

В.И. МИРНЕНКО

Национальный университет обороны Украины, г. Киев

Е.Н. ЛИСОВОЙ

Государственное авиационное предприятие «Украина», г. Борисполь

С.С. БЫСЬ

Хмельницкий национальный университет

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, СОДЕРЖАЩИХ ДИСУЛЬФИД МОЛИБДЕНА

В работе проведены исследования закономерностей процессов трения и изнашивания разработанных детонационных композиционных покрытий типа $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, 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 должны соответствовать фракциям 10–20 мкм, и смешивались с композиционным порошком мокрым способом в течение 1,5 часа. Достоинство этого способа заключается в более прочном сцеплении MoS_2 с частицами основного материала, а также в более сильном удержании частиц твёрдой смазки в микрорельефе поверхности.

Введение диспергированного дисульфида молибдена в состав детонационного композиционного покрытия из легированного FeAl_2 обеспечивает эффективную смазку контактирующих поверхностей. На поверхностях трения образуется защитная плёнка на основе MoS_2 , которая в процессе трения непрерывно восстанавливается и обновляется. Полученные результаты исследования данного детонационного композиционного покрытия показали его высокую работоспособность и перспективы использования для узлов трения для снижения величины износа.

Ключевые слова: детонационные покрытия, $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, износостойкость, прочность, вторичные структуры.

VLADIMIR IVANOVICH MIRNENKO

National Defence University of Ukraine, Kiev

EUGENE NIKOLAEVICH LISOVY

State aviation enterprise "Ukraine", Borispol

SERGEY STEPANOVICH BYS

Khmelnytsky National University

WEAR DETONATION COATING $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, DISULFIDE-CONTAINING MOLYBDENUM

Abstract – The work carried out investigation of the laws of friction and wear of composite coatings developed by the detonation type $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, 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, $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, wear resistance, strength, secondary structures.

Вступление. 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 ламеллярной 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 обусловлено особенностями его структуры [1]. Использование дисульфида молибдена [2] осуществляется как в виде порошков, втираемых в рабочую поверхность или наносимых в виде плёнки на основе связывающего, так и впрессованием в углубления на поверхностях при смазке ротационным методом. Известны попытки применения газопламенного метода нанесения частиц твёрдой смазки в смеси с частицами основного материала [3]. Широкое распространение в узлах трения получили спечённые материалы, состоящие из металлической матрицы и распределённой в ней твёрдой смазкой [4]. Однако зависимости, связывающие

параметры трения и изнашивания композиционных покрытий, имеющих в качестве структурных составляющих MoS_2 , от величин внешних воздействий, в настоящее время изучены недостаточно.

Цель работы. Исследование закономерностей процессов трения и изнашивания разработанных детонационных композиционных покрытий типа $\text{FeAl}_2\text{-Ti-Si}$, 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 «Самека». Исследование зон локализации структурных составляющих и количественный химический анализ методами качественного и последующего количественного рентгеновского анализа.

Испытания на износостойкость покрытий, содержащих диспергированный дисульфид молибдена, проводили по торцевой схеме контакта при изменении скорости скольжения от 1,0 до 2,5 м/с и нагрузке 5,0 МПа. 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 было 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 в более прочном сцеплении MoS_2 с частицами основного материала, а также в более сильном 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 разрыхляется, его несущая способность значительно снижается.

Влияние скорости скольжения на 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.

