

Бабак В.П.¹, Недайборщ С.Д.², Щепетов В.В.¹

¹ Институт технической теплофизики НАНУ. Украина, г. Киев

² Государственное предприятие «ЗАВОД 410 ГА». Украина, г. Киев

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ В ВАКУУМЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ CR-SI-B, СОДЕРЖАЩИХ ДИСУЛЬФИД МОЛИБДЕНА

Приведены результаты испытаний в условиях вакуума характеристик трения и износа разрабатываемых детонационных покрытий Cr-Si-B, которые дополнительно в качестве антифрикционного компонента содержат добавку твердой смазки в виде диспергированного дисульфида молибдена.

Полученные характеристики трения и изнашивания исследуемых покрытий сравнивались со значениями износостойкости детонационного покрытия из твердого сплава типа ВК15 и поверхностных слоев полученных в результате термодиффузионного легирования бором, ванадием и хромом. Отмечено высокое сопротивление износу покрытий, содержащих дисульфид молибдена.

С помощью современных физических методов анализа изучен качественный и количественный состав поверхностных слоев. Представлены микрофотографии поверхностей трения, при изучении поверхностного слоя, в котором протекают процессы активирования, использован электронографический анализ. При этом подчеркнуто, что твердосмазочная поверхностная пленка кроме антифрикционного действия обладает и антиизносными свойствами.

Установлено что износостойкость покрытий обеспечивается созданием разделяющего ювенильные поверхности тонкопленочного объекта, представляющего продукт безкислородных структур на основе интерметаллидных фаз химических элементов входящих в состав покрытия.

Разработанные для практики, исследуемые детонационные покрытия Cr-Si-B, 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 оказывающую влияние на уровень адаптации при трении за счет модифицированных поверхностных слоев, способных блокировать разрушение и экранировать недопустимые процессы схватывания.

Ключевые слова: детонационное покрытие; износостойкость; поверхностный слой; структурная приспособляемость; легирование

Введение

Уровень качества и надежность машин и механизмов в значительной степени определяется поверхностной прочностью и износостойкостью используемых материалов. Проблема поверхностной прочности материалов при трении остается одной из наиболее сложных научно-технических областей знаний, так как она теоретическими и прикладными методами изучает вопросы, которые приходится решать в повседневной инженерной практике. Несмотря на достигнутые результаты, ее прикладное решение отстает от современных требований. При этом особенно важными остаются вопросы обеспечения износостойкости и поверхностной прочности в экстремальных условиях эксплуатации, к которым относятся не только предельно высокие нагрузки и скорости перемещения, но и влияния окружающей среды, в частно-

сти, 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 усло-

виях 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 задач систем обслуживания и ремонта авиационной техники [3].

Целью работы является анализ и обсуждение результатов испытаний в условиях вакуума разработанных детонационных покрытий системы Cr-Si-B, которые дополнительно содержат в качестве антифрикционного компонента добавки твердой смазки в 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 напыление покрытий 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 $1,33 \times 10^{-5}$ Па). Характеристики трения и изнашивания исследуемых композиционных покрытий анализировались и сравнивались с полученными

значениями износостойкости покрытий типа ВК15 и поверхностных слоев, полученных в результате термодиффузионного легирования бором, ванадием и хромом.

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 процессов, протекающих в контактной зоне.

Результаты исследований

Исследования закономерностей процессов трения и износа при отсутствии кислорода воздуха имеют актуальное значение, так они позволяют создать теоретические предпосылки для решения практических задач по изысканию и созданию износостойких материалов покрытий и наиболее рационального их сочетания в парах трения, работающих в условиях вакуума. Результаты испытаний представлены на рис. 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. Высокая износостойкость при данных условиях трения покрытий Cr-Si-B-MoS₂, (рис. 1, 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

