для сравнительной оценки триботехнических свойств аморфно-кристаллических покрытий параллельно были испытаны по изопрограммам покрытия на основе карбида вольфрама типа ВК-15, образцы из закаленной стали 30ХГСНА, бронзы БрОЦС6-6-3 и подшипникового сплава АО-20 которые широко применяются в авиационной промышленности для деталей работающих в условиях граничной смазки [11,12].

Результаты исследований

Изучение механизма действия смазывающей среды при граничном трении остается весьма актуальным, так как еще нет научно обоснованных положений, разработанных до степени отвечающей требованиям практики производства и эксплуатации машин, работающих в условиях граничной смазки. Все это требует дифференцированного подхода к оценке влияния смазывающей среды на работоспособность деталей пар трения. Однако отправным началом для такой оценки служат результаты фундаментальных разработок в области теории смазки, молекулярной физики граничного трения и физико-химической механики материалов [13,14,15].

Основным фактором, определяющим характер изнашивания покрытий при граничной смазке, является наличие физически адсорбированных слоев, образующихся в результате активизации физико-химических процессов взаимодействия смазочной среды с рабочей поверхностью. Адсорбционный слой в системе трения выступает в роли смазочного материала. При этом различие применяемых смазочных сред состоит лишь в степени их эффективности образовывать прочные квазикристаллические граничные слои адсорбционного происхождения.

Результаты испытаний на износ аморфно-кристаллических покрытий в парах трения с образцами из конструкционных и антифрикционных материалов, а также детонационным вольфрамсодержащим покрытием в условиях граничной смазки представлены на рис. 1.

Полученные результаты исследований позволяют однозначно выделить в данных условиях испытаний высокую антифрикционность аморфно-кристаллических покрытий, обусловленную устойчивыми и минимальными значениями, как интенсивности изнашивания, так и коэффициентов трения.

Следует отметить, что сложность состава используемого масла и наличие посторонних сернистых, азотистых и др. элементов активных к рабочей поверхности и инициирующих конкурирующие ре-

акции, затрудняет исследование влияния углеводородных сред на закономерности трибохимических процессов, обуславливающих смазывающее действие.

Качественный анализ химического состава позволил установить, что поверхность аморфно-кристаллических образцов покрыта оксидной пленкой, толщиной порядка 3-5 нм, при этом есть основания полагать, что процесс ее образования обусловлен не всей трибоповерхностью, а лишь отдельными фрагментами, которые представляют собой пленки оксидов алюминия и циркония. Кроме этого, также зафиксировано уменьшение периода кристаллической решетки циркония, данный факт дает основание предположить образование твердых растворов внедрения кислорода в цирконии. Это в полной мере соответствует формированию на поверхностях трения вторичных структур первого типа, представляющих собой пересыщенные твердые растворы активного компонента среды в металле. Характерной особенностью поверхностных структур кислородного типа, представляющих собой начальный этап химической организации элементов в твердом состоянии, является их поверхностная локализация, ультрадисперсное строение, способность минимизировать разрушение и экранировать недопустимые адгезионные явления.

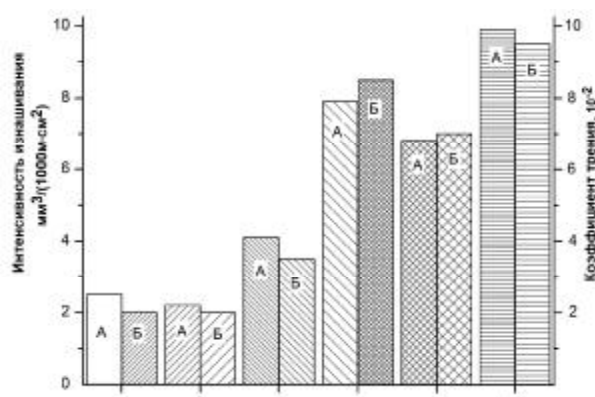


Рис.1 – Влияние материала контргтела на интенсивность изнашивания (А) и коэффициент трения (Б), ($P=20\text{МПа}$, $V=2,0\text{ м/с}$): 1,2,3 – аморфно-кристаллическое покрытие Zr-Al-B в парах трения с образцами БрОЦС6-6-3, АО-20, 30ХГСНА; 4,5,6 – покрытие из вольфрамсодержащего сплава типа BK-15 в парах трения с образцами БрОЦС6-6-3, АО-20, 30ХГСНА;