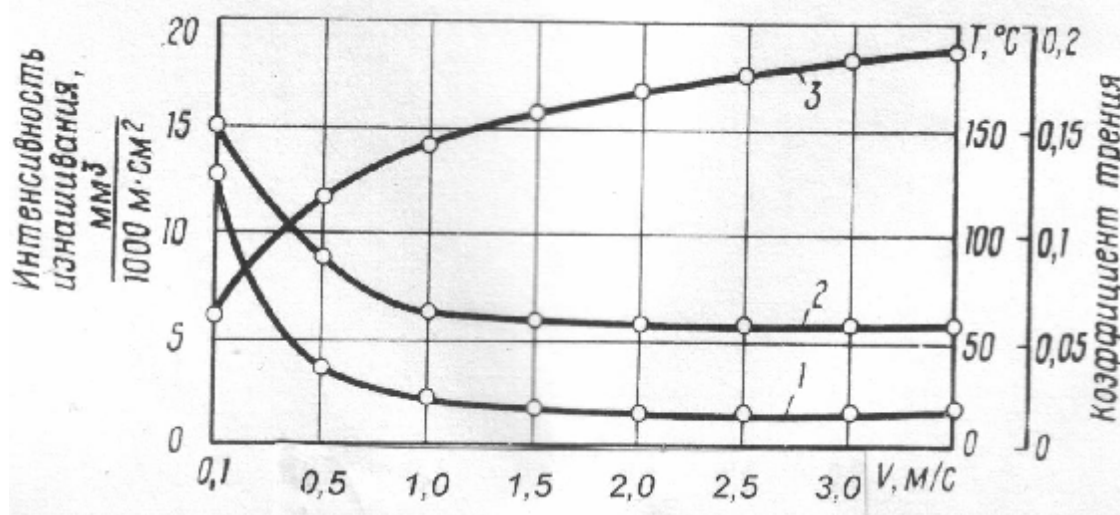


Рис. 1. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания, коэффициент и температуру трения покрытий на основе FeAl_2 с введением MoS_2 : 1 — интенсивность изнашивания; 2 — коэффициент трения; 3 — температура

Во всём диапазоне скоростей скольжения коэффициент трения находится в пределах 0,06–0,15. Существует достаточно много гипотез, объясняющих низкое значение коэффициента трения смазочных материалов, в частности MoS_2 . В работе [5] 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 представляют такую точку зрения. Так, известно, что в отличие от графита, дисульфид молибдена обладает в вакууме более высокими антифрикционными свойствами [6, 7].

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.

Во всём диапазоне скоростей скольжения коэффициент трения находится в пределах 0,06-0,15.

На рис. 2 представлена зависимость микротвёрдости покрытия от содержания MoS_2 . Однако, 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. 3 приведены микрофотографии поверхностей трения композиционного покрытия твёрдой смазкой.

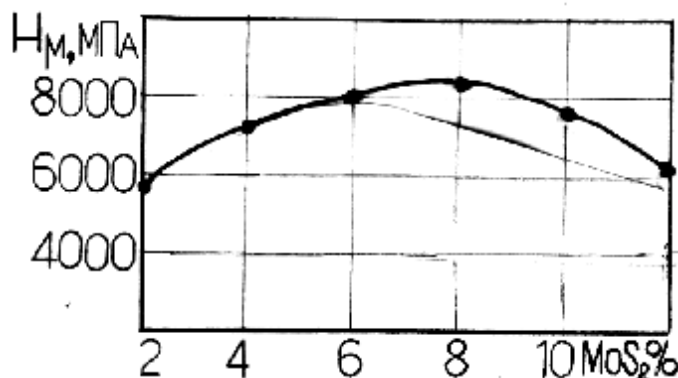


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости покрытий от содержания MoS_2

Образование плёнки MoS_2 в процессе трения сопровождается заполнением микронеровностей, благодаря чему увеличивается общая контактная поверхность. 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 деформированию. Что обуславливает резкое снижение уровня энергии трибоактивации.

Микрофотография распределения MoS_2 , снятая в рентгеновских лучах на микроскопе «Самека» модели MS-46, представлена на рис. 4. 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 в процессе трения протекает в тончайших поверхностных слоях плёнок, представляющих собой чешуйчатые структуры, толщина которых составляет 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 рабочего слоя, возникающего непосредственно при трении, обуславливаются процессами диспергирования, механохимического насыщения частицами оксидов, интерметаллидов, их размол с материалом твёрдой смазки и образованием новых фаз с характеристиками и структурой, аналогичной дисперсно-упрочнённым материалам [8].

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. 5 представлены зависимости интенсивности изнашивания исследуемых детонационных композиционных покрытий на основе никеля с введением MoS_2 от скорости скольжения и материала контртела. Как видно интенсивность изнашивания детонационного покрытия с MoS_2 практически не зависит от материала контртела. Хотя наименьший износ покрытий соответствует парам трения с бронзой, сталью ХВГ и 30ХГСА.

В работе [9] 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 [10], 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 [10] напротив, констатируется, что при повышении давления коэффициент трения по твёрдой плёнке MoS_2 слегка увеличивается.

