

УДК 621.893

**ОБЗОР НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Канд. техн. наук А.С. Шулика

**ОГЛЯД НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Канд. техн. наук О.С. Шуліка

**REVIEW OF NANOTECHNOLOGY IMPROVE THE WEAR RESISTANCE MACHINE PARTS**

Cand. of techn. sciences A. Shulika

*В статье рассматривается обзор технологий, позволяющих повысить износостойкость деталей машин. Перспективными являются методы формирования и внедрения наноструктур в приповерхностный слой контактирующих деталей. Наличие таких структур на поверхности изменяет свойства материала и приводит к значительному снижению скорости износа. Рассматриваются методы формирования наноструктур, состоящих из ультрадисперсных порошков металлов, а также углеродных нанокластеров.*

**Ключевые слова:** износостойкость, поверхность трения, нанотехнология, «безизносное» трение, самоорганизующаяся система.

*У статті розглядаються технології, які дозволяють підвищити зносостійкість деталей машин. Перспективними є методи формування та впровадження наноструктур у приповерхневий шар контактуючих деталей. наявність таких структур на поверхні змінює властивості матеріалу та призводить до значного зниження швидкості зношування. Розглядаються методи формування наноструктур, які складаються з ультра дисперсних порошків металу, а також вуглецевих нанотрубок.*

**Ключові слова:** зносостійкість, поверхня тертя, нанотехнологія, «беззношувальне» тертя, самоорганізована система.

*The article deals with an overview of technologies to increase the wear resistance of machine parts. Promising methods of formation and implementation of nanostructures in the surface layer of the contact details. The presence of such structures on the surface changes the properties of the material and leads to a significant reduction in wear rate. One method of improving the wear resistance is the deposition of ultrafine particles of different metals on the surface. The result is a nanocrystalline self-healing protective film of the active ingredients and metal wear particles. In this case, the boundary lubrication will be a rebound effect of micro-defects of the friction surfaces. Also considered a method of control adsorption layer using nano substrate on the contacting surfaces. The adsorption layer is a liquid crystal structure - changing the orientation of the molecules in the crystal by means of the surface energy of the substrate nano can improve abrasion resistance several times. Fundamentally different method of reducing the wear of the material is doped with carbon nanotubes, and then the tensile strength will be doubled. Promising is the doping of the surface layers nanoclusters. The result is expected to improve the wear resistance with fewer alloy nanoclusters*

**Keywords:** wear resistance, surface friction, nanotechnology, "no-wear" friction, self-organizing system.

**Вступление.** Изнашивание механизмов машин в результате трения является серьезной проблемой для железнодорожной техники, путевых, строительных, дорожных машин. Детали механизмов машин изнашиваются, преимущественно, работая в режимах

граничного и сухого трения. Уменьшение скорости изнашивания приводит к повышению надежности, КПД механизмов, а также к увеличению его ресурса. Показатели эффективности работы механизмов определяются, в том числе, трибохимическими

процессами в парах трения. Учитывая что такие процессы протекают на субмикрорурвне, разработка современных технологий повышения износостойкости с учетом размерных эффектов является актуальной задачей машиностроения.

Исследования последних лет показали, что механохимическое взаимодействие, особенно в условиях граничного и смешанного трения, приводят к изменению электронно-дислокационной структуры контактирующих материалов, их фазово-энергетических состояний, формированию наноструктур и их слоев, свойства которых определяют скорость износа [1-6].

Трибохимические процессы, протекающие в паре трения, являются функцией следующих факторов: нагрузка (удельное давление в контакте), скорость относительного перемещения пар трения, температура в контакте, наличие абразивных частиц или кавитационных пузырьков, конструктивных особенностей, свойств поверхностей трения и третьего тела [1-10]. Среди большого количества работ в этой области можно выделить группу, посвященную исследованиям в области разработки нанотехнологий повышения износостойкости деталей машин и повышению качеств смазывающих и антифрикционных материалов. Главным образом речь идет о формировании и внедрении различных наноструктур, изменяющих свойства контактирующих тел в заданном направлении.

**Постановка задачи.** В статье проводится обзор методов формирования и внедрения наноструктур в приповерхностный слой контактирующих деталей. Наличие таких структур в приповерхностном слое, согласно имеющимся представлениям, изменяет физические свойства, как материала, так и третьего тела и приводит к значительному снижению скорости износа, или в определенных условиях, к «безизносному» трению.