Непосредственно над тонкопленочной структурой циркония, как селективно окисляющимся компонентом, по данным аналитических методов исследования поверхности, сформирована адсорбционная пленка, полярные молекулы которой, в частности длинноцепные углеводороды, присоединяются и удерживаются относительно поверхности трения главным образом в вертикальной ориентации высотой порядка 1,8 нм. Образованный таким образом адсорбционный слой характеризуется рядом специфических свойств, из которых наиболее важным является высокая прочность на сжатие (более 110 МПа) и значительная легкость сдвига под действием тангенциальных сил, что в свою очередь и обуславливает минимизацию коэффициентов трения при скольжении смазанных аморфно-кристаллических поверхностей. На рис. 2 и рис. 3 представлены поверхности трения исследуемых покрытий и соответственно их профилограммы.

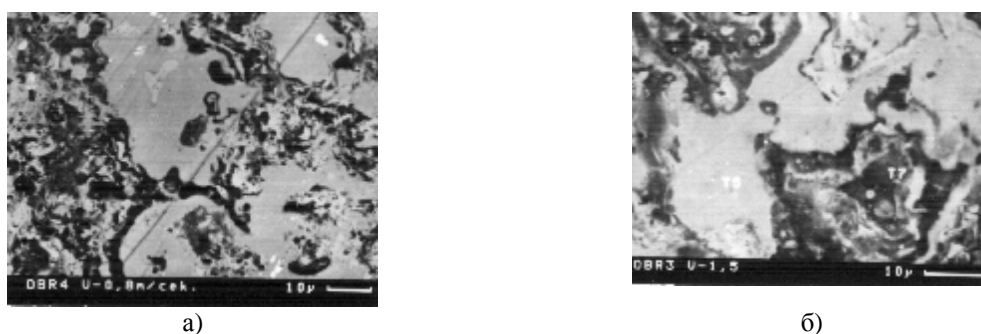


Рис.2 – Микрофотографии поверхностей трения аморфно-кристаллических покрытий в условиях граничного трения маслом МС-20 ($P=15\text{ МПа}$): а – при $V=0,8\text{ м/с}$; б – при $V=1,5\text{ м/с}$;

Исследования морфологии поверхности трения показали, что после длительных испытаний в условиях граничного трения с минеральным маслом МС-20 при давлениях 10-20 МПа образцы аморфно-кристаллических покрытий выглаживаются и приобретают зеркальный блеск, что приводит к уменьшению шероховатости поверхности. Результаты сканирующей электронной микроскопии свидетельствуют

об отсутствии значительных деформаций поверхностного слоя образцов и формировании сглаженного микрорельефа.



Рис.3 – Профилограммы поверхности трения аморфно-кристаллических покрытий в условиях граничной смазки маслом МС-20 (P=15 ПМа): а – $R_a=0,34$ мкм ($V=0,8$ м/с); б – $R_a=0,16$ мкм ($V=1,5$ м/с); (ВУх1000, ГУх40).

