

**Секция 1**

**Применение  
нанотехнологий  
в транспортно-  
технологическом  
комплексе**

**Александрова А.А.**

студент 3 курса факультета  
электроники Санкт-Петербургского  
государственного  
электротехнического университета им.  
В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», РФ

**Лашкова Н.А.**

студент 6 курса факультета  
электроники Санкт-Петербургского  
государственного  
электротехнического университета им.  
В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», РФ

**Aleksandrova A.A.**

3th year student of the Faculty of  
Electronics, Saint Petersburg State  
Electrotechnical University "LETI",  
Russian Federation

**Lashkova N.A.**

6th year student of the Faculty of  
Electronics, Saint Petersburg State  
Electrotechnical University "LETI",  
Russian Federation

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO:Al

### ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THIN FILMS ZnO:Al

Ключевые слова: альтернативная энергетика, нанодиагностика, оксид цинка, сканирующая микроскопия сопротивления растекания

Keywords: alternative energetics, nanodiagnostics, zinc oxide, scanning spreading resistance microscopy

В статье изложены особенности исследования электрофизических свойств тонких пленок ZnO:Al с помощью проводящих методик атомно-силовой микроскопии. Проведенное исследование электрофизических свойств показало, что ток протекает частично по вершинам и преимущественно по границам зерен. В режиме туннельной атомно-силовой микроскопии построены локальные ВАХ исследуемой пленки.

The article outlines the features of researching electrophysical properties of thin films ZnO:Al using the methods of atomic force microscopy. The study of the electrical properties showed that the current flows partly through the peaks and mainly by the grain boundaries. In the tunneling mode atomic force microscopy built local CVC of the investigated film.

Оксид цинка ZnO – прямозонный полупроводник с  $E_g = 3,36$  эВ  $n$ -типа электропроводности. В настоящее время широко используются гетероструктуры с использованием наноструктур оксида цинка. В микроэлектронике большим спросом пользуются пленки, наностержни [1-3] и нанотрубки оксида цинка. На основе тонких пленок ZnO разрабатываются ультрафиолетовые излучатели и фотодетекторы, газовые сенсоры [4-6], наноустройства автономного питания. Проводящие пленки на основе ZnO также нашли применение в качестве прозрачных электродов для различных оптоэлектронных приборов и устройств, таких как светоизлучающие приборы, фотоприемники и тонкопленочные солнечные элементы [7-9]. Фотоэлектрические элементы вырабатывают электроэнергию, которая может быть использована для бортового питания транспортного средства или для электродвигателя электрического транспорта. В некоторых странах фотоэлементы устанавливаются на крыши ж/д поездов. Они производят электричество для кондиционеров, освещения и аварийных систем [10, 11].

В данной работе с помощью проводящих методик атомно-силовой микроскопии (АСМ) [12-15] исследовались тонкие слои легированного алюминием

(ZnO:Al) оксида цинка, полученные методом спрей-пиролиза [7, 8] на стеклянных подложках.

Спрей-пиролиз – это метод получения порошков и тонких пленок, основанный на термическом разложении аэрозоля раствора, содержащего ионы синтезируемого материала. Данный метод позволяет получать однородные покрытия на больших площадях с высокой воспроизводимостью [8].

Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации силы взаимодействия твердотельного зонда с радиусом закругления порядка десятков нанометров с поверхностью исследуемого материала. Получение АСМ-изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли (кантилевера) зондового датчика. Атомно-силовой микроскоп способен регистрировать очень малые силы ( $10^{-8} \dots 10^{-13}$  Н и менее), характерные для межатомного взаимодействия [12, 14, 15].

В работе исследованы морфологические особенности полученных методом спрей-пиролиза слоёв ZnO:Al. На АСМ-топографии (рис. 1) видно, что слой ZnO:Al состоит из агломератов зёрен размером 500-700 нм.

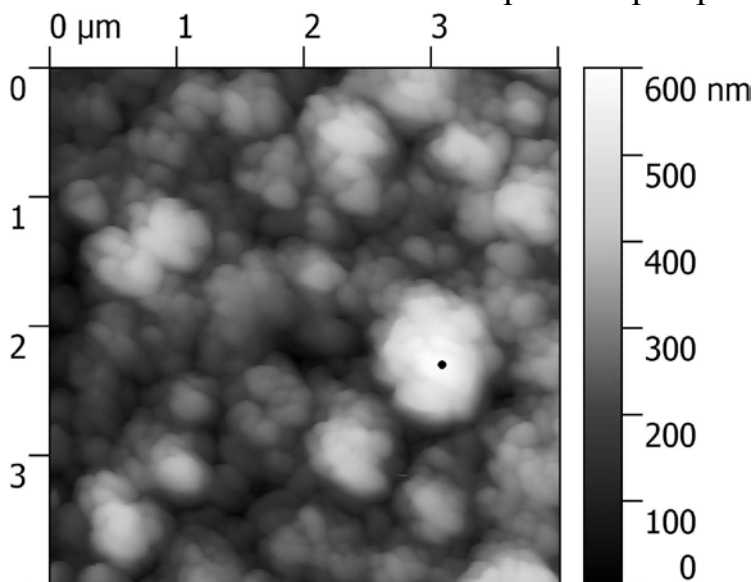


Рисунок 1 – АСМ-изображение пленки ZnO:Al

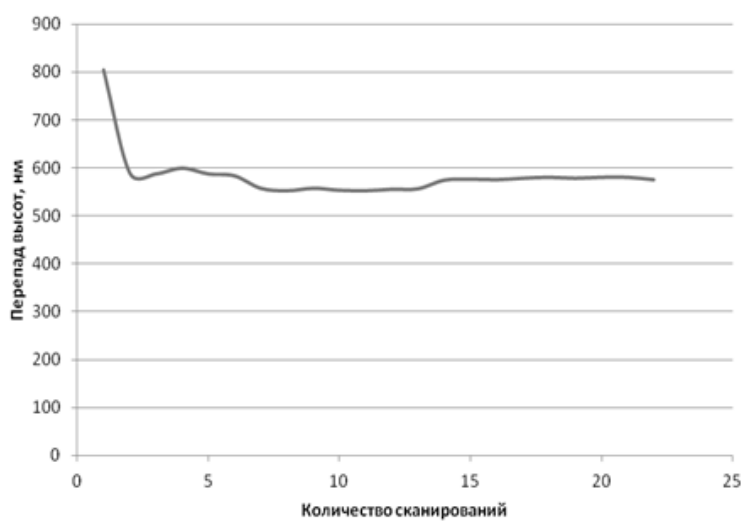


Рисунок 2 – Зависимость перепада высот от количества сканирований

При проведении измерений с помощью АСМ в течение длительного времени чувствительность зондового датчика к рельефу поверхности уменьшается. В связи с этим была установлена зависимость перепада высот, фиксируемых атомно-силовым микроскопом в исследуемом образце, от количества сканирований (рис. 2), изучено влияние количества сканирований на изменение радиуса закругления зондового датчика.

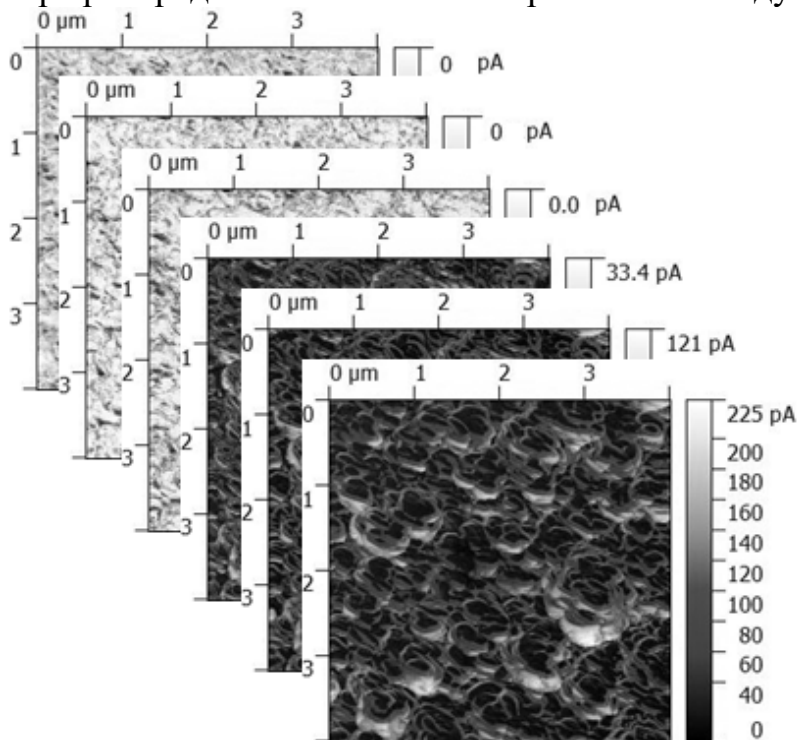
Установлено, что максимальный перепад высот исследуемой области наблюдается в начале сканирования. К концу сканирования значение перепада высот достигает минимального значения. Это может быть связано с тем, что по мере проведения измерений в контактном режиме происходит затупление зондового датчика (радиус закругления зонда увеличивается), соответственно, зонд ста-

новится менее чувствительным к рельефу поверхности и не проникает в определённые области исследуемого образца.

Электрофизические свойства пленок ZnO:Al исследовались с помощью туннельной атомно-силовой микроскопии [16]. Измерения осуществляются в режиме сканирующей микроскопии сопротивления растекания (SSRM) – одном из контактных режимов АСМ, при котором поддерживается постоянная сила прижима проводящего зонда к образцу, и одновременно регистрируются рельеф и карта распределения тока по поверхности исследуемого образца [13]. Метод туннельной АСМ дает возможность исследовать полупроводниковые структуры, покрытые естественным окислом, а также объекты, поверхность которых имеет непроводящие участки. С помощью туннельной АСМ возможно построение вольт-амперных характеристик (ВАХ) в локальных областях исследуемой поверхности, анализ которых позволяет получить информацию о ширине запрещенной зоны исследуемого материала [16].

Для измерений в режиме SSRM использовались зондовые датчики с алмазоподобным покрытием DCP11 с радиусом закругления порядка 100 нм, имеющие два прямоугольных кантилевера.

На выбранную область пленки ZnO:Al подавалось напряжение смещения в диапазоне от -10 до +10 В шагом в 0,5 В, в результате чего был получен набор карт распределения тока по поверхности исследуемого слоя ZnO:Al (рис. 3).



**Рисунок 3 - Набор карт распределения тока при -5В, -3В, -1В, +1В, +3В и +5В, соответственно**

кислорода, высокие концентрации которых ответственны за *n*-тип электропроводности ZnO.