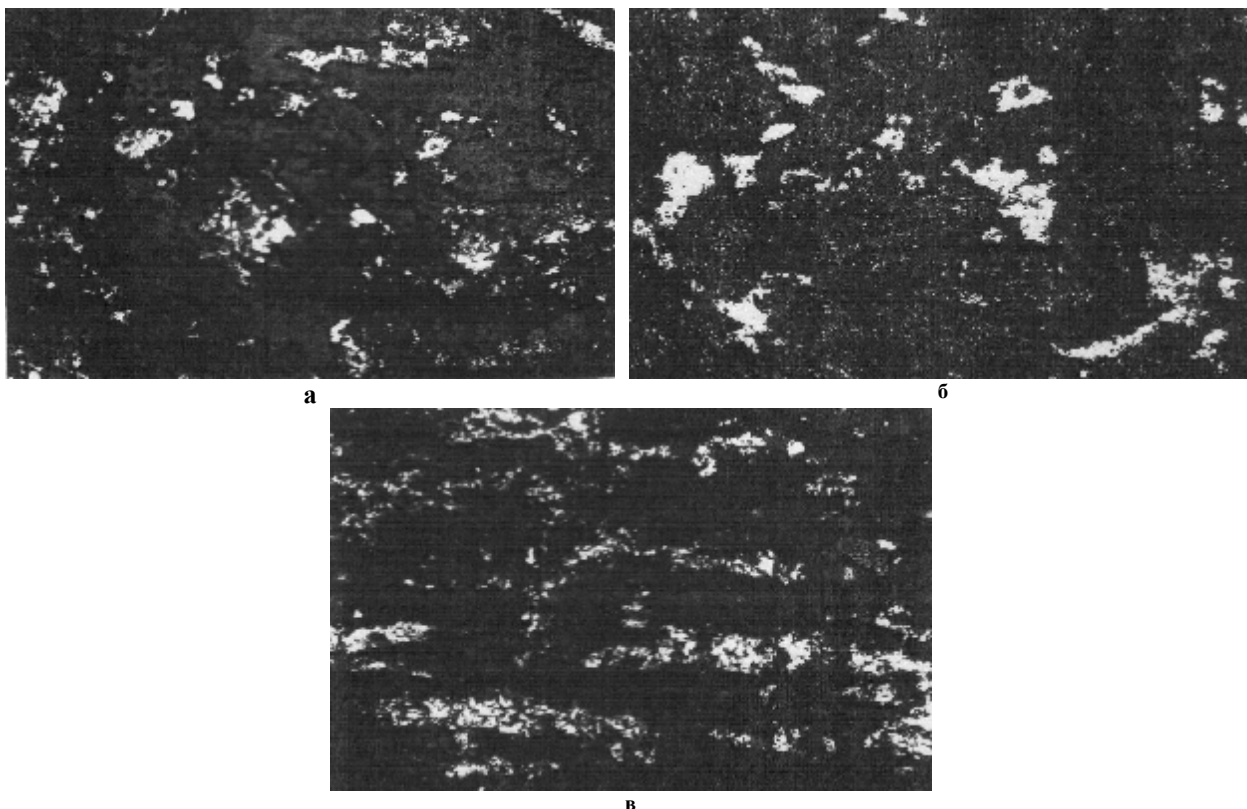


Рис. 3. Микрофотографии поверхностей трения покрытий, содержащих MoS_2 и испытанных при скоростях скольжения: а – 0,05 м/с; б – 0,3 м/с; в – 0,7 м/с (x320)

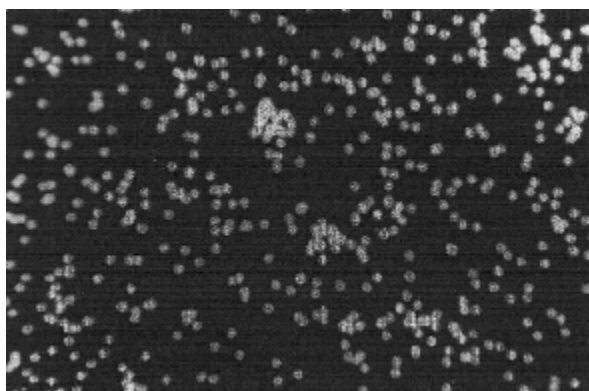


Рис. 4. Микрорентгеноструктурный анализ покрытия в рентгеновском характеристическом излучении MoS_2 K_α (x320)

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 задержкой поступления кислорода к пластически деформируемой поверхности, высокой степенью ориентации частиц MoS_2 в процессе трения, особенностью структуры покрытия и, как результат – высокой локализацией пластической деформации в тончайших слоях твёрдой смазки.