Следует отметить, что в режимах трения от 0,2 м/с до 1,9 м/с и нагрузках 10-15 МПа сера, присутствующая в смазке, диффундирует из объема смазочной среды к поверхности и, химически модифицируя ее, образует пленки сульфидов циркония и алюминия. Образование поверхностных структур происходит в крайне неравновесных условиях, что резко изменяет константы равновесия трибохимических реакций, и имеют место существенные отклонения от классических законов равновесной растворимости и образования химических соединений. Сульфиды Zr_2S_3 , ZrS_2 , ZrS , Al_2S_3 и оксиды металлов, входящих в состав покрытий, препятствуют адгезионному взаимодействию поверхности и снижают силу трения. При этом остаются важными трибохимические аспекты воздействия кислорода на развитие кинетики оксидирования активированных в процессе трения поверхностных структур. Количество кислорода в детонационных покрытиях, формирующихся в воздушной атмосфере, значительно превышает его содержание в компактных материалах, получаемых традиционными методами. Практически всегда имеется достаточное количество кислорода для обеспечения поверхностных реакций, во-первых, он присутствует в составе окружающей среды, во-вторых, растворен в смазочном материале.

Химические соединения, составляющие демпферный надповерхностный слой, в частности сульфиды, которые более устойчивы, чем физически и химически адсорбированные молекулы базовой смазки, но менее стабильны, чем оксиды, и вытесняются таким химически активным компонентом, как кислород. По мнению авторов, сульфиды консолидируются на начальной стадии реакции благодаря избытку серы у поверхности. Исследования с применением оже-электронной спектроскопии позволило экспериментально подтвердить, что кислород полностью замещает серу в поверхностных структурах. Можно предположить, что углеводороды, являясь носителями естественной присадки – молекулярного кислорода, активно участвуют в процессах граничной смазки, так как образование оксидных пленок, препятствующих непосредственному контакту поверхностей трения, происходит, по-видимому, как одновременный акт окисления металла и углеводорода с последующим замещением серы в серосодержащих соединениях. Полученные результаты подтверждаются исследованиями поверхности на оже-растровом электронном микроскопе типа JAMP-10S при изучении элементарного состава поверхностей трения аморфно-кристаллических покрытий (рис.4.). Анализ оже-спектров также иллюстрирует необходимость комплексного подхода к изучению взаимосвязи химического состава и смазочного действия среды при трении, кроме того, он подтверждает эффективность применения тонких методов физико-химических исследований к изучению происходящих в смазочном контакте химических превращений.

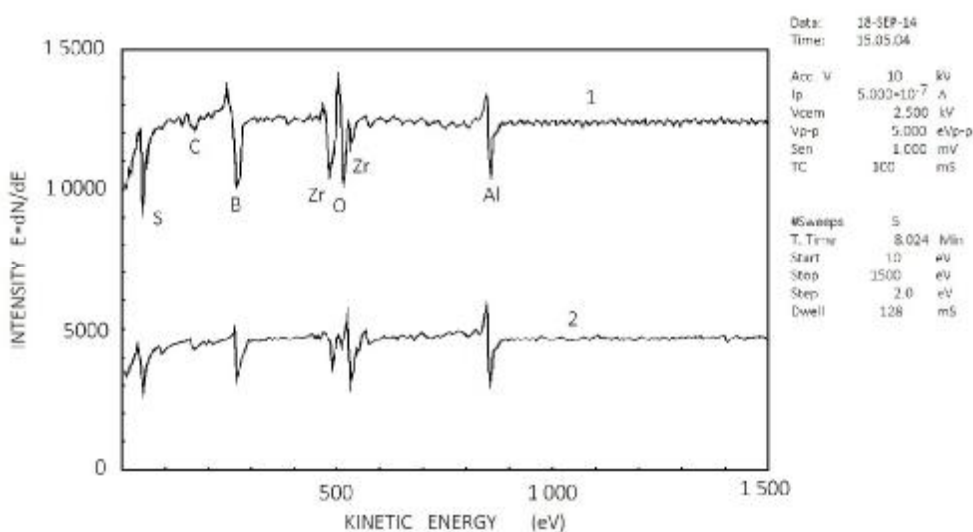


Рис. 4– Оже-спектры, снятые с поверхности (1) и после травления (2).