По методике косвенного построения ВАХ по АСМ-данным была получена ВАХ пленки ZnO:Al (рис. 4) в выбранной точке (рис. 1). Алгоритм данной методики подразумевает проведение измерений в режиме SSRM и

Карты распределения тока (рис. 3) показали, что ток протекает частично по вершинам и преимущественно по границам зерен. Это может быть связано с тем, что при сканировании площадь контакта проводящего зонда с границей зерён много больше площади контакта острия с вершиной зерна, возможно истирание проводящего покрытия на острие зонда. Кроме того, оксид цинка как фаза переменного состава обладает «мемристинным» эффектом, который связан с перемещением заряженных вакансий

экспорт полученных данных в текстовый формат. Далее пользователь совмещает топографии (из-за термодрейфа исследуемая область смещается при многократном сканировании), при этом происходит автоматическое совмещение карт тока. Затем выбирается точка на топографии, в которой и строится локальная ВАХ [16].

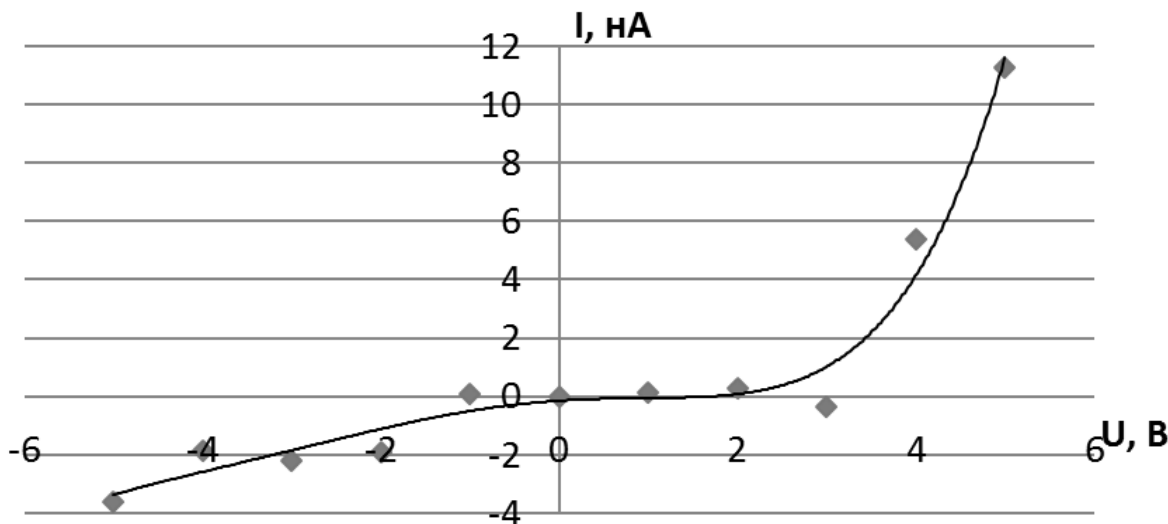


Рисунок 4 – ВАХ пленки ZnO:Al, построенная в среде LabVIEW

Туннельная ВАХ исследуемой пленки ZnO:Al, построенная в выбранной точке поверхности (рис. 4), позволяет определить энергетический зазор, соответствующий ширине запрещенной зоны исследуемого материала (3,36 эВ), и тип электропроводности пленки (*n*-тип).

#### **Заключение**

В данной работе были исследованы тонкие слои ZnO:Al, полученные методом спрей-пиролиза. Исследование электрофизических свойств показало, что ток протекает частично по вершинам и преимущественно по границам зерен. В режиме туннельной атомно-силовой микроскопии построены локальные ВАХ исследуемой пленки.

Изучено влияние количества сканирований на изменение радиуса закругления зондового датчика; установлена зависимость перепада высот, фиксируемых атомно-силовым микроскопом в исследуемом образце, от количества сканирований.

Работа выполнена в УНЛ «Наноматериалы» под руководством д.ф.-м.н., проф. В.А. Мошникова и к.ф.-м.н., доц. А.И. Максимова.

Авторы статьи выражают благодарность аспиранту кафедры микро- и наноэлектроники Л.Б. Матюшкину за предоставление образцов.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 16.2112.2014/К.

#### **Библиографический список**

1. Бобков А.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Сомов П.А., Теруков Е.И. Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 10. С. 1402-1406.

2. Бобков А.А. Исследование микроструктуры и сенсорных свойств наноструктурированных слоев оксида цинка // Молодой ученый. 2014. № 7. С. 115-118.
3. Рябко А.А., Лашкова Н.А. Синтез 1-D структур ZnO для фотовольтаики нового поколения // Молодой ученый. 2016. № 6 (110). С. 168-173.
4. Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Kuznezov V.V., Maximov A.I., Karpova S.S., Ponomareva A.A. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors // Journal of non-crystalline solids. 2010. Т. 356. № 37-40. С.2020-2025 (Scopus).
5. Давыдов С.Ю., Мошников В.А., Федотов А.А. Адсорбция газов на полупроводниковых оксидах: изменение работы выхода // Письма в Журнал технической физики. 2004. Т. 30. № 17. С. 39-44.
6. Сенькин А.Е., Селезнев Б.И., Максимов А.И., Мошников В.А. Микропроцессорный газоаналитический модуль // Вестник Новгородского Государственного Университета. 2004. № 26. С. 161-168.
7. Лашкова Н.А., Максимов А.И., Матюшкин Л.Б., Мошников В.А. и др. Локальные электрофизические свойства проводящих пленок ZnO // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 42. № 6. С. 48-53.
8. Benzarouk H., Drici A., Mekhnache M., Amara A., Guerioune M., Bernede J.C., Bendjffal H. Effect of different dopant elements (Al, Mg and Ni) on microstructural, optical and electrochemical properties of ZnO thin films deposited by spray pyrolysis (SP). // Superlattices and Microstructures. 52 (2012) 594-604.
9. Лашкова Н.А., Максимов А.И., Рябко А.А., Бобков А.А., Мошников В.А., Теруков Е.И. Синтез наноструктур на основе оксида цинка для создания гетероструктурных фотовольтаических элементов / ФТП. 2016. Т.50. №9. С. 1276-1280.
10. Стребков Д.С., Пореев И.А., Чирков В.Г., Ерхов М.В. Технологии получения и использования возобновляемых источников энергии для АПК // Техника и оборудование для села. 2008. №5. С. 29-31.
11. Бессель В.В., Беляев А.А., Зверев А.М. Энергосбережение в магистральном транспорте газа за счет использования возобновляемых источников энергии // Территория Нефтегаз. 2013. №9. С. 84-93.
12. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермяков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
13. Spivak Y.M., Moshnikov V.A. Features of photosensitive polycrystalline PbCdS layers with a network-like structure // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 4 (1) (2010) 71-76.
14. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 80 с.
15. Александрова О.А., Титков А.Н., Кононова И.Е., Максимов А.И., Мараева Е.В., Мошников В.А., Муратова Е.Н., Налимова С.С., Пермяков Н.В., Спивак Ю.М., Алексеев П.А. Диагностика материалов методами сканирующей зондовой микроскопии. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 172 с.
16. Лашкова Н.А., Пермяков Н.В., Максимов А.И., Спивак Ю.М., Мошников В.А. Анализ локальных областей полупроводниковых нанообъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки №1 (213). 2015. С. 31-42.

© Александрова А.А., Лашкова Н.А., 2016

**Гуща А.А.**

ассистент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк, Республика Беларусь

**Жорник И.В.**

д. т. н., доцент, заместитель начальника отделения технологий машиностроения и металлургии ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» г. Минск, Республика Беларусь

**Дудан А.В.**

к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк, Республика Беларусь

**Hushcha A. A.**

assistant of the department of road transport Polotsk state University, Novopolotsk, Republic of Belarus

**Zhornik V. I.**

Ph. D., associate professor, deputy head of department of manufacturing engineering and metallurgy SSI "joint Institute of mechanical engineering of NAS of Belarus", Minsk, Republic of Belarus

**Dudan A.V.**

Ph. D., associate professor of the department of road transport Polotsk state University, Novopolotsk, Republic of Belarus

## **ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДОБАВОК НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

### **THE EFFECT OF NANOSIZED ADDITIVES ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FRICTION UNITS OF MACHINES AND MECHANISMS**

Ключевые слова: наноразмерная добавка, трибосопряжение, смазочный материал, износ, разделительный слой.

Keywords: nano-sized additive, triboepedia, lubricant, wear, separation layer.

В статье приведены основные группы добавок для смазочных материалов, реализующих элементы нанотехнологий, и раскрыто их влияние на триботехнические свойства узлов трения машин и механизмов. Исходя из анализа доказано, что введение в смазочный материал наноразмерных добавок позволяет снизить коэффициент трения в 2-3 раза, интенсивность изнашивания до 30 раз, потери на трение в 1,5-2 раза, повысить предельную нагрузку на 56 %, а также изменить структуру поверхности трения за счет эффектов дисперсного упрочнения и трибомеханического модифицирования.

The article presents the main groups of additives for lubricants, implementing elements of nanotechnology, and reveals their influence on tribological properties of friction units of machines and mechanisms. Based on the analysis it is proved that the introduction of the lubricant nano additives allows to reduce the coefficient of friction in 2-3 times the wear rate up to 30 times, friction losses 1.5-2 times, to increase the ultimate load by 56 %, and change the structure of the friction surface due to the effects of dispersion hardening and tribomechanical modification.

Использование методов триботехнологии в настоящее время является одним из наиболее эффективных путей решения задачи улучшения триботехнических свойств и увеличения ресурса узлов трения машин и механизмов.

Непрерывное повышение нагрузочно-скоростных режимов работы трибосопряжений и связанное с ним повышение температур в зоне трения требует постоянного совершенствования смазочных материалов, методов расширения их нагрузочного и температурного диапазонов работы. При интенсивной работе в узлах трения пластичная смазка практически полностью выдавливается из зоны

трения, вне зависимости от природы ее загустителя и масла. В подобных случаях важную роль играют наноразмерные добавки, представляющие собой твёрдые нерастворимые вещества с характерными размерами от 0,1 нм до нескольких десятков нм, которые поддерживают высокие антифрикционные и противоизносные свойства базового смазочного материала в процессе трения. Введенные в состав смазки разнообразные твердые добавки даже в случае выдавливания смазочного материала из зоны трения остаются в ней, образуя разделяющий слой, не допускающий контакта металлических поверхностей. Структура и свойства подобных слоев зависят от природы твердых добавок и способа их действия.

В настоящее время для смазочных материалов, применяемых в узлах трения машин и механизмов, наиболее часто используются следующие группы добавок, реализующих элементы нанотехнологий: восстановительные добавки или реметаллизанты, геомодификаторы, нанокондиционеры металла, рекондиционеры, антифрикционные и прирабочные препараты на основе наноалмазов.

