



УДК 621.891

Бабак В. П., Щепетов В. В.

Институт технической теплофизики НАН Украины, Украина, г. Киев

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ $FeAl_2$ -Ti-Si, СОДЕРЖАЩИХ ДИСУЛЬФИД МОЛИБДЕНА

В работе проведены исследования закономерностей процессов трения и изнашивания разработанных детонационных композиционных покрытий типа $FeAl_2$ -Ti-Si, дополнительно содержащих в качестве структурной составляющей диспергированный дисульфид молибдена.

Отработана методика получения композиционных порошков, содержащих в качестве одного из компонентов диспергированный дисульфид молибдена. Частицы твёрдой смазки, соответствующие фракциям 10–20 мкм, смешивались с композиционным порошком мокрым способом.

Достоинство разработанной технологии заключается в более прочном сцеплении MoS_2 с частицами основного материала, а также в более сильном удержании частиц твёрдой смазки в микрорельефе поверхности.

Добавление диспергированного дисульфида молибдена в состав детонационного композиционного покрытия из легированного $FeAl_2$ обеспечивает эффективную смазку контактирующих поверхностей при испытаниях в условиях воздушной среды. На поверхностях трения образуется защитная плёнка на основе MoS_2 , которая в процессе трения непрерывно восстанавливается и обновляется. Полученные результаты исследования показали высокую работоспособность покрытий и перспективы использования для защиты узлов трения от износа.

Ключевые слова: детонационные покрытия; $FeAl_2$ -Ti-Si; износостойкость; прочность; вторичные структуры.

Введение

Одним из конструктивно-технологических направлений повышения эксплуатационной надёжности деталей машин, работающих в условиях трения, является нанесение на их рабочие поверхности износостойких детонационных покрытий. При этом широкие возможности связаны с регулированием износостойкости детонационных покрытий за счёт введения в их состав твёрдых смазок с ламellarной кристаллической структурой.

Роль твёрдых смазок в структуре антифрикционных материалов можно рассматривать как наиболее простое и действенное средство управления процессами трения и изнашивания.

Одним из твёрдосмазочных материалов, способных разделять трущиеся поверхности благодаря образованию плёнки, минимизирующей износ, предотвращающей схватывание и налипание материалов, является дисульфид молибдена. Применение дисульфида молибдена в качестве твёрдой смазки в известной степени зависит от условий трения, в частности, от состава окружающей среды, и обусловлен особенностями структуры. При этом его использование осуществляется как в виде порошков, втираемых в рабочую поверхность или наносимых в виде плёнки на

основе связывающего, так и прессованием в углубления на поверхностях при смазке ротапринтным методом. Известны попытки применения газопламенного метода нанесения твёрдой смазки в смеси с частицами наносимого материала [1]. Основная тенденция использования их в узлах трения связана с технологией получения спеченных материалов, состоящих из металлической матрицы и распределённой в ней твёрдой смазки. Однако триботехнические зависимости, связывающие параметры трения и изнашивания композиционных покрытий, имеющих в качестве структурных составляющих MoS_2 , от величин внешних воздействий, в настоящее время изучены недостаточно, а имеющиеся экспериментальные данные как в нашей стране, так и за рубежом противоречивы и в значительной степени имеют рекламный характер.

Цель работы

Исследование закономерностей процессов трения и изнашивания в условиях воздушной среды разработанных детонационных композиционных покрытий системы $FeAl_2$ -Ti-Si, дополнительно содержащих в качестве структурной составляющей диспергированный дисульфид молибдена.

Методика исследований

Для определения взаимосвязи между свойствами испытываемых покрытий в условиях нагружения трением, их структурой, составом фаз и влиянием внешних факторов, определяющих эксплуатационную устойчивость их свойств, были использованы современные физические методы исследований. Изучение физико-химических и триботехнических характеристик покрытий, микрофазовый анализ проводили на электронном сканирующем микроскопе типа «SAME-КА».

Исследование зон локализации структурных составляющих и количественных химический анализ методами качественного и последующего количественного рентгеновского анализа.