Изменение структурно-термической активности, инициируемое механическими воздействиями ($V \geq 2,1$ м/с, $P=20$ МПа), оказывают непосредственное влияние на структуру и свойства смазочных слоев. Активные радикалы, образовавшиеся в результате внутренней трибохимической перестройки при разрыве углеродных связей, коагулируют с образованием углеводородных молекул, обладающих большой молекулярной массой. Развертывание процесса во времени обуславливает их осаждение в качестве пленки на поверхности трения. При этом заполнение ненасыщенных связей и неоднородность в структуре углеводородных молекул поверхностной пленки приводит к образованию высокомолекулярных соединений близких к свойствам твердых тел, называемых полимерами трения. Впервые подробный анализ образования полимерных пленок на поверхностях твердых тел было обозначено в работе [16].

Следует подчеркнуть, что в результате исследований механизма трибохимических превращений углеводородов и свойств трансформированных поверхностных пленок, проведенных в широком диапазоне изменений условий трения, установлено, что они сохраняют смазочные свойства и обеспечивают высокие антифрикционные характеристики системы трения аморфно-кристаллическое покрытие – сталь 30ХГСНА, предотвращая контакт их металлических поверхностей, адгезионное взаимодействие и снижая силу трения. При этом наименьшая толщина граничной полимероподобной пленки при наибольшем сближении поверхностей колеблется в пределах 0,15-0,5 мкм.

Для испытываемых пар вольфрамсодержащих покрытий типа ВК-15 повышение нагрузочно-скоростных параметров ($V \geq 2,0$ м/с, $P=20$ МПа) обуславливает монотонное увеличение коэффициента трения и снижения защитных функций смазочной пленки. Дальнейший рост нагрузки вызывает разрушение контактирующих поверхностей и такая характеристика покрытия как поверхностная прочность полностью подавляется механическим фактором, что характеризуется резким увеличением коэффициента трения и значительным возрастанием температуры в зоне контакта и, как следствие, интенсивным адгезионным воздействием, приводящим в условиях эксплуатации к повреждаемости.

Можно сказать, что изучение триботехнических свойств поверхностей, в частности аморфно-кристаллических неотделимо от исследования роли смазочных материалов, при этом исследование механизма смазочного действия в условиях граничного трения сводится к трибохимической кинетике регенерации упорядоченных смазывающих структур и их влияния на адгезионные и фрикционные свойства. В настоящее время области возможного применения испытанных аморфно-кристаллических покрытий, не содержащих дефицитных и дорогостоящих компонентов, изучаются и перспективы их использования очевидны.

Таким образом, разработка и создание аморфно-кристаллических покрытий с заданными свойствами в сочетании с использованием многообразия возможностей смазочных масел позволяет существенно расширить арсенал достижений современного триботехнического материаловедения и сформулировать задачи прогнозирования и управления износом машин на научную основу, доступную для инженерной практики.

Выводы

1. При трении аморфно-кристаллических покрытий исключительно большое значение имеет как состав смазочных масел, так и содержание в них растворенного кислорода и кислородосодержащих соединений, а также их окислительная активность. Отмечено, что в нелегированных смазочных маслах главным активным элементом-пассиватором является кислород. Потому при трении в масле МС-20 образуются поверхностные структуры кислородного типа, представляющие начальный этап химической организации вещества в твердом состоянии.

2. Установлены высокие антифрикционные свойства аморфно-кристаллических покрытий Zr-Al-V, в условиях граничной смазки маслом МС-20 в широких нагрузочно-скоростных режимах трения. Отмечено, что коэффициент трения достигает стабильного значения в начальный период испытаний и в дальнейшем не изменяется во времени. С увеличением нагрузки характер изменения коэффициента трения сохраняется вплоть до нагрузки заедания.

3. В углеводородных смазочных средах, не содержащих естественных или синтетических присадок, характер процесса адгезионного взаимодействия и параметры трения, при которых оно возникает, определяются интенсивностью окислительных трибохимических реакций в контактной зоне. Можно предположить, что в отсутствии кислорода (или продуктов окисления) углеводороды неэффективны как смазочные среды.