Реметаллизанты представляют собой составы, в которых содержатся соединения или ионы мягких металлов. Эти соединения, попадая в зону трения, заполняют микронеровности и создают плакирующий слой, восстанавливающий поверхность, что обеспечивает безизносную работу пар трения, предотвращает износ рабочих поверхностей в процессе их эксплуатации и восстанавливает уже изношенную поверхность узлов трения при одновременном сохранении основных технологических показателей смазки. Они обеспечивают увеличение долговечности деталей машин в среднем в 3 раза [1, с. 499]. В результате применения смазочной композиции, содержащей мыльную пластичную смазку и порошкообразный наполнитель - смесь наноразмерных порошков железа, никеля и цинка дисперсностью 10-30 нм в концентрации 1% предельная нагрузка вызывающая усталостное разрушение увеличилась на 56% по сравнению со смазочной композицией без наполнителя, а число циклов до начала разрушения увеличилось на 53%. При этом износ образцов уменьшился в 2,3 раза, момент трения в 1,13 раза, а значение параметра шероховатости снизилось в 2,25 раза [2, с. 2].

Зарубежными и отечественными учёными разработано множество различных композиций на основе минералов естественного и искусственного происхождения (нано- и микроуровня), получивших наименование геомодификаторы трения (ГМТ). Попадая на поверхности трения вместе с маслом или в составе пластичной смазки, они инициируют процесс формирования на трущихся поверхностях наноразмерной структуры с высокой износостойкостью и малым коэффициентом трения [3, с. 421]. В результате применения концентрированной взвеси ГМТ на основе серпентина с дисперсностью природного минерала 0,01–5 мкм в механизмах и устройствах на 50–70 % снижаются износ узлов трения, в 1,5–2 раза потери на трение и на 50–100 % виброактивность [4, с. 3]. Это обусловлено увеличением фактической площади контакта и формированием на исходной структуре динамического ультратонкого слоя углеводородных цепочек, частиц ГМТ и продуктов износа менее микрометра (квазисжиженный слой).

На основе серпентина и сопутствующих ему примесей разработан состав для обработки пар трения, который включает мелкодисперсный порошок алмаза или шунгита и металлосодержащую добавку – смесь мелкодисперсных порошков



металлов, выбранных из металла основы и металлов, образующих устойчивые системы с материалом основы, взятые из ряда Cr, Ni, Mo, Nb, Ti и их сплавы [5, с. 2]. Такое сочетание компонентов обеспечивает формирование прочносвязанного с поверхностью трения модифицированного упрочненного поверхностного слоя заданного состава, и за счет этого достигается стабильное уменьшение износа и коэффициента трения механизмов и машин. Например, для пары трения сталь45 – сталь45, поверхности которой обработаны таким составом, характерны следующие технико-эксплуатационные показатели: твердость 390–410 HRC, коэффициент трения 0,006–0,008, компенсация износа 1–3 мм [5, с. 3].

Нанокондиционеры в результате трибохимических реакций (образования, распада и восстановления соединений металла с активными молекулами продукта в зоне трения) образуют защитный граничный слой (20–40 нм). Он обладает высокими пластичными, упругими и антифрикционными свойствами и стойкостью к высоким нагрузкам. Использование ферромагнитных наночастиц в качестве добавки к смазочным материалам способствует уменьшению шероховатости поверхности, а благодаря хорошему охлаждающему эффекту таких смазок, можно добиться очень высоких рабочих скоростей, и, таким образом, повысить производительность трибосопряжений [6, с. 2]. Установлено, что смазочные композиции с добавками магнетита на основе пластической смазки «Циатим-201» и масла Castrol с содержанием магнетита 0,1 % мас. обладают высокими противозадирными и противоизносными свойствами. При этом увеличение содержания магнетита в смазках приводит к снижению их противоизносных свойств [7, с. 89].

Полимолекулярная система рекондиционеров включает наноразмерные комплексы (кластеры) органических веществ. Они выполняют функцию реологической, противоизносной и противозадирной добавки и способствуют стабилизации вязкости смазки в условиях перепада температур и формированию разделительного слоя в зоне фрикционного контакта, предотвращающего износ и схватывание деталей пары трения. Особенно эффективны такие смазки в условиях действия больших контактных нагрузок и повышенных температур, когда смазочный слой разрушается, что приводит к прямому взаимодействию микронеровностей поверхностного слоя контактирующих деталей узла трения.

Наличие в смазке полимерных частиц обеспечивает существенный противоизносный и противозадирный эффект благодаря деформированию частиц полимерного наполнителя и образованию разделительного слоя более высокой прочности по сравнению с граничным слоем смазки. Большое значение при этом имеют размер и форма частиц, молекулярная масса, деформационно-прочностные характеристики, стойкость к окислению и термомеханической деструкции и т.п. [8, с. 695].

Применение ультрадисперсных алмазов (УДА) в качестве модификатора смазочных материалов обусловлено рядом факторов: наноалмазы структурируют масляную пленку, увеличивают ее динамическую прочность, действуют на кристаллическую решетку поверхности металла, упрочняя ее, формируют новые поверхности трения, уменьшая граничное трение и износ (особенно при больших нагрузках).

В работе [9, с. 34] исследовали смазочную композицию Литол-24 с добавлением 1 % порошка ультрадисперсной алмазографитовой шихты (УДАГ) от массы смазочного материала. По мере возрастания нагрузки в зоне контакта

наблюдалась интенсификация процесса модификации контактирующих поверхностей, и трение основного материала заменялось трением защитных плёнок. За счет этого коэффициент трения снизился в 2-3 раза, а интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей уменьшилась на 20-40 %.

Авторы работы [10, с. 2] предлагают использовать добавки ультрадисперсного алмаза в качестве приработочного компонента смазочного материала. Разработанная ими смазка содержит серу – 10-15 мас.%, дисульфид молибдена – 10-20 мас.%, инденкумароновую смолу – 5-7 мас.%, порошок ультрадисперсного алмаза или ультрадисперсной алмазосодержащей шихты – 1-15 мас.% и стеариновую кислоту – остальное. В результате, применение такой смазки позволяет повысить эффективность операции шлифования и заточки на 10-25 %, чистоту обрабатываемой поверхности в 1,5-2 раза с одновременным улучшением экологических условий ведения работ.

Наряду с хорошими приработочными свойствами частицы ультрадисперсного алмаза благодаря большой поверхностной энергии, а также совместимости углеродных кластеров с масляной основой обладают высокими структурирующими свойствами. Это их качество используется для создания пластичных смазочных материалов с разветвленным структурным каркасом, обладающим высокой маслоудерживающей способностью и обеспечивающей увеличенную коллоидную стабильность смазки и повышенную нагрузочную способность смазочной пленки.

Дополнительное введение графита в количестве 2,0-4,0 мас.% и УДА в количестве 1,6-3,2 мас.% смазочную композицию на основе дисульфидмолибденовой пасты ВНИИНП-225, причем размер частиц графита составляет 0,1-1,0 мкм, а УДА имеют размер частиц 8-30 нм повышает ее противоизносные и антифрикционные свойства и расширяет диапазон ее рабочих нагрузок [11, с. 3]. УДА на стадии приработки обеспечивают полировку контактирующих поверхностей трения, а в процессе дальнейшей работы способствуют деформационному упрочнению поверхностного слоя материалов сопряжения. Графит же наряду с имеющейся у него анизотропией свойств обладает высокими адсорбирующими свойствами к молекулам газов и паров. Образующаяся при этом на поверхности плотная гомогенная смазочная пленка обладает высокой несущей способностью.

Результаты триботехнических испытаний, представленные в работе [12, с. 444] показывают, что использование частиц наноалмазов в качестве твердых добавок в смазочных материалах наряду с повышением критической нагрузки изменяет условия формирования смазочного слоя в зоне трения и интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей. При этом интенсивность изнашивания контактирующих поверхностей в значительной степени определяется исходной твердостью материала, а положительный эффект от модифицирования убывает по мере возрастания твердости. Установлено, что модифицирование смазки Литол-24 добавками наноалмазов марки УДАГ снижает интенсивность изнашивания образцов из стали 45 твердостью 20-25 HRC примерно в 30 раз, образцов из стали ШХ-15 твердостью 35-40 HRC – в 5 раз, а для стали ШХ-15 твердостью 62-65 HRC интенсивность изнашивания при использовании модифицированной смазки несколько возрастает с  $0,07 \cdot 10^{-7}$  до  $0,08 \cdot 10^{-7}$  г/м (таблица 1).

Таким образом, введение в смазочный материал наноразмерных добавок способствует повышению его триботехнических свойств (уменьшение коэффициента

трения в 2-3 раза, интенсивности изнашивания до 30 раз, потерь на трения в 1,5-2 раза, при этом предельная нагрузка увеличивается на 56 %), изменяет структуру поверхности трения за счет эффектов дисперсного упрочнения и трибомеханического модифицирования.

**Таблица 1 - Триботехнические характеристики материалов трибосопряжения**

Наименование характеристики	Материал пары трения	Литол-24	Литол-24 + УДАГ
Критическая нагрузка, Н		710	750
Нагрузка сваривания, Н		1410	1600
Интенсивность изнашивания поверхности трения, г/м · 10 <sup>-7</sup>	Сталь 45 (HRC 20-25)	4,04	0,12
	Сталь ШХ-15 (HRC 35-40)	0,63	0,11
	Сталь ШХ-15 (HRC 62-64)	0,07	0,08

Включенные в состав дисперсной фазы смазочного материала наноразмерные частицы повышают коллоидную стабильность смазочного материала, увеличивают маслоудерживающую способность структурного каркаса смазки, придают смазочному материалу противозадирные свойства, что, в совокупности, приводит к повышению стабильности и несущей способности смазочного слоя, а также формируют в поверхностных слоях контактирующих пар износостойкую ячеистую структуру за счет процессов их интенсивного пластического деформирования.