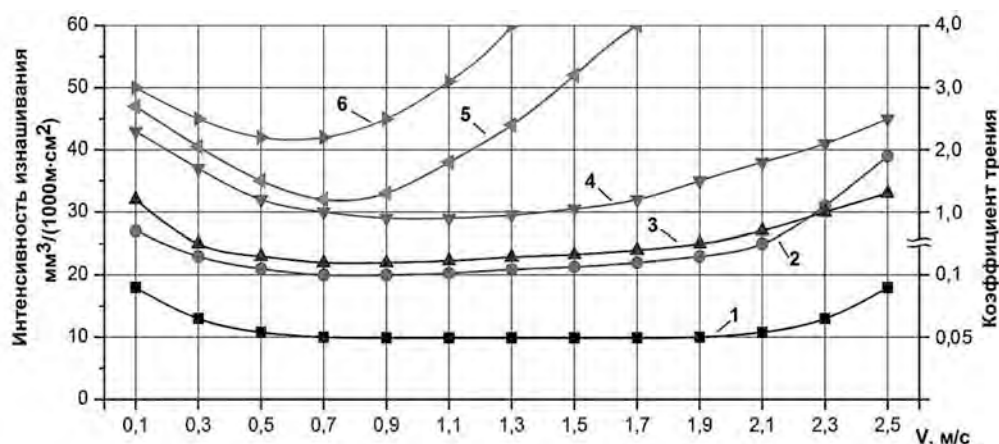


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости скольжения ($P = 2,5$ МПа): 1 – покрытие Cr-Si-B-MoS₂, 2 – покрытие твердого сплава ВК15, 3 – ванадированные образцы, 4 – хромированные образцы, 5 – покрытие Cr-Si-B, 6 – борированные образцы

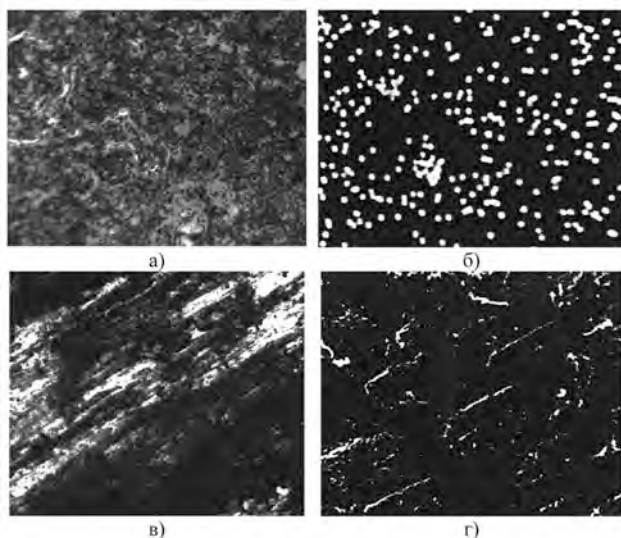


Рис. 2. Поверхность трения покрытия Cr-Si-B-MoS₂: а) исходное состояние; б) микро-рентгеноспектральное распределение MoS₂, х650; в) после испытаний на трение при V=0,3 м/с, х320; г) после испытаний на трение при V=2,3 м/с, х320

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 твердофазных трибохимических реакций компонентов с образованием нанофазных структур (рис. 3).

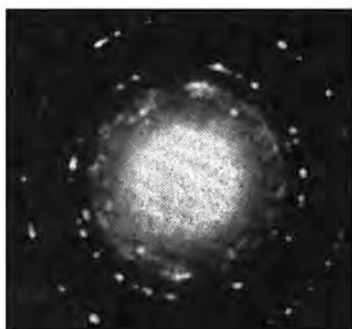


Рис. 3. Электронограмма от поверхности трения покрытия Cr-Si-B-MoS₂, испытанного при V=1,5 м/с

На представленной микродифракционной картине видны кристаллические области – электронограмма содержит четкие рефлексы, соответствующие мелкокристаллической ориентированной структуре. При изучении характера и закономерностей образования приповерхностного слоя, обуславливающего сопротивление износу, было установлено, что он представляет композиционную

тонкодисперсную квазислоистую структуру на основе MoS₂, армированную интерметаллидами Cr₅Si, CrSi, Cr₃Si, CrSi₂, кроме того халькогенид молибдена в результате трибохимического взаимодействия с деформированным поверхностным слоем образует сульфиды CrS, что создает благоприятные предпосылки к существенному повышению износостойкости и, как установлено, увеличению несущей способности.