Литература

1. Райко М.В. Смазка зубчатых передач /М.В. Райко// К.:Техника. – 1970. – 196с.
2. Forbes E. Antiwear and extreme pressure additives for lubricants / E.Forbes // Tribology. –2008. – vol.3. – №3. – P.145-152.

3. Bollani G. Failure criteria then film lubrication with EP additives / G.Bollani // *Wear*. – 2009. – vol.36. – №1. – P.19-29.
4. Чичинадзе А.В. Материалы в триботехнике нестационарных процессов /А.В.Чичинадзе, Р.М.Матвеевский, Э.Д.Браун и др.// М.:Наука. –1986. – 248с.
5. Akin L. An Interdisciplinary Lubrication Theory for Gear / L.Akin // *ASME Trans.* – 1993. – В.36. – №4. – P.1178-1195.
6. Декл. пат. на кор. мод. 82902 України. Зносостійкий аморфний матеріал на основі цирконію; С22С 9/01 /О.В. Харченко, В.В. Щепетов, М.С.Яковлева, та ін.// - № u 2012 14550; Заявл. 19.12.2012; Опубл. 27.08.2013, Бюл. №16. – 4 с.
7. Носовский И.Г. Детонационные покрытия для защиты узлов трения от изнашивания / И.Г. Носовский, В.В. Щепетов, В.Е. Марчук // *Наука і оборона*. – К.: Варта. – 1999. – С.126-135.
8. Манухин А.Б. Метод определения количества кристаллической фазы в быстрозакаленных сплавах /А.Б.манухин, С.Д.Боюр, П.И.Булер// *Физика и химия аморфных металлических сплавов*. – М.: Наука. – 1985. – С.40-42.
9. Ванштейн Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепочных молекулах /Б.К. Ванштейн// М.: АН СССР. – 1983. – 372с.
10. Коваленко В.О. Металлографические реактивы / В.О.Коваленко // *Справочник*. – М.: Металлургия. – 1979. – 336с.
11. Chen H.S. Metallic glasses / H.S.Chen // *Mater. Sri. And Eng.* – 2004. – №25. – P.59-69.
12. Кудрін А.П. Особливості технології та організації ремонту авіаційної техніки / А.П.Кудрін, С.М.Подреза // К.:КМУЦА. – 1997. – 38с.
13. Harris T.A. Rolling Bearing Analysis / T.A.Harris// New York. – 2006. – 481p.
14. Wandelt K. Electron spectroscopic studies of the oxidation of Fe/Ni alloys /K.Wandelt, G.erte// *Surf. Sci.* –1999. – vol.55. – №2. – P.403-412.
15. Leygraf G. Initial oxidation stages on Fe-Cr surface / G.Leygraf, G.Hultquist// *Ibid.* –2002. – vol.61. – №11. – P.69-84.
16. Hermance H. The Examination of Electric Contacts by the Plastic Replica Method / H.Hermance, T.Egan // *AIEE. Commun. Electron. Trans.*,–1987. – vol.76. – P.756-763.

Надійшла в редакцію 04.12.2014

Gladkiy Y.N., Kharchenko E.V., Shchepetov V.V. **Friction of amorphous - crystalline coatings under boundary lubrication conditions**

There are the test results in conditions of boundary friction detonation coating Zr-Al-B, in a wide range change of friction conditions.

The comparative analysis of the obtained characteristics of friction and wear, in order to evaluate tribotechnical properties of amorphous-crystalline coatings is fulfilled.

These results compared with the parallel tested coatings based on tungsten carbide, samples of hardened steel, bronze and bearing of the sliding layer.

Evaluation of qualitative and quantitative composition of the surface layers participating under boundary lubrication, was carried out with the help of modern physical methods of analysis. Presented profilograms and photomicrographs of the friction surfaces of amorphous-crystalline coatings showing that under boundary friction coatings samples are smoothed and acquire a mirror shine, which leads to a decrease surface roughness.