#### Библиографический список

1. Голубев И.Г., Неменуца Л.А. Применение нанотехнологий для увеличения долговечности деталей машин // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3. №. 1. С. 495-500. DOI: 10.12737/17830.
2. Смазочная композиция для тяжело нагруженных узлов трения: патент 2258080 РФ МПК С 10М 125/04. / Сафонов В. В. [и др.]; заявитель ФГОУ ВПО "Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова". – № 2004104508/04; – заявл. 16.02.2004; опублик. 10.08.2005, бюл. № 6.
3. Korres Spyridon, Feser Tim, Dienwiebel Martin. In situ observation of wear particle formation on lubricated sliding surfaces // Acta Materialia. – 2012. Volume 60, Issue 1. P. 420-429.
4. Состав смазочных материалов: патент 2176267 РФ МПК С 10М 125/26. / Лавров Ю.Г., Половинкин В.Н.; заявитель Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова. – № 2000104440/04; – заявл. 22.02.2000; опублик. 27.11.2001, бюл. № 2.
5. Состав для обработки пар трения: патент 2168662 РФ МПК С 10М 125/02. / Александров С. Н. [и др.]; заявитель С. Н. Александров. - №2000115545/04. – заявл. 15.06.2000; опублик. 10.06.2001, бюл. № 4.
6. Schmiermittel zur Metallbearbeitung mit ferromagnetischen oder ferrimagnetischen Nanopartikeln: patent DE19949032 A1 / Piona Lange, Marcel Roth; заявитель Cognis Deutschland GmbH. – № DE1999149032; – заявл. 12.10.1999; опублик. 19.04.2001, бюл. № 2.
7. Изучение влияния ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок / Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э. / Вестник ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, РФ. – №1(80). - 2015. – С. 85-92.
8. Смуругов В.А., Русый В.Х., Шелобод Л.И., Савкин В.Г., Халапсина Т.И. Смазочно-охлаждающая технологическая среда для операций холодной вытяжки труднодеформируемых металлов // Трение и износ (Friction and Wear). Т 17. - № 5. - 1996. - С. 694-698
9. Терентьев В.Ф. Оптимизация трибопараметров подшипниковых узлов и зубчатых передач путём создания новых смазочных материалов, модифицированных ультрадисперсными добавками // автореферат диссертации на соискание уч. степени д.т.н. г. Красноярск, РФ. – 2004. – с. 44.
10. Антифрикционная смазка для абразивной обработки материалов: патент 2030449 РФ МПК С 10М 125/02. / Баранов А. И. [и др.]; заявитель Научно-производственное объединение «Алтай». – № 4931340/04; – заявл. 26.04.1991; опублик. 10.03.1995, бюл. № 5.
11. Смазочная композиция для тяжело нагруженных узлов: патент 5906 РБ МПК С10М 169/04 / П. А. Витязь, В. И. Жорник, В. А. Верещагин, Н. Е. Гильнич; заявитель ОИМ НАН Беларуси. - № а 20000276; заявл. 27.03.2000; опублик. 30.03.2004, бюл. №3.
12. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларусь. наука, 2011. – 527 с. – ISBN 978-985-08-1247-6.

**Даньшина А.К.**

студент 2 курса механического факультета Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

**Новикова Т.П.**

канд. техн. наук, ст. преп. кафедры вычислительной техники и информационных систем Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

**Danshina A.K.**

2 year student of the Automotive Faculty, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Russian Federation

**Novikova T.P.**

PhD., senior lecturer of computer science and information systems department, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Russian Federation

## **ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

### **THE USE OF NANOTECHNOLOGY, NAMELY NANO-COMPOSITE MATERIALS IN THE TRANSPORT AND PROCESSING FACILITY**

Ключевые слова: нанотехнологии, нанокompозит, наноглина, транспортно-технологический комплекс

Keywords: nanotechnology, nanocomposite, nanoclay, transport-technological complex

Усиленная полимеризация компонентов транспортно-технологического комплекса является перспективным подходом к повышению экологической безопасности, но при этом необходимо не снижать требования к безопасности движения, стоимости конечного продукта. Нанокompозиты на основе геологически добываемых наноглин имеют определенные перспективы при использовании в составе элементов кузова, движителя и других компонентов транспортных средств.

Enhanced polymerization of the transport-technological complex components is a promising approach to increase environmental safety, but must not reduce the requirements for traffic safety, the cost of the final product. Nanocomposites based on geologically produced nanoclay have some promise when used in the composition of the elements of the body, wheels and other vehicle parts.

Использование нанотехнологий в транспортно-технологическом комплексе приобретает массовый характер [1-11]. Например, Audi и Daimler Chrysler в серийном производстве автомобилей наносят антибликовое покрытие (Schott Conturan) панели управления на основе нескольких нанослоев. В General Motors Corp. используют нанокompозит – термопластичный олефин в конструкциях кузовов Chevrolet Astro и GMC Safari. Усиленная полимеризация компонентов кузова является перспективным подходом к снижению массы и, как следствие, повышению экологической безопасности [12-15], но при этом необходимо не снижать требования к безопасности движения, стоимости конечного продукта. Кроме того, улучшение на 30 % показателей сопротивления качению, сопротивления воздуха, массы или характеристик энергетической установки автомобиля может уменьшить потребление традиционного топлива на 4, 6, 15 и 28 % соответственно [2]. Менеджер по проектам в области нанотехнологий компании «YOLE Développement» (Франция) считает [16], что «ав-

томобильная промышленность – одна из многих областей, испытывающая растущее влияние наноматериалов, ... в том числе и при использовании структурированных пластмассовых частей, сочетающих высокие механические показатели при одновременном снижении массы».

Нанокompозит – это многофазный (многокомпонентный) твердый материал, в котором хотя бы одна фаза (компонент) снабжена средним параметром кристаллитов (зерен) в нанодиапазоне (до 100 нм) [17]. В отличие от классических композитных материалов, нанокompозиты обладают исключительно высоким отношением площади поверхности к объему.

Армирующий материал обычно состоит из частиц, волокон (нанотрубок) или листов. Взаимодействие матрицы и усиливающей фазы чаще всего значительно выше, чем у рядовых композитных материалов. На основании этого большая площадь поверхности усиливающей фазы означает, что значительно меньшее количество армирующего составляющего оказывает ощутимое изменение на свойства композита. К примеру, если добавить в состав углеродные нанотрубки, то вырастает показатель тепло и электропроводности. Иные же наночастицы оказывают влияние на другие различные свойства материала: оптические, термические (жаропрочность, теплоизоляционность), электрические, магнитные, не менее важные механические – упругость, жесткость, коррозионная стойкость, и др.

В отношении вида основной матрицы, составляющей больший объем нанокompозита, они делятся на три типа [17]: нанокompозиты с основой из керамической матрицы (обладают повышенными оптическими и электрическими характеристиками изначального материала); нанокompозиты с основой из металлической матрицы (армирующим материалом выступают нанотрубки, обеспечивающие повышенную прочность и электропроводимость); нанокompозиты с полимерной матрицей (по матрице равномерно распределяется наполнитель (наночастицы) с плоской сферической/волокнуистой структурой).

В настоящее время нанокompозиты с полимерной матрицей (далее полимерные нанокompозиты) вызвали к себе повышенный интерес, так как имеется множество различных наполнителей, повышающих свойства обычных полимеров. Роль основной матрицы здесь играют: нейлон, полипропилен или полиамид, а остальными составляющими компонентами выступают: углеродные и кремниевые волокна (нанотрубки), оксид титана и оксид алюминия [18]. По своим характеристикам полимерные нанокompозиты, преобладают над рядовыми композитными материалами. Они имеют повышенные ударопрочность при относительно меньшей массе материала и стойкость к агрессивной химической среде. Все это приводит к востребованию нанокompозитов в военной и космической промышленности, а также в интересующем нас транспортно-технологическом комплексе. Важной составляющей в процессе изготовления полимерных нанокompозитов является совмещение основы материала и добавления к ней наночастиц.

По мнению специалистов компании «Transparency Market Research (TMR)» [20], развитие автомобильной промышленности является ключевым фактором, формирующим спрос на мировом рынке наноглинистых композитов (Global

Nanoclay Market), совокупный среднегодовой темп роста (Compound Annual Growth Rate, CAGR) которого прогнозируется на 12 % с 2005 по 2023 годы. Так, например, исследованиями установлено, что добавление к стеклоармированным полимерным пластикам [21], а также силоксановым резинам [22] 1,5 % по составу наноглинистого наполнителя Cloisite 30B (производитель – Southern Clay Co., США) способствует улучшению некоторых свойств: термостойкости, сопротивлению ударных воздействий и т.д. Другим примером повышения энергопоглощающей способности нанокompозитных материалов является вынужденный переход от вязкого к хрупкому разрушению полимерной матрицы (Tarnamid T30 или Morlen HP500J) при введении в нее нанослоистых силикатов в виде модифицированного монтмориллонита (DELLITE, Laviosa) [23].

Таким образом, использование полимерных нанокompозитов на основе слоистых силикатов в транспортно-технологическом комплексе позволит увеличить жизненный цикл изделий.

#### **Библиографический список**

1. Coelho M.C., Torrão G., Emami N., Grácio J. Nanotechnology in Automotive Industry: Research Strategy and Trends for the Future – Small Objects, Big Impacts // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2012. Vol. 12. P. 6621-6630. DOI: 10.1166/jnn.2012.4573.
2. Presting H., König U. Future nanotechnology developments for automotive applications // Materials Science and Engineering: C. 2003. Vol. 23, Iss. 6-8. P. 737–741. DOI:10.1016/j.msec.2003.09.120.
3. Новиков А.И. Применение нанотехнологий в автомобильном транспорте. [Текст] : учебное пособие / А.И. Новиков ; М-во образования и науки РФ, ФБГОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2016. – 156 с.
4. Попов Е.Ю., Новиков А.И. К вопросу использования эффекта гидрофобного скольжения в автомобильном транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 1. С. 333-336.
5. Головин С.А., Бурков М.Р., Елисеев И.Н., Новиков А.И. К вопросу использования на автомобильном транспорте наноматериалов для хранения водорода // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: в 3-х томах. ответственный редактор Горохов А.А. 2014. С. 156-158.
6. Шигин К.А., Новиков А.И., Новикова Т.П. К вопросу использования наночастиц для повышения качества автомобильных смазочных материалов // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции; под общей редакцией А.И. Новикова. 2014. С. 361-363.
7. Новиков А.И., Кузьмин А.Г. Механические свойства УНТ как основа выбора сферы их рационального применения в автомобильном транспорте // Перспективы развития науки и образования сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. 2014. С. 87-88.
8. Соболев К.О., Новиков А.И. К вопросу применения квантовых компьютеров в автомобильном транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 458-460.
9. Ананьев М.В., Новиков А.И. О применении нанодвигателей // Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях. 2013. С. 11-12.