**Обзор нанотехнологий повышения износостойкости деталей машин.** На процессы трения и изнашивания существенное влияние оказывает состояние поверхностного слоя. Оно определяется как микрогеометрией, параметрами кристаллической решетки, химическим составом, так и условиями контакта. На перечисленные составляющие

можно влиять различными способами, тем самым регулируя износостойкость деталей на начальном этапе, и в процессе их работы. Как было сказано, для повышения износостойкости поверхностей в последние десятилетия используют нанотехнологии. Согласно ISO/TS 80004-1/2010 под нанотехнологиями подразумевается следующее:

1) знание и управление процессами в масштабах, не превышающих 100 нм в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта приводит к возможности новых применений;

2) использование свойств объектов и материалов в нанометровом масштабе, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул.

Одними из первых работ в области нанотехнологий, открывшими явление «безизносного» трения за счет образования на поверхностях наноструктуры меди в парах трения деталей самолетов в условиях смазывания их консистентной смазкой ЦИАТИМ-201, были работы Крагельского И.В. и Гаркунова Д.Н. [11]. Особенностью этого эффекта было то, что пленка из меди покрывала не только бронзовую деталь, но и сопряженную с ней стальную поверхность. При этом тончайшая пленка снижала износ и уменьшала силу трения в соединении в 10 и более раз. В дальнейшем такой же эффект был обнаружен в парах трения сталь-сталь компрессора холодильника. Образование пленки являлось следствием растворения масло-фреоновой смесью медных трубок охладителя [11]. Такое явление назвали избирательный перенос, которое заключается в том, «... что при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, происходит явление избирательного переноса меди из твердого раствора медного сплава на сталь и обратного ее переноса со стали на медный сплав, сопровождающееся уменьшением коэффициента трения до жидкостного и приводящее к значительному снижению износа пары трения» [11]. По сути, избирательный перенос снижает молекулярную составляющую силы трения. На поверхностях протекают процессы, приводящие к образованию самоорганизующихся систем автокомпенсации износа и снижения коэффициента трения.

Образующуюся наноструктуру поверхності назвали сервовитной пленкой. Толщина сервовитной пленки не превышает 100 нм. В ней реализуется особый механизм деформации, протекающий без накопления дефектов, свойственных усталостным процессам.

Таким образом, трение представляется не только как разрушительный процесс, но в определенных условиях может выступать как самоорганизующийся созидательный процесс, позволяющий разработать новые, ранее неизвестные методы восстановления деталей и технического сервиса машин [7]. К таким методам относятся, например, технология финишной антифрикционной безабразивной обработки.

Для того чтобы поверхности трения обладали бы одновременно высокими антифрикционными, прочностными свойствами, они могут быть получены путем нанесения специальных наноструктурированных покрытий.

На железной дороге для достижения наилучших результатов восстановления и упрочнения гребней колесных пар локомотивов специалистами регионального инновационно-технологического центра КТЦ ТНЦ СО РАН из Томска разработали наносодержащие модифицирующие смеси [5]. В состав смесей

входят порошки - оксиды алюминия, оксиды редких металлов размером от 30 до 60 нм:  $ZrO_2$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $TiO_2$ . Использование этих разработок позволило значительно повысить качество восстановления и упрочнения деталей и износостойкость отливок до 10 раз.

Наноструктурирование поверхностей трения осуществляется с помощью различных технологий, в зависимости от комбинации «покрытие – подложка».

Одной из технологий улучшения свойств трибосопряжений является осаждение композиционных гальванических нанопокровов (КГП). КГП получают из электролита, в который добавлен ультрадисперсный порошок. При наложении электрического тока на поверхности трения осаждается металл и частицы порошка, которые зарастают с матрицей, образуя структуру покрытия. Вместе с металлом на детали осаждаются дисперсные частицы, волокна различных карбидов, оксидов, полимеров и т.д. Дисперсные материалы в металлической матрице значительно изменяют свойства покрытий [7]. В табл. 1. представлены обобщенные данные дисперсных материалов, обеспечивающие улучшение характеристик покрытий.