Испытания на износостойкость покрытий, содержащих диспергированный дисульфид молибдена, проводили по торцевой схеме контакта. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки исследовали при постоянной скорости скольжения 0,6 м/с. Также была отработана методика получения композиционных порошков, содержащих в качестве одного из компонентов диспергированный дисульфид молибдена. Частицы твёрдой смазки, как экспериментально установлено, должны соответствовать фракциям 10–20 мкм, и смешивались с композиционным порошком мокрым способом в течение 1,5 часа. Достоинства этого способа производства композиционной смеси для напыления заключается прежде всего более прочном сцеплении MoS_2 с частицами основного материала, а также в более качественном удержании частиц твёрдой смазки в микрорельефе поверхности. Смесь сушили при температуре 140–160 °С до полного удаления влаги.

Результаты исследований и их обсуждение

Определение оптимального содержания MoS_2 в легированном покрытии $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$ осуществлялось опытным путём. Максимальным сопротивлением износу обладает покрытие, содержащее до 8% (масс) дисульфида молибдена. В этом случае частицы твёрдой смазки равномерно распределены по толщине композиционного покрытия и их количество оказывается достаточным, чтобы обеспечить его высокие антифрикционные свойства. При меньшем количестве дисульфида молибдена эффект самосмазывания в покрытии не достигается. Покрытие с большим содержанием MoS_2 разрушается, его несущая способность значительно снижается. Влияние скорости скольжения на

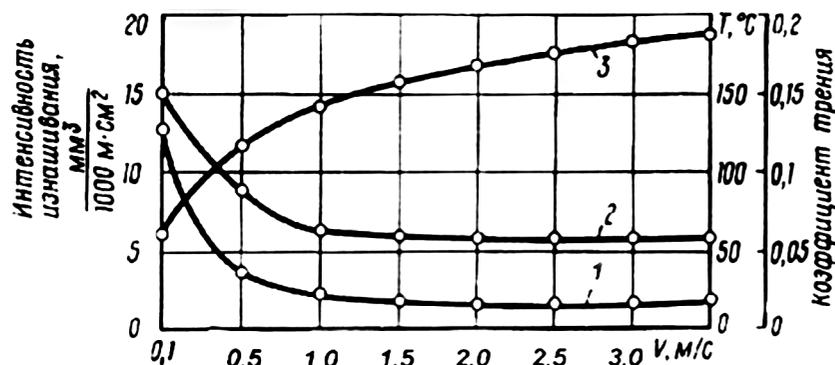


Рис. 1. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания, коэффициент трения и температуру трения покрытий на основе FeAl_2 с введением MoS_2 :

1 — интенсивность изнашивания; 2 — коэффициент трения; 3 — температура

интенсивность изнашивания, коэффициент трения и температуру в контактной зоне покрытий, содержащих твёрдую смазку, представлено на рис. 1.

Как видно, несмотря на некоторое повышение температуры в зоне трения, увеличение скорости скольжения приводит как к снижению интенсивности изнашивания, так и коэффициента трения.

Во всём диапазоне скоростей скольжения коэффициент трения находится в пределах 0,06–0,15. В работе [2] предложена модель механизма смазочного действия, согласно которой антифрикционность твёрдых слоистых веществ зависит от энергии связи между плоскостями (или поверхностями), характера адсорбционного взаимодействия, определяющего изменение поверхностной энергии. Однако высказанные предположения недостаточны для объяснения всего многообразия известных экспериментальных фактов (к примеру, эффекта «аномально низкого» трения MoS_2).

Анализ существующих представлений о механизмах трения слоистых твёрдых смазочных материалов и данные экспериментальных исследований позволили утверждать, что поверхностная энергия плоскостей базиса (0001) дисульфида молибдена крайне мала, а взаимодействие между отдельными слоями S-Mo-S весьма слабое. Отсюда следует, что дисульфид молибдена должен обеспечивать достаточно низкие значения коэффициента трения без участия адсорбированных атомов или молекул. Более того, адсорбция в атмосферных условиях веществ, вступающих во взаимодействие с серой, а тем более с атомами оппозитно расположенных слоёв серы, должна затруднять перемещение слоёв относительно друг друга. Многочисленные экспериментальные данные подтверждают такую точку зрения [3].

По нашему мнению, имеющиеся разногласия в описании основного механизма смазочного действия слоистых материалов не находятся в противоречии, а скорее подтверждают чрезвычайную сложность рассматриваемого синергетического явления.