10. Новиков А.И., Новикова Т.П., Евтеев М.Д. Нанозлектроника: очередной этап развития электронной техники // Техника и технологии: пути инновационного развития материалы III Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Горохов А.А., Куц В.В., Юго-Западный государственный университет. 2013. С. 140-142.
11. Новиков А.И., Гурдов А.В. О возможном использовании графена в автомобильном транспорте // Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях. 2013. С. 90-92.
12. Новиков А.И. О дилемме повышения эффективности и экологической безопасности автомобильных энергетических установок // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 5. С. 246-248.
13. Волков В.С., Новиков А.И., Колупаев М.В., Чалик В.А. О снижении токсичности отработавших газов автомобильного транспорта // Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях. 2013. С. 34-36.
14. Новиков А.И. Перспективы развития альтернативных источников энергии, способных обеспечить экологическую безопасность и ресурсосбережение в автотранспортном комплексе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5-1. С. 189-194.
15. Новиков А.И. Опыт применения альтернативных источников энергии в транспортно-технологическом комплексе // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 62-65.
16. Pieters B. Nanocomposites in automotive: research activities and business realities // JEC Group [Site]. URL: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/nanocomposites-automotive-research-activities-and-business> (дата обращения: 12.06.2016).
17. Chawla K.K., Chawla N. Automotive composites // Wiley Encyclopedia of Composites. Second Edition. Edited by L. Nicolais and A. Borzacchiello. 2012. DOI: 10.1002/9781118097298.weoc012.
18. Михайлов М.Д. Современные проблемы материаловедения. Нанокompозитные материалы. Учебное пособие. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2010. – 208 с.
19. Третьякова В.Д., Бахов Ф.Н., Демидёнок К.В. Использование современных композиционных материалов на основе слоистых силикатов в автомобильной промышленности // Интернет-журнал Науковедение. 2011. №4 (9). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-sovremennyh-kompozitsionnyh-materialov-na-osnove-sloistyh-silikatov-v-avtomobilnoy-promyshlennosti> (дата обращения: 12.06.2016).
20. Booming Automotive Industry Drives Demand up in Global Nanoclay Market / Posted on Nov 17, 2015 // Transparency market research [Site]. URL: <http://www.transparencymarketresearch.com/article/nanoclays-market.htm> (дата обращения: 12.06.2016).
21. Esfahani J.M., Esfandeh M., Sabet A.R. Analytical models versus experimental results for composites containing nanoclay as secondary reinforcement under high velocity impact // International Journal of Crashworthiness. 2012. Vol. 17, Iss. 4. P. 430–444. DOI: 10.1080/13588265.2012.674332.
22. Ибрагимов М.А., Архиреев В.П. Влияние слоистых силикатов на вулканизационные, реологические свойства и термостойкость силоксановых резин // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 21. С. 80-83.
23. Sachse S., Gendre L., Silva F., Zhu H., Leszczyńska A., Pielichowski K., Ermini V., Njuguna J. On Nanoparticles Release from Polymer Nanocomposites for Applications in Lightweight Automotive Components // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 429. Article 012046. DOI:10.1088/1742-6596/429/1/012046.

© Даньшина А.К., Новикова Т.П., 2016

**Деева П.В.**

ученик школы

Томск, РФ

**Тетерин В.С.**

аспирант

Омский государственный  
технический университет, РФ**Деева В.С.**

кандидат техн. наук, доцент,

Омский государственный  
технический университет, РФ**Слободян С.М.**

доктор техн. наук, профессор

Омский государственный  
технический университет, РФ**Deeva P.V.**

student of the school

Tomsk, Russian Federation

**Teterin V.S.**

aspirant,

Omsk State Technical University,  
Russian Federation**Deeva V.S.**

assistant professor,

Omsk State Technical University,  
Russian Federation**Slobodyan S.M.**

Doctor of Technical Science, professor,

Omsk State Technical University,  
Russian Federation

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛЯПУНОВА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ НАНОСИСТЕМ

### USING THE LYAPUNOV'S METHOD FOR EVALUATION OF NANOSYSTEM STABILITY

Ключевые слова: оценка, динамика, устойчивость, воздействие, метод Ляпунова.

Keywords: evaluation, dynamics, stability, impact, Lyapunov's method.

В статье изложены основные положения концепции оценки устойчивости наносистем по методу Ляпунова. Применение устройств, мешающих коагуляции фракций нанопотока при его движении, является актуальным. Выполнено краткое обобщение основных подходов известных исследований с применением метода функций Ляпунова при анализе динамической устойчивости систем.

When the nanoparticles move in pipe flow, there is a strong trend for particle coarsening. The prediction of cluster aggregation as well as the application of devices, which prevents coagulation and aggregation of the viscous nanoparticles in complex pipe systems, is of major importance in many processes. The article outlines the basic concepts of Lyapunov's method for stability of dynamical nanosystem. In conclusion we summary the main empirical findings and provide method for performing a stability analysis.

Ранее [1–6] применением классического метода Ляпунова А.М. оценки устойчивости [7–9] было определено, что, например [1–2] для стержневой структуры «стержень–шар» с падающим на неё вязким потоком существует оптимальный размер элементов системы «шар–опорное тело» и установлены взаимосвязи размеров отдельных элементов, справедливые, в том числе, для наноразмерного аналога системы. В технической литературе существуют [10–20] разные подходы применения фундаментального метода Ляпунова для оценки устойчивости. Большое число модификаций методологий и конкретных прило-



жений метода функций Ляпунова активно используется до настоящего времени для исследования устойчивости больших и малых, простых и сложных систем, устройств и процессов в разных отраслях при решении научных, прикладных и промышленных задач [3–6, 10–20]. Авторами многих работ полученные результаты трактуются как развитие метода. Поэтому, выявление отличительных особенностей и сопоставление, реализованных для разных приложений, имеющих в печати модификаций методологии применения подхода А.М. Ляпунова по оценке устойчивости систем и процессов для развития nanoиндустрии представляет определённый интерес и является актуальным.

В работе проведён сравнительный анализ результатов некоторых публикаций с применением метода функций Ляпунова в оценке и анализе динамической устойчивости больших и малых систем и процессов с отражением особенностей применения такого подхода в решении конкретных задач.

Колебательным движениям подвержены практически все, без исключения, физические, технические, химические и социальные процессы, простые и сложные структуры и системы. Для их анализа и синтеза широко используются разные математические методы, часто адаптируемые под решение конкретных проблем и задач. Как правило, считается, что простая или сложная техническая система (или протекающий в ней процесс), наилучшим образом выполняющая возложенные на неё задачи, находится в состоянии устойчивого равновесия или в области параметров состояния весьма близкого к устойчивому положению (нормы процесса). Поэтому, для предотвращения нарушения устойчивого состояния любой системы подверженной колебаниям движения, обычно, устанавливаются условия, при соблюдении которых положение равновесия реальной системы будет устойчивым. За основу оценки принимают положения фундаментальных определений устойчивого равновесия систем. Одним из таких мощных фундаментальных определений устойчивости систем и процессов является определение данное А.М. Ляпуновым [7–9]. В частности, его определение устойчивости системы с любым конечным  $n$  – числом степеней свободы:

Равновесие системы называется устойчивым, если для любого достаточно малого  $\varepsilon > 0$  можно выбрать два других таких малых числа  $\eta_1 > 0$  и  $\eta_2 > 0$ , что при удовлетворении начальными значениями обобщённых координат и скоростей неравенств  $|q_i^0| < \eta_1$ ,  $|\dot{q}_i^0| < \eta_2$  в любой момент времени все обобщённые координаты подчиняются условиям  $q_i(t) < \varepsilon$ .

В этом определении:  $\varepsilon$  – некоторое число, определяющее окрестность координат положения равновесия;  $q_1, q_2, \dots, q_k$  – обобщённые координаты, отсчитываемые от положения равновесия системы (в положении равновесия они равны нулю);  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_k$  – начальные значения обобщённых координат и  $\dot{q}_1^0, \dot{q}_2^0, \dots, \dot{q}_k^0$  – начальные обобщённые скорости их изменения, вкуче составляющие начальное возмущение системы или процесса.

Другими словами, по Ляпунову, положение равновесия считается устойчивым, если можно задать достаточно малую область изменения начальных значений обобщённых координат в окрестности положения равновесия и область начальных обобщённых скоростей, для которых величины обобщённых

координат при последующем движении системы ограничены заданной  $\varepsilon$  окрестностью вблизи положения равновесия. В положении равновесия системы каждая обобщённая сила  $Q_i$  равна нулю. Для потенциального силового поля обобщённые силы определяются скоростью изменения потенциальной энергии

$$Q_i = \frac{\partial \Pi}{\partial q_i}, \quad i=1, 2, \dots, n.$$

Отсюда, в положении равновесия  $\partial \Pi / \partial q_i = 0$ , а потенциальная энергия системы в этом положении может иметь экстремальное значение.

Функции Ляпунова, составляющие основу аналитической динамики, решения проблем устойчивости и качественного исследования уравнений возмущённого движения, действительно применяются как для исследования устойчивости практических систем, так и проектирования устойчивых вновь создаваемых систем. При построении устойчивых систем с помощью метода функций Ляпунова важным и ответственным шагом является выбор самой функции Ляпунова, удовлетворяющей требованиям той или иной теоремы об устойчивости. Функции должны быть выбраны так, чтобы получить физически легко интерпретируемые условия устойчивости, конструктивно осуществимые [7–14].

Кратко рассмотрим, обобщая некоторые варианты, практику [15–20] выбора математических закономерностей как формы используемой по методу функций Ляпунова. В основе выбора закономерностей поведения системы по методу функций Ляпунова в работах так или иначе принимается динамика изменения потенциальной энергии исследуемой системы, т.е. основное определение устойчивости по Ляпунову. Другими словами, о результатах этих работ можно говорить как о частных примерах применения теории устойчивости Ляпунова к оценке состояния процесса сохранения устойчивости положения равновесия конкретных систем при действии возмущений, принятых авторами.

Основное отличие – в большинстве опубликованных работ авторами вводится своя терминология. Так, например [17–19], потенциальная энергия называется энергетической функцией, а её частная производная (частный дифференциал) – функцией переходной энергии и т.д. и т.п. При этом конечная цель исследования, определённая Ляпуновым, сохраняется – определение координат устойчивых и неустойчивых положений равновесия динамической системы. Попытка введения новой авторской терминологии для общепринятых понятий физики только затрудняет понимание целей и результатов исследования. В конечном счёте, за критерий получения результата принимают достижение динамической системой с выбранной авторами функции по методу Ляпунова области «*minimum minimorum*» (миниморум) экстремального её поведения в одном из неустойчивых положений её равновесия.

Отличительные особенности применения многими метода функций Ляпунова в оценке динамической устойчивости объекта рождаются на втором этапе решения практической задачи, а именно, на этапе подбора математической функции Ляпунова с наибольшей аутентичностью соответствующей постановке исследования и достижению желаемого результата решений.

Именно этап, связанный с созданием новой математической модели или преобразованием существующей модели динамического поведения исследуемого процесса, часто заявляется, как развитие метода функций Ляпунова, например, преобразование математической модели динамики процесса установления устойчивости по траектории координат, определяемой движением центром инерции объекта исследования [17]. В другом случае [17–19] – по траектории движения поиска седла фазового пространства в окрестности координат области устойчивости системы по выбранному критерию оценки её состояния.