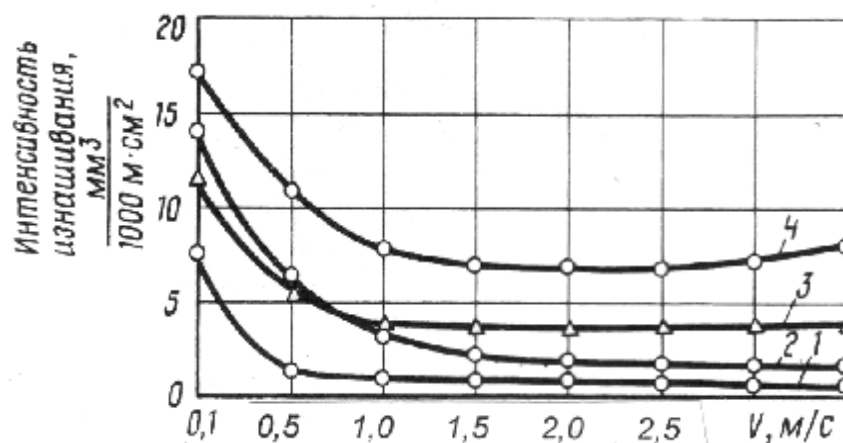


Рис. 5. Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания покрытий MoS_2 , испытанных в парах трения с образцами из: 1 – БрОЦС 6-6-3; 2 – закалённой стали ХВГ; 3 – закалённой стали 30ХГСА; 4 – закалённой стали 45

На рис. 6 приведена электронная фотография вторичной структуры на покрытии из легированного никеля MoS_2 . 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 дисперстно упрочнённого композиционного материала. Как известно, такие материалы обладают уникальным сочетанием высокой пластичности, прочности и имеют высокую стабильность характеристик в условиях эксплуатации [11–13].

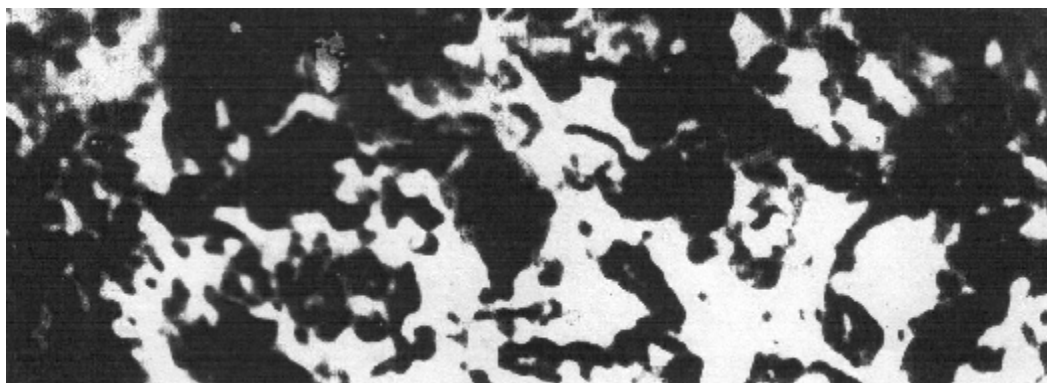


Рис. 6. Электронная фотография вторичной структуры на покрытии содержащем MoS_2 (x70000)

Выводы. Таким образом, введение диспергированного дисульфида молибдена в состав детонационного композиционного покрытия из легированного FeAl_2 обеспечивает эффективную смазку контактирующих поверхностей. На поверхностях трения образуется защитная плёнка на основе MoS_2 , которая в процессе трения непрерывно восстанавливается и обновляется. Наличие разделяющей твёрдой смазывающей плёнки обеспечивает минимизацию триботехнических параметров и высокий уровень антифрикционных характеристик исследуемых покрытий. Это делает возможным перспективу их широкого использования в различных областях машиностроения, в том числе и авиационной промышленности.