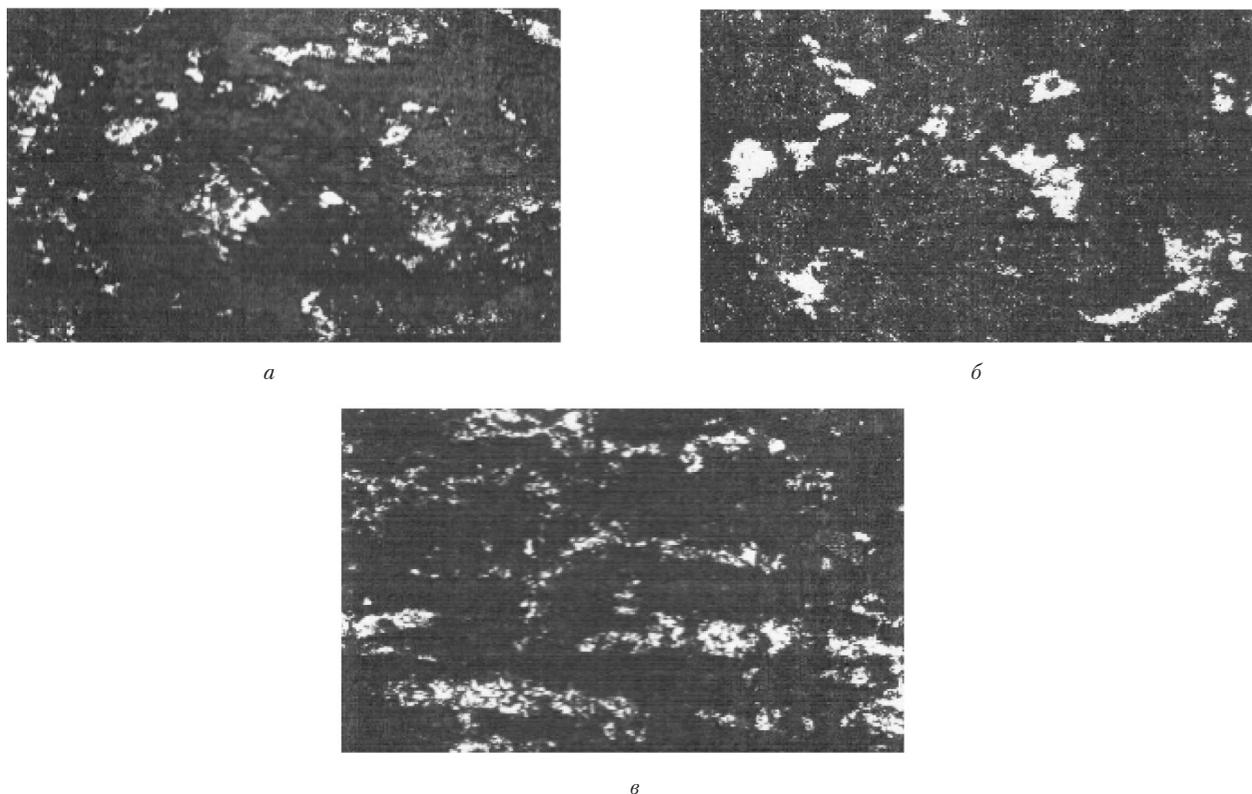


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей трения покрытий, содержащих MoS_2 и испытанных при скоростях скольжения: *a* – 0,5 м/с; *б* – 1,5 м/с; *в* – 2,5 м/с (x320)

Несмотря на то, что введение диспергированных частиц MoS_2 в состав покрытия снижает микротвёрдость, износостойкость его существенно возрастает. Таким образом, максимальная твёрдость не всегда соответствует высокой износостойкости. Так как износостойкость в подавляющем большинстве случаев представляет собой интегральную характеристику сложного взаимодействия различных факторов в процессе трения. На рис. 2 приведены микрофотографии поверхностей трения композиционного покрытия с твёрдой смазкой.