Покажем кратко сущность некоторых, в принципе совпадающих моделей. Рассмотрим особенности моделей двух методов, представленные авторами системой дифференциальных уравнений в матричной форме: метод (potential energy boundary surface – PEBS) [17]

$$\begin{cases} \dot{\delta} = s \\ J\dot{s} = p_m - p_e - Ds \end{cases} \quad (1)$$

и метод (boundary controlling unstable – BCU) [8, 9]

$$\begin{cases} \dot{\delta} = s \\ J\dot{s} = -\frac{\partial U_p(\delta)}{\partial \delta} - Ds \end{cases} \quad (2)$$

Сравнивая приведённые в работах системы дифференциальных уравнений (1) и (2) видим, что, несмотря на различие в названиях методов [17] и [18–19], обе системы, с точки зрения математики описывают одно – процесс изменения разности уровней кинетической энергии между смежными точками отсчета. Убедиться в этом легко, составив равенство в принятых обозначениях:

$$p_m - p_e = -\frac{\partial U_p(\delta)}{\partial \delta} \quad (3)$$

В обеих частях (3) изменение энергии в той же области, но заданные в разных формах описания. Идентичность первых уравнений в системах подтверждает тождественность описания систем. Оба вторых уравнений являются рекуррентными по форме и своим разностным значением связывают изменение энергий в текущих координатах движения системы как объекта исследования на траектории изменения состояний «устойчивость–неустойчивость».

Повышение точности и сходимости решений, использованными в [17] и [19] рекуррентными процедурами, вторых уравнений систем (1) и (2), в тех случаях, когда точность математических моделей исследователей не удовлетворяет, достигается разными способами, подробно излагаемыми в [9,17–20].

В заключение анализа можно сделать следующее обобщение.

Упрощение аналитической модели классического подхода исследования устойчивости динамических систем с помощью функций Ляпунова рекуррентными процедурами, чаще всего, не обеспечивают желаемой точности решений. Они рождают усложнение исследований поиском методов повышения точности и сходимости упрощающих итерационных, более простых процедур описания движения и решения проблем устойчивости объекта исследования.

### Библиографический список

1. Тетерин В.С., Деева В.С., Слободян С.М., Щербань К.В. Оптимальный шар разделителя вязкого потока [Текст] // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. № 1. – С. 138–141. – DOI: 10.12737/18577.
2. Deeva, V.S. Optimization of the parameters for disperser for separating particles of oil [Текст] / V.S. Deeva, S.M. Slobodyan, V.S. Teterin // The 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, 2016 (ICIE 2016), May 19-20, 2016; 2016. pp. 1–4.
3. Деева, В.С. Энтропийный подход к оценке живучести средств контроля [Текст] / В.С. Деева, С.М. Слободян // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (126). – С. 121–128.
4. Деева, В.С. Устойчивость энтропийной оценки живучести систем [Текст] / В.С. Деева, С.А. Романишина, С.М. Слободян // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. № 2. – С. 67–72.
5. Slobodyan, S.M. Optimization of a bimorph drive in optical measuring systems with feedback [Текст] / S.M. Slobodyan // Measurement Techniques. – 2003. – V. 46. No. 1. – P. 28–34.
6. Деева, В.С. Живучесть контакта прерываемого скольжения [Текст] / В.С. Деева, С.М. Слободян, С.М. Слободян // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 6. – С. 59–65.
7. Никитин, Н.Н. Курс теоретической механики [Текст] / Н.Н. Никитин. – М.: Высшая школа, 1990. – 607 с.
8. Бутенин, Н.В. Теория колебаний [Текст] / Н.В. Бутенин. – М.: Высшая школа, 1963. – 188 с.
9. Shaikhet, L. Lyapunov Functionals and Stability of Stochastic Difference Equations [Текст] / L. Shaikhet. – Springer-Verlag: London Limited, 2011. – 384 p.
10. Prasad, B. Stability and Lyapunov exponents of a  $q$ -deformed map / B. Prasad, K. Katiyar // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2015. – V.104, No. 4. – P. 509–516.
11. McCartney, M. Lyapunov exponent for multi-parameter tent and logistic maps / M. McCartney // Chaos. – 2011. – V. 21, No. 4. – P. 1–7.
12. Anbu, S. Design of adaptive controller based on Lyapunov stability for a CSTR / S. Anbu, N. Jaya // International Scholarly and Scientific Research and Innovation. – 2014. – V. 8, No. 1. – P. 176–179.
13. Astron, K.J. Adaptive Control / K.J. Astron, B. Wittenmark. 2nd edn. – New Delhi: Pearson Education, 2006. – 588 p.
14. Dorf, R.C. Modern Control Systems / R.C. Dorf, R.H. Bishop. 8th edn. – Singapore-New Delhi: Pearson Education Private Limited, Indian branch, 1999. – 420 p.
15. Pai, M.A. Energy function analysis for power system stability [Текст] / M.A. Pai. – Norwel, MA: Kluwer, 1989. – 326 p.
16. Fouad, A.A. Power system transient stability analysis using the transient energy function method [Текст] / A.A. Fouad, V. Vittal. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991. – 284 p.
17. Athay, T. A practical method for the direct analysis of transient stability [Текст] / T. Athay, R. Podmore, S. Virmani // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. – 1979. – V. 98, No. 2. – P. 573–584.
18. Chiang, H.D. A BCU method for direct analysis of power systems transient stability [Текст] / H.D. Chiang, F.F. Wu, P.P. Varaiya // IEEE Trans. Power Syst. – 1994. – V. 9, No. 6. – P. 1194–1208.
19. Chiang, H.D. Foundations of PEBS method for power systems transient stability analysis [Текст] / H.D. Chiang, F.F. Wu, P.P. Varaiya // IEEE Trans. Circuits and Systems. – 1988. – V. 35, No. 6. – P. 675–682.
20. Maria, G. Hibrid stability analysis [Текст] / G. Maria, C. Tang, J. Kim // IEEE Trans. Power Systems. – 1990. – V. 5, No. 2. – P. 384–391.

© Деева П.В., Тетерин В.С., Деева В.С., Слободян С.М., 2016

**Каминский Н.С.**

аспирант 4 курса кафедры  
транспортных процессов и  
технологий Владивостокского  
государственный университета  
экономики и сервиса, РФ

**Соломахин Ю.В.**

канд. техн. наук, доцент кафедры  
транспортных процессов и  
технологий Владивостокского  
государственного университета  
экономики и сервиса, РФ

**Kaminskiy N. S.**

graduate student 4 courses of transport  
processes and technology, Vladivostok  
state University of Economics and  
service,

Russian Federation

**Solomahim Y.V.**

Ph.D., assistant professor of transport  
processes and technology, Vladivostok  
state University of Economics and  
service,

Russian Federation

## ОЧИСТКА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ БЕНЗИНОВЫХ ДВС

### CLEANING OF THE EXHAUST GASES PETROL DVS

Ключевые слова: автомобиль, отработавшие газы, катализатор, нейтрализатор, конверсия.

Keywords: car, exhaust, catalyst, catalytic converter, conversion.

В статье представлены экологические проблемы на автотранспорте, возникающие в процессе эксплуатации. Исследованы каталитические нейтрализаторы на кордиеритной основе с каталитическими покрытиями без применения благородных металлов для конверсии вредных веществ в отработавших газах.

In paper presents the environmental problems on a vehicle occurring during the operation. The catalytic converters on the basis of cordierite with catalytic coatings without the use of precious metals for the conversion of harmful substances in the exhaust gases.

Экологические требования к автомобилю и его двигателю являются в настоящее время приоритетными. Экологическая чистота выхлопа закладывается в конструкцию двигателя и автомобиля в целом еще на стадии проектирования. Далее в эксплуатации характеристики токсичности должны оставаться стабильными [1].

Из общего количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу крупных городов, большая часть приходится на автомобильный транспорт - 60%. Промышленные предприятия выбрасывают 18%, электростанции - 13%, системы городского отопления - 6% и другие источники - 3% [2].

Производители автотранспортной техники и комплектующих к ней обращают особое внимание на разработку систем и устройств, эффективно снижающих выброс вредных веществ с отработавшими газами двигателя. Каталитический нейтрализатор является основной составляющей такой системы [4]. Производители нейтрализаторов постоянно ведут работу над совершенствованием его конструкции и технологии, добиваясь повышения эффективности конверсии вредных веществ и снижения его стоимости.

Цель является использование наиболее дешевых металлов (Ce, Co, Ni, Cu) для нейтрализации отработавших газов, при той же эффективности очистки отработавших газов и сроке службы.

Задачи исследования:

- нанесение покрытий на блоки;
- исследование полученных свойств катализатора в лабораторных условиях;
- измерить каталитическую активность в лабораторных условиях;
- измерить каталитическую активность на стенде, построенном на базе двигателя 4А-FE автомобиля Toyota Corolla.

Для достижения поставленной цели необходимо нанести каталитическое покрытие на кордиеритовые блоки. Для нанесения активных компонентов применяется раствор органических солей выбранных металлов в органических растворителях (бензол, н-бутанол и т.п.).

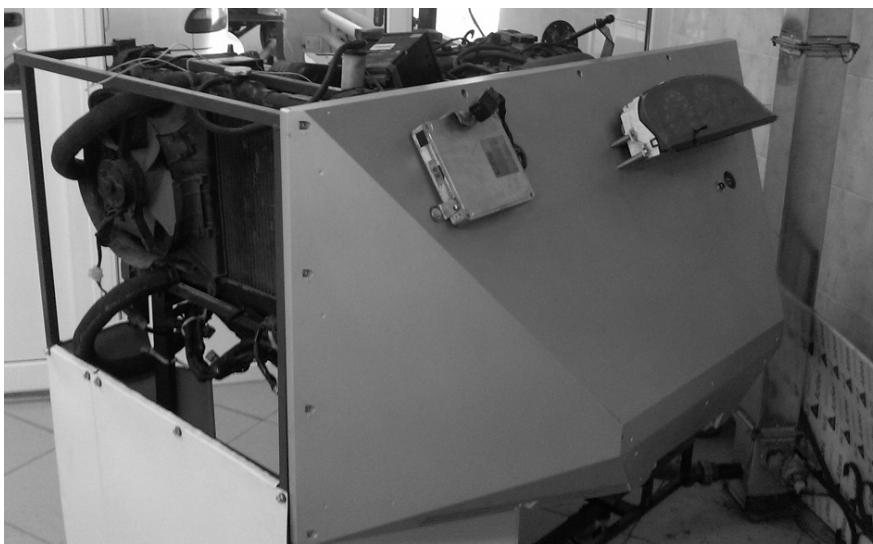
Количество раствора, необходимое для однократной пропитки (250 мл), установили экспериментальным методом. Этого количества достаточно для равномерного заполнения всех каналов блока, пропитки подложки и заполнения пространства над и под блоком. В среднем, после слива раствора и легкой продувки блока остаток раствора составлял 200 - 208 мл. Концентрация раствора подбиралась таким образом, чтобы в 50 мл раствора содержалось от 1 до 3 г (в пересчете на металл) активного компонента[7].