Таблица 1

Ультрадисперсные порошковые материалы для модифицирования свойств покрытия

Свойства покрытия	Дисперсные материалы
Твердость и износостойкость	$Al_2O_3$ , WC, $ZrO_2$ , TiC, $HfB_2$ , $ZrB_2$ , $B_4C$ , BN, B, $Cr_3B_2$ , ZrC, $ThO_2$ , $CeO_2$ , TaC, $WS_2$ , алмаз
Износостойкость в условиях сухого трения и повышенных температур	$Al_2O_3$ , $TiB_2$ , SiC, C
Жаростойкость	$Al_2O_3$ , $SiO_2$ , C, B, $B_4C$ , $ZrO_2$
Коррозионная стойкость	$ZrB_2$ , $Al_2O_3$ , SiC, аморфный бор, каолин
Антифрикционность	$CuF_2$ , WC, $MoS_2$ , BN, $BaSO_4$ , аморфный бор, ПВХ, ПЭ
Термостойкость	Оксиды, карбиды
Пористость	Карбонильный никель
Самосмазывание	$MoS_2$ , BN, $WS_2$ , слюда, $CaF_2$ , фторированный графит, графит
Теплопроводность	Политетрафторэтилен
Эрозионная стойкость	Карбиды
Прочность	$Al_2O_3$ , SiC
Сопrotивление схватыванию	Аморфный бор

Еще одним способом создания наноструктурированной подложки на поверхности трения является использование металлоплакирующих композиций (реметаллизантов) [7]. Реметаллизанты представляют собой ультрадисперсные (наноразмерные) порошки или полностью маслорастворимые соли пластичных металлов. В качестве плакирующих металлов используются: медь, железо, цинк, олово, свинец, алюминий, хром, никель, молибден. В результате использования реметаллизанта на поверхности формируется нанокристаллическая самовосстанавливающаяся защитная пленка из активных компонентов препарата и частиц износа. При этом в режиме граничного трения, высокой нагрузке и температуре будет наблюдаться эффект восстановления нано- и микродефектов поверхностей трения и работоспособности. Разработанные нанопрепараты позволяют снизить скорость изнашивания, улучшить прирабатываемость поверхностей, повысить задиростойкость, снизить уровень шума и вибрации.

Принципиально другим вариантом снижения скорости изнашивания деталей машин является управление адсорбционным слоем смазки путем изменения наноструктуры поверхностей трения. Смазывающая среда в приграничном слое с поверхностью находится в жидкокристаллическом состоянии. В зависимости от типа структурной ориентации молекул, в паре трения могут реализовываться следующие эффекты: в случае планарной ориентации молекул, будет иметь место уменьшение потерь на трение, а в случае гомеотропной структуры происходит снижение скорости изнашивания [8,9]. Одним из способов получить требуемую ориентационную структуру молекул является нанесение на рабочую поверхность трения тонкопленочного ориентанта, позволяющего получить в смазочном слое требуемое расположение молекул в масле. В работе [9] в качестве примера был рассмотрен подшипник качения №308. Для снижения скорости изнашивания необходимо реализовать гомеотропную структуру молекул. Для этого на поверхность трибосистемы высаживалась из раствора пленка ориентанта (высокомолекулярное фтористое соединение в составе 0,5% раствора хладон R-113) толщиной 15 нм. В результате интенсивность

изнашивания подшипника снизилась на порядок. Таким образом, нанопокрывание рабочих поверхностей трибосопряжений позволяет решать ряд задач: от снижения трения до снижения интенсивности износа.

Износостойкость во многом зависит от механических свойств материала и третьего тела, а также условий трения. Механические свойства материалов можно существенно улучшить путем их легирования углеродными нанокластерами [6]. В качестве таких нанокластеров часто используют углеродные нанотрубки. Углеродная нанотрубка представляет собой продолговатую структуру, которая состоит из одного или нескольких свернутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов. Диаметр углеродных нанотрубок составляет от 1 до 150 нм, а длина измеряется десятками и сотнями микрометров. Несмотря на свою хрупкость и малый размер, нанотрубки в 100 раз прочнее и в 6 раз легче стали, а также имеют высокую прочность на растяжение и изгиб [1].