Established the presence of formation of solid solutions introduction of oxygen in zirconium that corresponds to the formation on the friction surfaces of the secondary structures of the first type, a characteristic feature of which is their surface localization, ultra dispersive statistically structure ability to minimize disruption and can shielded unacceptable adhesion phenomena. Using Auger electron microscope confirmed that the oxygen is completely replaces the sulfur in the surface structures.

It has been shown that the developed for the practice investigated detonation coating Zr-Al-B, have high tribological characteristics throughout the range of of tests under boundary friction. Thus, it should be emphasized that as a result of studies the mechanism of tribochemical conversions of hydrocarbons and properties of surface films transformed, found that they retain lubricating properties and provide high anti-friction characteristics of the friction over a wide range of changes in the conditions of boundary friction.

Keywords: boundary friction; detonation coating; wear; adsorption layer; boundary lubrication; surface activation.

References

1. Rajko M. Lubricants of gear systems/ M.V. Rajko // K.: Technique. - 1970 – 196p.
2. Forbes E. Antiwear and extreme pressure additives for lubricants / E.Forbes // Tribology. –2008. – vol.3. – №3. – P.145-152.
3. Bollani G. Failure criteria then film lubrication with EP additives / G.Bollani // Wear. – 2009. – vol.36. – №1. – P.19-29.
4. Chichinadze A.V. Materials in nonstationary processes of tribotechnology /A.V.Chichinadze, R.M.Matveevsky, E.D.Braun etc. // M.: Science. -1986. – 248p.
5. Akin L. An Interdisciplinary Lubrication Theory for Gear / L.Akin // ASME Trans. – 1993. – B.36. – №4. – P.1178-1195.
6. Patent for Utility Model 82902 Ukraine. Wear-resistant amorphous material based on zirconium; C22C 9/01 /O.V. Kharchenko, V.V. Schepetov, M.S.Yakovleva, etc. // - № u 2012 14550; Appl. 19/12/2012; Publ. 27.08.2013, Bull. №16. - 4 p.
7. Nosovskii I.G. Detonation coatings for protection from wear of friction units / I.G. Nosovskii, V.V. Shchepetov, V.E. Marchuk // Science and defense. - K.: Guard. - 1999. – P.126-135.
8. Manukhin A.B. Method of determining the amount of the crystalline phase in rapidly quenched alloys /A.B.Manuhin, S.D.Boyur, P.I.Buler // Physics and Chemistry of amorphous metal alloys. - M.: Science. - 1985 - p.40-42.
9. Vanshtein B.K. X-ray diffraction of chain molecules /B.K. Vanshtein // M.: ANUSSR. - 1983 - 372p.
10. Kovalenko V.O. Metallographic reagents / V.O.Kovalenko // Directory. - M.: Metallurgy. - 1979 - 336p.
11. Chen H.S. Metallic glasses / H.S.Chen // Mater. Sri. And Eng. – 2004. – №25. – P.59-69.
12. Kudrin A.P. Peculiarities and technologies organization repair of aviation engineering/ A.P.Kudrin, S.M. Podryeza // K.: KMUTSA. - 1997 - 38p.
13. Harris T.A. Rolling Bearing Analysis / T.A.Harris// New York. – 2006. – 481p.
14. Wandelt K. Electron spectroscopic studies of the oxidation of Fe/Ni alloys /K.Wandelt, G.Erte// Surf. Sci. –1999. – vol.55. – №2. – P.403-412.
15. Leygraf G. Initial oxidation stages on Fe-Cr surface / G.Leygraf, G.Hultguist// Ibid. –2002. – vol.61. – №11. – P.69-84.
16. Hermance H. The Examination of Electric Contacts by the Plastic Replica Method / H.Hermance, T.Egan // AIEE. Commun. Electron. Trans.,–1987. – vol.76. – P.756-763.