Изменение структуры твердофазных поверхностных пленок обуславливает значение коэффициента трения, который во всем диапазоне испытания (рис. 1, кривая 1) составляет 0,05–0,07. По мнению авторов, в данных условиях значения коэффициента трения являются не столько функцией нормальной нагрузки, сколько зависимостью 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 надповерхностный слой, кроме антифрикционного действия обладает и антиизносными свойствами, что в данных условиях трения обеспечивает высокую стойкость покрытий Cr-Si-B-MoS₂ против износа в вакууме.

Для покрытий Cr-Si-B, в составе которых отсутствует дисульфид молибдена (рис. 1, 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. Исследуемый тонкопленочный объект представляет ультрадисперсную ориентированную структуру тонкого поверхностного слоя, соответствующего 100–500 нм.

Необходимо отметить, что для покрытий Cr-Si-B при скоростях скольжения менее 0,9 м/с имеют место минимальные параметры трения. Износостойкость покрытий обеспечивается созданием разделяющего ювенильные поверхности тонкопленочного объекта, представляющего продукт безкислородных 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 $\sim 7,5\text{--}9,5$ ГПа, а соответствующие значения для мартенситных структур, образованных на поверхностях трения, достигают $\sim 10,5\text{--}13,5$ ГПа.



Рис. 4. Электронограмма от поверхности трения покрытия Cr-Si-B

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. В данных условиях трения ведущим видом изнашивания покрытий, не содержащих MoS_2 , становится развивающийся процесс схватывания. На рис. 5. представлена кинетика разрушения поверхностных слоев покрытия Cr-Si-B в зависимости от скорости испытаний.

Высоким сопротивлением износу обладают покрытия, напыленные порошком твердого сплава типа ВК15 (рис. 1, 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 (рис. 1, кривая 3), что связано с образованием рабочего слоя, насыщенного карбидами ванадия, характеризующегося высокими механическими свойствами, в частности твердостью и тугоплавкостью [9]. При этом наряду с карбидами VC образуются карбиды V_2C , обладающие гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, кроме того в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, также способствующие повышению прочности.

Характер изнашивания стальных образцов, упрочненных путем термодиффузионного хромирования (рис. 1, кривая 4), аналогичен общим закономерностям изнашивания ванадированных сталей. Повышенные значения износа хромированных образцов обусловлены склонностью к схватыванию, вызванной сравнительно невысокой поверхностной прочностью при трении в вакууме [10].

Трудности получения и накопления методически оправданных и статически достоверных триботехнических исследований сдерживают разработку и внедрение покрытий и представляют на сегодня актуальной частью общей проблемы повышения надежности и ресурса в авиационном строении. Основ-