Процесс по пропитке блока [4]:

- блок устанавливается в специальную насадку из полиэтилена низкого давления;
- в сосуд подходящего диаметра заливается раствор ацетилацетоната церия в бензоле в количестве 250 мл в сосуд с раствором ацетилацетоната церия в бензоле окунается блок;
- в насадке с блоком создается разрежение для того, чтобы раствор заполнил все каналы блока;
- после непродолжительной экспозиции убирается разрежение, сливается раствор и продувается блок; по количеству оставшегося раствора вычисляется объем поглощенного блоком раствора;
- блок сушится на воздухе, потом в сушильном шкафу при температуре 100-150°C до постоянной массы;
- блок подвергается отжигу (газовой горелкой) для удаления органических радикалов и остатков растворителя.
- производится контрольное взвешивание блока для определения увеличения массы блока и сверки правильности расчета нанесенного количества активного компонента.

Активность образцов конверсии CO в CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в CO<sub>2</sub> оценивается на стенде состоящем из бензинового четырехцилиндрового двигателя «4А-FE» (диаметр поршня 81 мм, ход поршня 77 мм, 16 клапанов) автомобиля Toyota Corolla (рисунок 1) мощностью 110 л.с. при 6000 об/мин<sup>-1</sup>, крутящим моментом 145 Нм при 4800 об/мин<sup>-1</sup> рабочий объем двигателя 1587 см<sup>3</sup>.

Для удобства проверки образцов был разработан нейтрализатор (рисунок 2) включающий корпус со съемной крышкой, герметично закрывающей выполненное в корпусе нейтрализатора отверстие прямоугольной формы, размеры которого обеспечивают свободный доступ внутрь корпуса к каталитическим блокам[8].



**Рисунок 1 – Стенд на базе двигателя 4А-FE**



**Рисунок 2 - Нейтрализатор выхлопных газов двигателя»**

Представленные данные являются средние значения суммы 6 экспериментов с временным интервалом 10 минут между ними. Оценивалась активность образцов конверсии CO и CH. Исследуемые катализаторы в условиях реального двигателя (совместно с CO в отработанных газах содержатся CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>x</sub>, и другие компоненты, заметно более высокая, по отношению к лабораторным условиям, скорость потока газов), проявляют активность [10].

Для сравнения экспериментов между собой была составлена таблица 1, содержащая процент конверсии CO и CH каждым катализатором.

**Таблица 1 – Процент конверсии CO и CH, полученных на стенде**

Образец катализатора	Токсичный компонент отработавших газов	Конверсия, %			
		850 об/мин	2200 об/мин	2500 об/мин	3000 об/мин
Ni - Cu	CO	65	67	66	46
	CH	44	28	21	41
Cu	CO	64	70	58	52
	CH	54	36	47	50
Cu - 2.2	CO	69	66	57	60
	CH	48	43	40	31
Co - Cu	CO	65	63	57	58
	CH	34	38	54	32

Co	CO	78	73	58	48
	CH	32	27	60	30
Cu/Ce	CO	47	50	47	47
	CH	32	30	35	39
Co/Cu+ Cu/Ce	CO	65	63	61	63
	CH	53	26	41	50

По полученным данным, катализаторы с медью в качестве активного элемента стабильный и высокий процент конверсии CO и CH. Использование кобальта или никеля в качестве активного элемента на носителях с гамма модификацией оксида алюминия не эффективно, ввиду того что в условиях отработавших газов (высокие температуры – 500-600°C) данные элементы образуют каталитически неактивные алюминаты.

Так же выявлено, что с увеличением оборотов ДВС и, следовательно, с увеличением потока отработавших газов степень конверсии практически не изменяется. То есть активной площади блока катализатора достаточно, а степень конверсии ограничивается каталитической активностью или концентрацией активных элементов.

#### Библиографический список

1. Апелинский Д. В. Повышение эффективности нейтрализации отработавших газов бензинового двигателя на режимах холодного пуска и прогрева: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Апелинский Дмитрий Викторович. – М., 2003. – 135 с.
2. . Бурков В.И. Улучшение экологических показателей двигателя с принудительным зажиганием путем совершенствования системы каталитической нейтрализации отработавших газов: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Бурков Владимир Иванович. – М., 2004. – 155 с.
3. ГОСТ Р 52033–2003. Автомобили с бензиновыми двигателями. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 97 с.
4. Е. Криницкий. Экологичность автотранспорта должен определять Федеральный закон. // Автомобильный транспорт, №9, 2000. – стр. 34-37.
5. И.В. Романова Исследование каталитических свойств материалов на основе оксидов переходных металлов и церия / И.В. Романова, И.А. Фарбун, С.А. Хайнаков, С.А. Кириллов, В.А. Зажигалов // Доклады национальной академии наук Украины. – 2008. - №10. – С.154-159.
6. Катализаторы [Электронный ресурс] / Химическая энциклопедия / Химический портал ChemPort.Ru.– Режим доступа: <http://www.univer.omsk.su/omsk/Edu/kataliz/page4.html>.
7. Панчишный В.И. Система нейтрализации отработавших газов автомобильных бензиновых двигателей // Автомобильная промышленность. – 2008. – №10. – С. 20–22.
8. Permyakov V.V., Rudnev V.S., Usoltsev A.A., Kaminskiy N.S., Zorin A.V. Replaceable case of engine exhaust gases converter // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. T. 10. № 16. С. 37426-37427.
9. Технология катализаторов/ И.П. Мухленов, Е.И. Добкина, В.И. Дерюжкина, В.Е. Сороко; под.ред. проф. И.П. Мухленова. – Л.:Химия, 1989. – 272 с.
10. Каминский Н.С. «Катализаторы для снижения токсичности отработавших газов бензиновых ДВС» Хабаровск 2014/ Пермяков В.В., Усольцев А.А., Зорин А.В. Материалы VII международной научно-практической конференции «Автомобильный транспорт дальнего востока – 2014»
11. Кривошапов С.И. Расчет расхода топлива на транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3. №. 1. С. 92-95. DOI: 10.12737/17977.

©Каминский Н.С., Соломахин Ю.В., 2016



**Кошевой В.Л.**

аспирант факультета фундаментальных и гуманитарных дисциплин Санкт-Петербургского горного университета

**Koshevoi V.L.**

Ph.D student, Faculty of Basic Sciences and Humanities St. Petersburg Mining University

**Белорус А.О.**

аспирант факультета электроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

**Belorus A.O.**

Ph.D. student of the electronics faculty, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

**Пщелко Н.С.**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и технической физики Санкт-Петербургского горного университета

**Pshchelko N.S.**

Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of General and Technical Physics of the St. Petersburg Mining University

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ АЗВ5 ГРУППЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОАДГЕЗИОННЫХ КОНТАКТОВ

### STUDY OF PRODUCING SENSORS BASED ON POROUS SEMICONDUCTORS AZB5 GROUPS WITH THE USE OF ELECTROADHESION CONTACTS

Ключевые слова: полупроводники, сенсоры, датчики, травление, пористые полупроводники, транспорт, электроадгезионный контакт.

Keywords: semiconductors, sensors, transducers, etching, porous semiconductors, transport, electroadhesion contact.

В статье изложены методика получения пористых слоёв в полупроводниках АЗВ5 группы и описана технологическая возможность создания на основе данных пористых слоёв сенсоров различного назначения с применением электроадгезионного контакта.

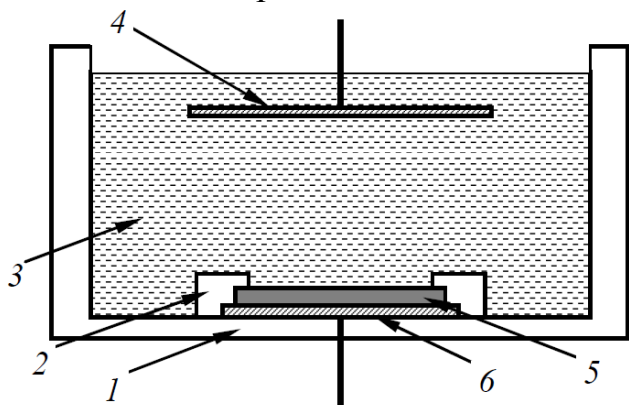
The article describes the procedure for the preparation of porous layers in semiconductors AZB5 group and described the technological ability to create on the basis of these porous layers of sensors for various purposes with the use of electroadhesion contact.

**Введение.** Последние несколько лет внимание исследователей привлекают наряду с пористым кремнием и другие пористые полупроводники, в особенности соединения АЗВ5 (GaP, GaAs, GaN, InP и т.д.). Пористые подложки на основе полупроводниковых соединений АЗВ5, являются перспективным материалом для получения гомо- и гетероэпитаксиальных слоев повышенного структурного совершенства. Так же большие перспективы пористых полупроводников АЗВ5 имеют для создания датчиков влажности, газовых, химических [1-5].

Развитие направления микроэлектроники позволяет разрабатывать и выпускать дешёвые датчики и приборы на основе полупроводников АЗВ5 для контроля параметров окружающей среды. Но такой интерес обусловлен развитием не только микроэлектроники, но и других отраслей промышленности, например металлургии, прецизионной химии и т.д.

Сама рабочая часть сенсора представляет собой пористый полупроводник АЗВ5 группы полученный методом электрохимического травления в водном растворе плавиковой кислоты. На тыльную часть пластины (непротравленную) осаждается диэлектрическая плёнка. Для соединения полупроводниковой пластины и диэлектрической подложки применяется неуправляемый адгезионный контакт, основанный на эффекте Джонсона – Рабека.

**Получение пористых слоёв в полупроводниковых пластинах.** Как уже отмечалось выше, рабочая часть сенсора представляет собой пластину из пористого полупроводника АЗВ5 группы. Пористые слои были получены методом электрохимического травления на основе водных растворов плавиковой кислоты с использованием методики сухого контакта к нерабочей стороне пластины. Принцип данного метода заключается в электрохимическом травлении полупроводника АЗВ5 группы в однокамерной электролитической ячейке вертикального типа, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.