Образование плёнки MoS_2 в процессе трения сопровождается заполнением микронеровностей, благодаря чему увеличивается площадь фактического контакта. Металлографическое изучение внешнего вида поверхности трения показало, что при этом формируется слой смазочной плёнки MoS_2 , в тончайших поверхностных слоях которого происходит интенсивная и направленная пластическая деформация. В дальнейшем, в результате комплекса быстротекущих динамических процессов контактного взаимодействия при влиянии локальных температур и давлений, образуется гетерогенная структура, состоящая из мягкой плёнки MoS_2 и твёрдых включений оксидов металлов, входящих в состав покрытия (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO). Таким образом, частицы оксидов, внедряясь в мягкую слоистую структуру MoS_2 , вызывают вязкое торможение и препятствуют их пластическому деформиро-

ванию. Что обуславливает резкое снижение уровня энергии трибоактивации.

Микрофотография распределения MoS_2 , снятая в рентгеновских лучах на микроскопе «САМЕКА» модели MS-46, представлена на рис. 3. Частицы твёрдой смазки распределены достаточно равномерно. И стабильность осуществления эффекта самосмазывания при трении достигается в результате постоянного воспроизведения слоя трений смазки за счёт MoS_2 , входящего в состав материала покрытия. Исследования показали, что локализация пластической деформации при нагружении трением трения протекает в тончайших слоях поверхностных плёнок, представляющих собой чешуйчатые структуры,

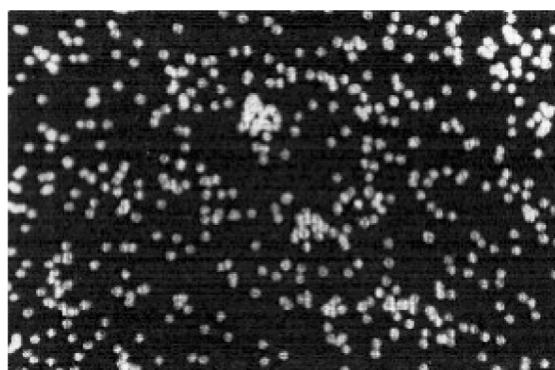


Рис. 3. Микрорентгеноструктурный анализ покрытия в рентгеновском характеристическом излучении MoS_2 Ka (x320)

толщина которых составляет порядка 2–5 мкм. В соответствии с принципами термодинамики взаимодействия при трении протекают в минимальных объёмах, в данном случае — тонкоплёночных чешуйчатых структурах, способных поглощать максимальную энергию до разрушения.

Состояние, характер и свойства поверхностного слоя, возникающего непосредственно при трении, обуславливаются по нашему мнению процессами диспергирования, механохимического насыщения частицами оксидов, интерметаллидов, их размола с материалом твёрдой смазки и образованием новых фаз с характеристиками и структурой, аналогичной дисперсно-упрочнённым материалам.

Таким образом, в период установившегося процесса механохимического трения, характеризующегося минимальными коэффициентами трения и износом, поверхностный слой, разделяющий трущиеся плоскости, состоит из мелкодисперсной смеси оксидов металлов, интерметаллидов, распределённых в тонком слое твёрдой смазки.

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности изнашивания исследуемых детонационных покрытий с твердой смазкой от скорости скольжения и материала пар трения. Как видно интенсивность изнашивания детонационного покрытия с MoS_2 практически не зависит от материала контртела, при этом наименьший износ покрытий соответствует парам трения с оловянистой бронзой, инструментальной сталью ХВГ и высокопрочной авиационной сталью типа 30ХГСА.

В работе [4] предпринята попытка альтернативного объяснения механизма смазочного действия слоистых твёрдых смазок, в которой снижение коэффициента трения с увеличением нагрузки объясняется тем, что повышение давления облегчает условия для наиболее благоприятной ориентации частиц MoS_2 . По мнению, высказанному в работе, данная зависимость обусловлена силами межмолекулярного взаимодействия; увеличение давления влечёт за собой сближение молекул MoS_2 , что приводит к возрастанию сил отталкивания и, как следствие этого, к снижению сопротивления при сдвиге. В исследовании [5] напротив, констатируется, что при повышении давления коэффициент трения по твёрдой плёнке MoS_2 увеличивается.