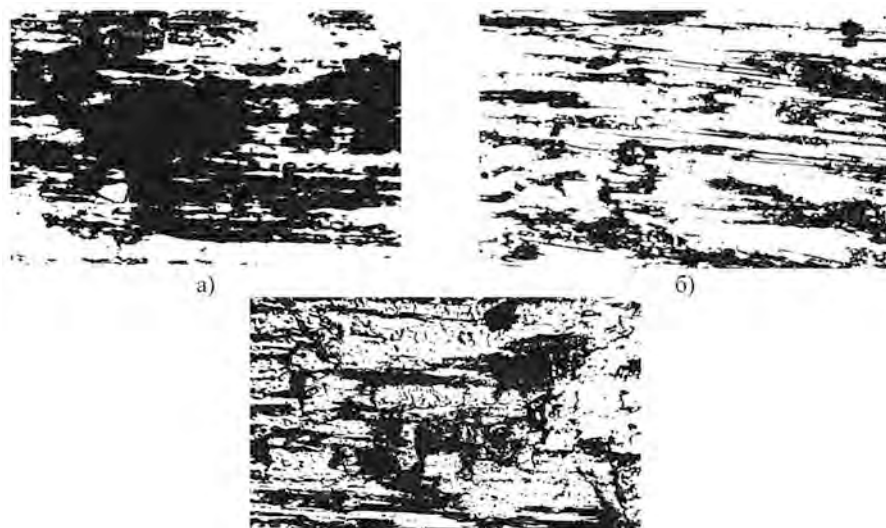


Рис. 5. Поверхность трения покрытия Cr-Si-B, испытанного при: а) 0,4 м/с, б) 0,6 м/с, в) 1,0 м/с (x320)

ное влияние на развитие прикладных аспектов науки оказывают требования практики. Разработанные для нужд практики исследуемые детонационные покрытия Cr-Si-B-MoS₂ 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 модифицированных поверхностных слоев, способных блокировать разрушение и экранировать недопустимые процессы схватывания.

В заключении отметим, что разработка триботехнических материалов покрытий на базе отечественных минерально-сырьевых ресурсов и их испытание с целью определения оптимальных технико-экономических условий применения, несмотря на экономические трудности, является необходимой составляющей технического и социального развития как науки так и общества в целом.

Выводы:

1. Установлена правомерность используемых методологий и алгоритмов проведения в условиях вакуума экспериментальных исследований гетерогенных покрытий на основе Cr-Si-B, состав которых дополнительно в качестве антифрикционного компонента содержит структурно свободный дисульфид молибдена, как модифицирующую добавку, выполняющую роль твердой смазки.

2. Установлено высокое сопротивление износу исследуемых покрытий Cr-Si-B-MoS₂ за счет создания пассивирующей твердофазной смазочной пленки дисульфида молибдена, препятствующей взаимодействию ювенильных поверхностей. При этом отмечено, что отдельные очаги разрушений, локализующиеся в приповерхностных слоях, аннигилируют в процессе зернограничного скольжения, блокируя в данном диапазоне испытаний любые виды повреждаемости.

3. При изучении характера и закономерностей, обуславливающих склонность покрытий к пассивации, отмечено, что ее реализация обусловлена

также за счет твердофазных трибохимических и диффузионных процессов формирования квазислоистых поверхностных структур на основе MoS₂ и тонкодисперсных интерметаллидов из компонентов, входящих в состав покрытия.

4. Определено, что защитная тонкопленочная поверхностная структура способствует уменьшению адгезионной составляющей силы трения, а ее пластическое деформирование не связано со значительными тепловыми затратами и способствует минимальной степени энергетических потерь. При этом характер зависимости и значения коэффициента трения согласуются с закономерностью изнашивания, определяемой свойствами поверхностных структур, а его стабильность свидетельствует о высокой работоспособности покрытий.

Литература

- [1] Носовский И. Г. Влияние газовой среды на износ металлов. – К.: Техника, 1988. – 179с.
- [2] Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов/ Д. Н. Гаркунов, А. А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1989. - 200с.
- [3] Пугачев А. И. Техническая эксплуатация летательных аппаратов/ Под ред. А.И. Пугачева. М.: Транспорт, 1989. – С. 374.
- [4] Носовский И. Г. Авиационные материалы и покрытия / И. Г. Носовский, В. В. Щепетов // – К.: КИ ВВС. – 1999. – 165с.
- [5] Полотай В. В. Машина трения М-22ПВ. – К.: Знание, 1988. – 20с.
- [6] Недайборщ С. Д. Закономерности и механизм изнашивания детонационных покрытий Cr-Si-B при трении в отсутствие смазки / С. Д. Недайборщ // Проблемы тертя та зношування, 2010. – Вип. 54. – С. 163–171.
- [7] Bowden F., Hickam W. Friction and Wear Characteristics of Dry Lubricants . Machine Design. 2009. Vol. 35. №16. – P. 195–199.
- [8] Hinsley G., Male A. Frictional properties of Metall Oxides at High Temperatures Wear. 2011. Vol. 11, № 3. – P. 233–238.
- [9] Clauss F. Materials of Lubricated Systems Materials. Wesley Publishing Company Inc. 2005. – P. 209–215.
- [10] Zeman K., Coffin I. Friction and Wear of Refractory Compounds. ASLE Trans. 2012. Vol.3, №5 – P. 191–199.