Литература

1. Пучина Л.И. Дисульфид молибдена, его свойства и применение / Л.И. Пучина, М.Д. Синявская, И.М. Максимчук. – К. –: Наукова думка, 2000. – 50 с.
2. Грейтуэйт Е.Р. Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / Грейтуэйт Е.Р. – М. : Химия, 1998. – 320 с.
3. Бородин И.Н. Физико-механические свойства и износостойкость железных композиционных покрытий с дисульфидами вольфрама и молибдена / И.Н. Бородин, М.Н. Минкин, П.А. Писарев // Защитные покрытия в машиностроении. – Красноярск. – 2009. – № 4. – С. 43–51.
4. Федорченко И.М. Спечённые антифрикционные композиционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пучина. – К. : Наукова думка, 1999. – 403 с.
5. Семёнов А.П. К вопросу о механизме смазочного действия твёрдых антифрикционных материалов / А.П. Семёнов, М.В. Ноженков // Трение и износ. – 1994. – Т. 5, № 3. – С. 408–416.
6. Spengler G. Molybdenum disulfide as a lubricant, experimente and application. VDI, 2008, № 96. – p. 683–690.

7. Ищук С.Л. Технология пластичных смазок / С.Л. Ищук. – К. : Наукова думка, 1991. – 206 с.
8. Лисовой Е.Н. Сопротивление износу детонационных покрытий системы FeAl₂-Ti-Si при трении без смазки / Е.Н. Лисовой // Проблемы техники. – 2012. – № 4. – С. 46–54.
9. Синицин В.В. Подбор и применение пластичных смазок / Синицин В.В. – М. : Химия, 1990. – 197 с.
10. Сентирюха Л.Н. Твёрдые дисульфид-молибденовые смазки / Л.Н. Сентирюха, Е.М. Опарина – М. : Химия, 1989. – 152 с.
11. Поверхностная прочность материалов при трении / [Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.И. Бершадский]. – К. : Техніка, 1986. – 359 с.
12. Келли А. Высокопрочные материалы / Келли А. – М. : Мир, 1990. – 261 с.
13. Основы механики и технологии композиционных материалов / [Г.Е. Фрегер, Б.Б. Игнатьев, В.В. Чесноков и др.]. – К. : Аристей, 2006. – 524 с.

References

1. L.I. Deeps Molybdenum disulfide, its properties and applications / L.I. Deeps, M.D. Synyavska, I.M. Maximchuk. - Kiev: Naukova Dumka, 2000 - 50.
2. Greytueyt E.R. Solid lubricants and lubricant coatings / Greytueyt E.R. - M. : Chemistry, 1998 - 320 p.
3. Borodin I.N. Physical and mechanical properties and wear resistance of iron composite coatings with tungsten and molybdenum disulfide / I.N. Borodin, M.N. Minkin, P.A. Pisarev // Protective coatings in mechanical engineering. - Krasnoyarsk . - 2009, № 4. - P.43 -51.
4. Fedorchenko I.M. Sintered anti-friction composite materials / I.M. Fedorchenko, L.I. Deeps - Naukova Dumka, 1999 - 403 p.
5. Semenov A.P. On the mechanism of action of the solid lubricating anti-friction materials / A.P. Semenov, M.V. Nozhenko // Friction and wear. - 1994, v.5, № 3. - P.408-416.
6. Spengler G. Molybdenum disulfide as a lumbricant, experimete and application. VDI, 2008, № 96. - P. 683-690.
7. Ishchuk S.L. Technology grease. S.L. Ishchuk. - Kiev: Naukova Dumka, 1991. - 206.
8. Lisovoy E.N. Wear resistance of detonation coating system FeAl₂-Ti-Si friction without lubrication. E.N. Lisovoy // Problems of technology. - 2012. - № 4 - S. 46-54.
9. Sinitsyn V.V. Selection and application of grease. M. : Chemistry. - 1990 - 197 p.
10. Sentiryuha L.N. Solid -molybdenum disulfide grease / L.N. Sentiryuha, E.M. Oparin - M: Chemistry, 1989. - 152 p.
11. Kostecki B.I. The surface strength of materials by friction / B.I. Kostecki, I.G. Nosovskiy, A.K. Guards, L.I. Bershatsky - K.: Tehnika, 1986 - 359 p.
12. Kelly A. High-strength materials. Springer-Verlag, 1990 - 261 p.
13. G.E. Freger Fundamentals of mechanics and technology of composite materials / G.E. Freger, B.B. Ignatiev, V.V. Chesnokov, etc. - K.: Aristej 2006. - 524 .

Рецензія/Peer review : 17.7.2013 р.

Надрукована/Printed :26.9.2013 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гордєєв А.І.