С нашей точки зрения, высокая работоспособность исследуемых композиционных покрытий, содержащих MoS_2 , достигается благодаря снижению уровня структурной активации поверхностных слоёв в результате регулирования свойств вторичных структур, что обусловлено как

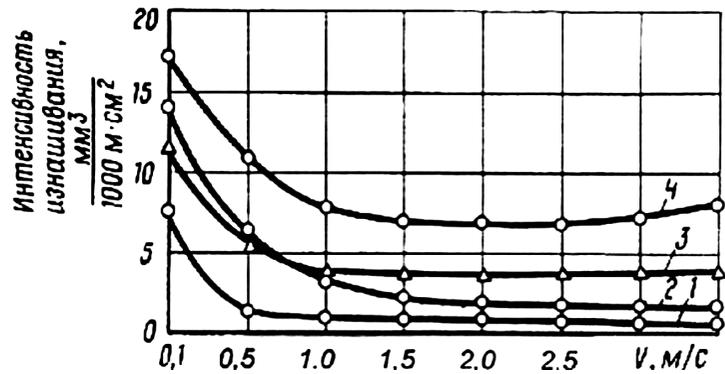


Рис. 4. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания покрытий MoS_2 , испытанных в парах трения с образцами из:

1 — БрОПС 6-6-3; 2 — закалённой стали ХВГ; 3 — закалённой стали 30ХГСА; 4 — закалённой стали 45

задержкой поступления кислорода в процессе трибохимического взаимодействия к пластически деформируемой поверхности, так и высокой степени ориентации частиц MoS_2 при нагружении трением, а также особенностью структуры, которую, управляя технологическим процессом напыления, удалось реализовать и при этом обеспечить желаемый химический состав покрытий, что в результате позволило в условиях трения локализовать пластическую деформацию в тредосмазочных поверхностных слоях и, как следствие обеспечить минимизацию и стабильность коэффициента трения.

На рис. 5 приведена электронная фотография вторичной структуры покрытия, в состав которого входит дисульфид молибдена. Установлено, что вторичная структура гетерогенна, характер распределения дисперсных включений строчечный и имеет ориентацию в направлении вектора скорости скольжения. Это обстоятельство является подтверждением того, что при формировании вторичных структур решающую роль оказывают процессы структурной активации. По своему строению данная структура близка к структуре дисперсно упрочнённого композиционного материала. Как известно, такие материалы обладают уникальным сочетанием высокой пластичности, прочности и имеют высокую стабильность характеристик в условиях эксплуатации [6].

Таким образом, введение диспергированного дисульфида молибдена в состав композиции

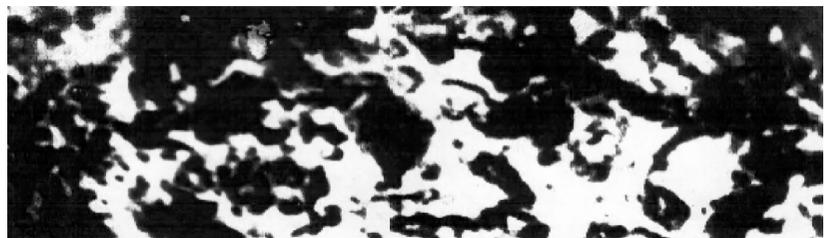


Рис. 5. Электронная фотография вторичной структуры покрытия содержащего MoS_2 (x7000)



FeAl₂-Ti-Si, разработанной из компонентов отечественной минерально – сырьевой базы, обеспечивает эффективную смазку контактирующих поверхностей и высокую работоспособность покрытий. Наличие разделяющей твёрдосмазывающей плёнки в зоне фрикционного контакта обеспечивает минимизацию триботехнических параметров и высокий уровень эксплуатационных свойств исследуемых покрытий, что открывает перспективу их широкого использования в различных областях машиностроения, в том числе и авиационной промышленности.

Выводы:

1. Установлена правомерность используемых методологий и алгоритмов проведения в условиях воздушной среды экспериментальных исследований композиционных покрытий на основе FeAl₂, состав которых дополнительно в качестве антифрикционного компонента содержит структурно свободный дисульфид молибдена, как модифицирующую добавку, выполняющую роль твердой смазки.

2. Установлено высокое сопротивление износа исследуемых покрытий FeAl₂-Ti-Si-MoS₂ за счет создания пассивирующей твердофазной смазочной пленки дисульфида молибдена, препятствующей адгезионному взаимодействию поверхностей. При этом отмечено, что отдельные очаги разрушений, локализуемые в приповерхностных слоях, аннигилируют в процессе зернограничного скольжения, блокируя в данном диапазоне испытаний любые виды повреждений.