Babak V.P.¹, Nedayborshch S.D.², Shchepetov V.V.¹

¹ Institute for Technical Thermal Physics of National Academy of Science of Ukraine. Ukraine, Kiev

² State Enterprise «PLANT 410». Ukraine, Kiev

WEAR RESISTANCE IN VACUUM DETONATION COATINGS CR-SI-B COATING THE MOLYBDENUM DISULFIDE

This article presents the results of tests under vacuum conditions characteristics of friction and wear, elaborated detonation coating Cr-Si-B, as the anti-friction additive component contains a solid lubricant in dispersed form of molybdenum disulfide.

Results of research and characteristic of a friction and intensity of the wear process of the investigated coatings were compared with the wear resistance of detonation coatings of carbide type VK15 and surface layers obtained from the thermal diffusion alloying with boron, vanadium and chromium. It was noted the high wear resistance of coatings containing molybdenum disulfide.

With the help of using modern physical methods of analysis was reviewed qualitative and quantitative composition of the surface layers.

The work presents the photomicrographs of the friction surfaces, while studying the surface layer, in which processes of activation are under way, used electron-diffraction analysis. It was stressed that solid lubricating surface film except for anti-friction action has anti-wear properties.

It had been established that wear-resistant coatings is provided by the creation of the surface of the thin film separating of juvenile object, representing the product anoxic structures based intermetallic phases chemical elements included in the coating composition.

Developed for the practices, investigated detonation coating Cr-Si-B, showed high tribological characteristics in the whole range of tests, modeling work of the friction unit in a rarefied atmosphere. In doing so, means to regulate of wear and ensure a high antifriction coatings in vacuum is application in their structure of the solid material, through the structure influences the level of adaptation of the friction due to the modified surface layers that can block the destruction and shielded the unacceptable setting processes.

Keywords: detonation coating; wear resistance; surface layer; structural adaptability; alloying

References

- [1] Nosovskij I. G. Vliyanie gazovoi sredy na iznos metsllov / I. G. Nosovskij. // K.: Technika. – 1988. – 165p.
- [2] Garcunov D. N. Povyshenie iznosostoykosti detalej samoletov / D. N. Garcunov, A. A. Poljkov // M. Mashinostroenie, 1989 – 200p.
- [3] Pugachev A. I. Technicheskaj ekspluatacija letatelnych apparatov / Pod. Red. A. I. Pugachev. // M.: Transport, 1989. – 374p.
- [4] Nosovskij I. G. Aviacionnye materyaly I pokrij / I. G. Nosovskij, V. V. Shchepetov // K.: KI VVS – 1999. – 165 p.
- [5] Polotaj V. V. Mashina treniya M – 22GD. – K.: Znanie, 1988. – 20 p.
- [6] Nedayborshch S. D. Zakonomernosti I mehanizm iznashivaniy detonacionnyh pokrytij Cr-Si-B pri trenij v otsutstvii smazky / S. D. Nedayborshch // Problemy trenij I iznashivania. 2010. – Vyp. 54. – P. 163–171.
- [7] Bowden F, Hickam W. Friction and Wear Characteristics of Dry Lubricants. Machine Design. 2009. Vol. 35. №16. – P. 195-199.
- [8] Hinsley G., Male A. Frictional properties of Metall Oxides at High Temperatures Wear. 2011. Vol. 11, № 3. – P. 233–238.
- [9] Clauss F. Materials of Lubricated Systems Materials. Wesley Publishing Company Inc. 2005. – P. 209–215.
- [10] Zeman K., Coffin I. Friction and Wear of Refractory Compounds. ASLE Trans. 2012. Vol.3, №5. – P. 191–199.