С целью улучшения механических характеристик алюминия в токийском университете его легировали 5% углеродных нанотрубок, что привело к двукратному увеличению предела прочности. Теоретические расчеты показывают прогнозируемое увеличение прочности сталей и сплавов до 6 раз при добавлении в них 10% нанотрубок. Углеродные нанотрубки не разрушаются и возвращаются в первоначальную форму при снятии нагрузки, а также практически не подвержены усталостному разрушению [1].

Однако износ в парах трения происходит, прежде всего, в пределах нескольких приповерхностных атомных слоев. Следовательно, легированию можно подвергнуть только поверхностный слой металла.

**Выводы.** Использование нанотехнологий с целью повышения износостойкости деталей машин является перспективным и требующим дальнейшей проработки. Согласно проведенному обзору можно выделить некоторые методы повышения износостойкости:

1) создание на поверхности подложки, препятствующей непосредственному контакту поверхностей трения, и обладающей способностью к самоорганизации. В статье рассмотрено несколько способов создания данной наноструктурированной подложки. В

результате износ может быть снижен в несколько раз;

2) создание наноструктурированной подложки – ориентанта на поверхностях трения с целью управления ориентацией молекул в адсорбционном слое. Адсорбционный слой представляет собой жидкий кристалл. В зависимости от типа ориентации молекул в жидком кристалле можно снизить износ при граничном трении в несколько раз. Ориентацией молекул можно управлять путем создания требуемой наноструктуры поверхности;

3) легирование всего объема металла углеродными нанокластерами. В результате улучшаются механические характеристики и,

соответственно возрастает износостойкость поверхности. Данный метод в настоящее время не получил промышленного распространения и требует дальнейших исследований, направленных на изучение свойств композита и снижения стоимости материалов;

4) упрочнение углеродными нанокластерами приповерхностных слоев материалов. В результате возрастает износостойкость и твердость поверхности. Количество легирующих нанокластеров существенно меньше, по сравнению с легированием всего объема материала. Данный метод является наиболее перспективным, поскольку количество легирующих элементов может быть существенно снижено.

### Список использованных источников

1. Ларчиков, А. Наноструктурирование поверхностей трения и износа машин и механизмов [Текст] / А. Ларчиков, В. Беклемышев, И. Махонин, К. Филиппов, М. Афанасьев // Наноиндустрия. – 2013. – №5/43. – С. 22-30.
2. Хайнике, Г. Трибохимия [Текст] / Г. Хайнике; пер. с англ. – М.: Мир, 1987.
3. Бутенко, В.И. Научные основы нанотрибологии [Текст] / В.И. Бутенко. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010.
4. Наноматериалы и нанотехнологии [Текст] / В.М. Анищик [и др.]. – Минск: Изд-е центра БГУ, 2008.
5. Трошкин, Б.И. Наноматериалы увеличат срок службы бандажей колесных пар [Текст] / Б.И. Трошкин // Локомотив. – 2011. – № 8. – С. 28-29.
6. Нанотехнології на залізничному транспорті [Текст] / Є.М. Лисіков, С.В. Воронін, О.О. Скорик, Д.В. Онопрейчук. – Харків, 2013. – 212 с.
7. Балабанов, В. Нанотехнологии. Правда и вымысел [Текст] / В. Балабанов, И. Балабанов. – М.: Изд. Эксмо, 2010. – 384 с.
8. Трибологические особенности граничных смазочных слоев судовых топлив и масел [Текст] / С.А. Ханмамедов, Б.А. Алтоиз, Е.В. Пыжов, Т.В. Народицкая // Судовые машины и механизмы: научн.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2003. – Вып. 8. – С.45-49.
9. Поповский, Ю.М. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения [Текст] / Ю.М. Поповский, С.А. Ханмамедов, С.В. Сагин // Судовая энергетика: научн.-техн. сб. – Одесса: ОГМА, 1994. – Вып. 3. – С. 26-27.
10. Пул, Ч. Нанотехнологии [Текст] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
11. Гаркунов, Д.Н. Триботехника [Текст]: учеб. пособие / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – М.: КНОРУС, 2012. – 408 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор М.П. Ремарчук

---

Шуліка Олександр Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри механіки та проектування машин Української державної академії залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-21.

Shulika Alexander, candidate of technical sciences, associate professor, department of mechanics and machine design, Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-21. E-mail: kafsprrm2@rambler.ru.