3. При изучении характера и закономерностей, обуславливающих склонность покрытий к пассивации, отмечено, что ее реализация обусловлена за счет твердофазных трибохимических и диффузионных процессов формирования квазислоистых поверхностных структур на основе MoS₂ и тонкодисперсных интерметаллидов из компонентов, входящих в состав покрытия.

4. Определенно, что защитная тонкопленочная поверхностная структура обуславливает уменьшение адгезионной составляющей силы трения и ее пластическое деформирование способствует минимальной степени энергетических потерь. При этом характер зависимости и значения коэффициента трения согласуются с закономерностью изнашивания, а его стабильность свидетельствует о высокой работоспособности покрытий.

5. Разработаны композиционные покрытия системы FeAl₂-Ti-Si-MoS₂, 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, открываемыми с применением конкурентоспособного материала для износостойких покрытий, полученных детонационным методом.

Литература

- [1] Грейтуэт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия/ Грейтуэт Е.Р. — М.: Химия, 1998. — 320 с.
- [2] Семенова А.П. К вопросу о механизме смазочного действия твердых антифрикционных материалов / А.П. Семенов, М.В. Ноженков // Трение и износ.- 2004. — Т.5, №3. — С. 408-416.
- [3] Spengler G. Molybdenum disulfide as a lubricant, experiments and application. VDI, 2008, №96, — P.683-690.
- [4] Синицин В.В. Подбор и применение пластичных смазок/Синицин В.В. — М.:Химия 1999 — С. 197.
- [5] Yang Q., Zhao L. Macrostructure, mechanical and tribological properties of novel multi – component nanolayered nitride coatings // Surf. and Coat. Technol. 2005. — v.2002 — P. 170-177.
- [6] Vapreks S. , Argon A. Towards the understanding of mechanical properties of super and ultrahard nanocomposites // J. Vac.Sci Technol. 2002, v. B.20 (2) — P. 650-664.

Babak V. P., Shchepetov V. V.

Institute for Technical Thermal Physics, NAS of Ukraine. Ukraine, Kiev

WEAR DETONATION COATING FeAl₂-Ti-Si, DISULFIDE-CONTAINING MOLYBDENUM

The work carried out investigation of the laws of friction and wear of composite coatings developed by the detonation type FeAl₂-Ti-Si, further comprising as a structural component of the dispersed molybdenum disulfide.

To determine the relationship between the properties of the tested coatings under load friction, their structure, phase composition and the influence of external factors determining the operational sustainability of their properties have been used in modern physical methods of research.

The technique of producing composite powders containing, as a component of the dispersed molybdenum disulfide. The particles of solid lubricant must meet fractions 10-20 μm and mixed with the composite powder wet for 1.5 hours. Advantages of this method is more robust adhesion MoS_2 particles to the base material, and a stronger hold particles of solid lubricant surface micro relief.

Thus, the introduction of molybdenum disulfide dispersed in the detonation of the composite coating doped FeAl_2 ensures effective lubrication of contacting surfaces. Sliding surfaces formed on the protective film on the basis of MoS_2 , that during friction is reduced and continuously updated. The results of this study detonation composite coating showed its high performance and prospects for the use of friction to reduce the amount of wear.

Keywords: detonation coatings; FeAl_2 -Ti-Si; wear resistance; strength; secondary structures.

References

- [1] Greytueyt E.R. Solid lubricants and lubricant coatings/ Greytuet E.R. — M.: Chemistry, 1998 — 320 p.
- [2] Semenov A.P. On the mechanism of action of the solid lubricating anti — friction materials/ A.P. Semenov , M.V. Nozhenko// Friction and wear. — 2004, v.5, № 3. — P. 408-416
- [3] Spengler G. Molybdenum disulfide as a lumbricant, experimete and application. VDI,2008, №96. — P. 683-690.
- [4] Sinitsyn V.V. Selection and application of grease. — M.: Chemistry. — 1999. — C.1997
- [5] Yang Q., Zhao L. Macrostructure, mechanical and tribological properties of noval multi — component nanolayered nitride costings // Surf.and Coat. Technol. — 2005. v.2002 — P. 170-177
- [6] Vapreks S., Argon A. Towards the understanding of mechanical properties of super and ultrahard nanjcomposites // J. Vac. Sci Tehnol. — 2002, v. B.20 (2) — P. 650-664