**Рисунок 1 - Принципиальная схема однокамерной вертикальной электролитической ячейки:**

1– фторопластовая ванна; 2– герметичное кольцо; 3– раствор электролита; 4– электрод-катод (платинородиевый); 5– полупроводниковая пластина; 6– электрод-анод (алюминиевый)

Для обеспечения омического контакта на границе анод/подложка перед процедурой травления необходимо определенным образом подготовить катодную сторону подложки. Обычно диффузией проводят дополнительное легирование приповерхностного слоя либо предварительно наносят слой алюминия толщиной около 1 мкм и проводят операцию вжигания в инертной среде с целью создания омического контакта. Ячейка состоит из двух электродов – анода и катода – и ванны с электролитом. Все конструктивные части ячейки выполнены из фторопласта.

Контактная площадка для размещения монокристаллической пластины материала в качестве подложки представляет собой латунный диск, смонтированный во фторопластовый пьедестал. Пластина помещается в электролитическую ячейку так, чтобы возникал контакт алюминиевой пленки на нерабочей стороне пластины с нижним металлическим электродом. Сверху пластина прижимается герметичным кольцом, которое не позволяет электролиту проникать под полупроводниковую пластину. Ячейка заполняется электролитом. На верхний электрод подают отрицательный потенциал, а на нижний – положительный. При протекании тока на анодной стороне полупроводниковой пластины протекают многоступенчатые реакции растворения и восстановления. Верхним электродом (катодом) обычно служит платиновая пластина. На поверхности полупроводниковой подложки, которая оказывается не закрытой кольцом, при реализации условий порообразования начинается процесс формирования слоя пористого полупроводника АЗВ5 группы, толщина которого определяется временем анодирования [6].

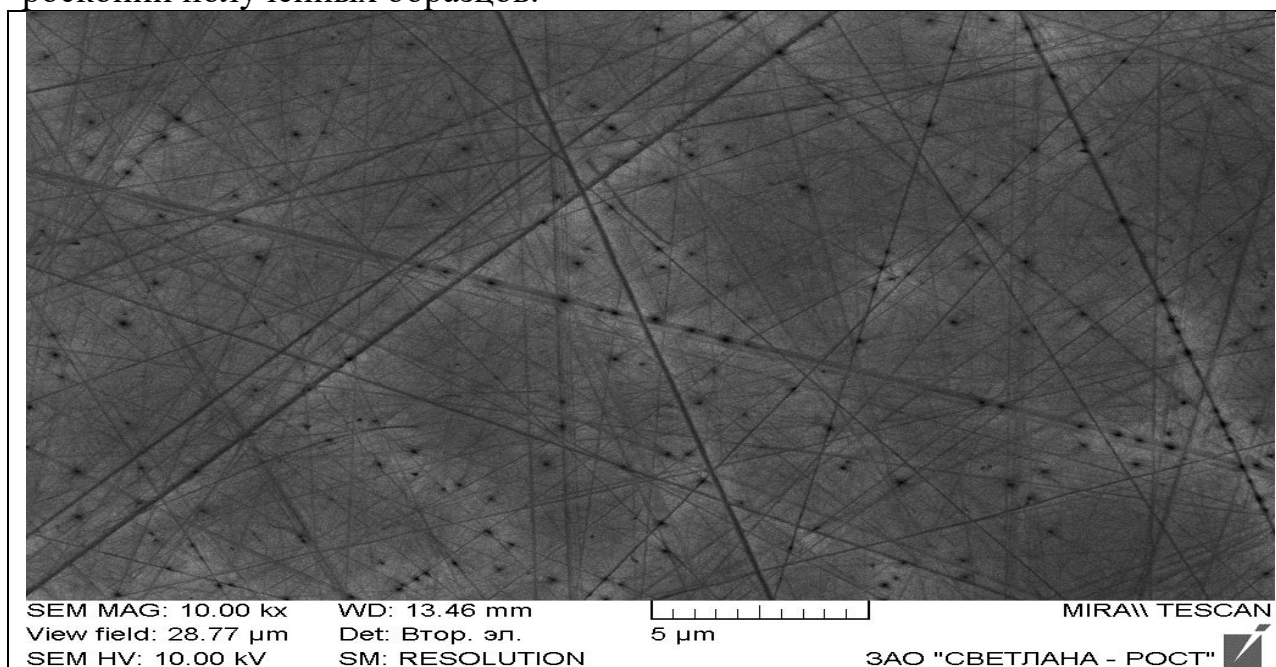
В ходе работы была отработана технология получения пористого фосфида галлия (por - GaP) на основе источников [7 – 17].

Слои пористого GaP:Te (100) были получены методом электрохимического травления в водно-спиртовом (изопропанол) растворе плавиковой кислоты. В ходе эксперимента были получены 3 образца при различных условиях травления. Образец 1 был получен при плотности тока  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 30 \text{ мин}$ . Образец 2 был получен при плотности тока  $25 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 10 \text{ мин}$ . Образец 3 был получен при плотности тока  $50 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 10 \text{ мин}$ . Технологические параметры получения сведены в таблицу 1.

**Таблица 1 – Технологические параметры получения**

Номер образца	Плотность тока	Время травления	Размер пор
1	$5 \text{ mA/cm}^2$	30 мин	0,1 мкм
2	$25 \text{ mA/cm}^2$	10 мин	0,2 мкм
3	$50 \text{ mA/cm}^2$	10 мин	0,1 мкм

На рисунке 2 приведены характерные данные растрово-электронной микроскопии полученных образцов.



**Рисунок 2 - снимок РЭМ для образца 2**

Данные РЭМ показали, что полученные в работе пористые полупроводниковые структуры GaP:Te относятся к макропористым. Так же по другим полученным снимкам РЭМ можно утверждать, что толщина пористого слоя составляет 28 мкм.

### **Методика создания диэлектрической плёнки на тыльной части пористой полупроводниковой пластины**

После получения пористого полупроводника АЗВ5 группы планируется осаждения на нерабочую часть диэлектрической плёнки для реализации электроадгезионного соединения и последующего создания контактов на сенсоре.

Для осаждения диэлектрических плёнок на тыльную сторону полупроводниковой пластины планируется использовать метод химического осаждения из газовой фазы с использованием плазменной активации.

Метод химического осаждения из газовой фазы (ГФЭ/CVD) является одним из наиболее распространенных методов формирования тонких пленок и покрытий, применяемых в микроэлектронике. При использовании в данной технологии плазменной активации осаждаемых веществ (PECVD), увеличивается эффективность и скорость процесса за счет значительного снижения температур (80-350С). Образование покрытий при осаждении проходит в несколько стадий: образование в плазме радикалов и ионов, адсорбция на поверхности и перегруппировка адсорбированных атомов. Плазмохимия, как метод создания пленок, обеспечивает высокую адгезию и химическую чистоту продукта, осаждаемого из газовой фазы, позволяет наносить однородные по составу и толщине покрытия на детали сложной конфигурации [18].

В настоящее время широко используется химическое осаждение в плазме высокой плотности (HDPCVD), для которого, в частности, в качестве источника используется ВЧ-источник с индуктивной связью (ИСП/ICP). Индуктивно-связанная плазма представляет собой вид плазмы, возбуждаемой переменным магнитным полем при помощи индукционной катушки. Осаждение с источником индуктивно-связанной плазмы дает возможность существенно понизить температуру процесса по сравнению с PECVD технологией позволяет получать слои высококачественных диэлектриков при температуре подложки вплоть до комнатной, что позволит избежать повреждения пластины пористого полупроводника, на которую будет наноситься слой диэлектрика [19].

### Механизм реализации электроадгезионного контакта на границе полупроводник/диэлектрик

Контакт между полупроводником и диэлектриком будет осуществляться за счёт электроадгезии.

Между двумя твёрдыми телами, имеющими различные электрические потенциалы, возникают электростатические (пондеромоторные) силы. На проявление этих сил основан эффект Джонсона – Рабека, заключающийся в том, что между двумя твёрдыми телами с различными электрическими потенциалами, при приложении постоянного электрического напряжения, (рис 2) возникает аномально большая адгезионная сила [20 - 22].

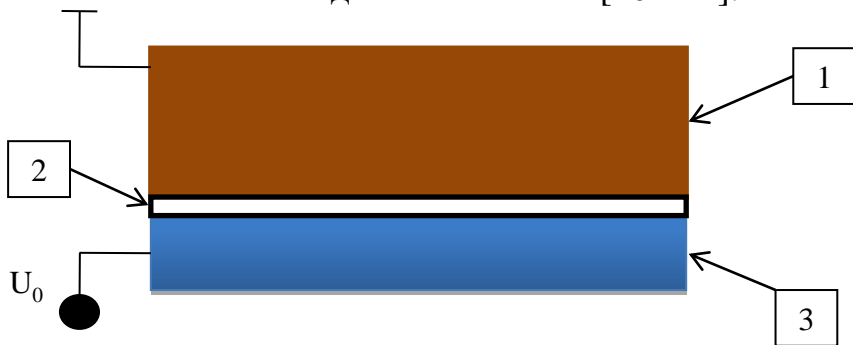


Рисунок 2 – Схема эффекта Джонсона – Рабека:

1–полупроводниковая плёнка; 2 –воздушный зазор; 3 - диэлектрическая плёнка

Объяснение эффекта Джонсона – Рабека заключается в том, что сопротивление диэлектрической подложки значительно меньше, чем сопротивление воздушного зазора на контакте проводник – диэлектрик, возникающего вследствие

естественной шероховатости и волнистости контактирующих поверхностей. Таким образом практически все напряжение оказывается приложенным к тонкому воздушному зазору вследствие чего возникает большое электрическое

поле и силы (пондеромоторные) закрепления. Тянущем полем, таким образом, является электрическое поле в воздушном зазоре между проводником и диэлектриком, в точках же фактического контакта это поле мало из-за сравнительно большой толщины диэлектрической подложки [20]

При наличии благоприятствующих условий (например, повышенной температуры) можно ожидать образования прочного электроадгезионного соединения, сохраняющегося (благодаря взаимной диффузии) и после отключения напряжения. Такое соединение называется неуправляемым электроадгезионным контактом (НЭАК) [20].

Для получения больших тянущих усилий в точках фактического контакта можно использовать миграционную поляризацию, наблюдаемую в ионных диэлектриках. Тогда в точках фактического контакта приложенное напряжение будет падать не на всю толщину диэлектрика, а на узкий прианодный слой. Тем самым будет обеспечена большая электростатическая сила не только в воздушном зазоре, но и в точках фактического контакта. При одновременном воздействии повышенной температуры при этом происходит электроадгезионное соединение (“склейка” за счёт электростатических сил) данной пары материалов, т.е. формируется НЭАК [21].

Рассматриваемая технология имеет ряд достоинств: Скрепляемые материалы могут быть соединены в твёрдом состоянии при температуре существенно ниже температуры плавления без промежуточных слоёв (клеев, припоев и т.д.), тянущее электрическое поле воздействует на детали “изнутри” соединительного шва (что позволяет соединять хрупкие детали), для реализации способа не требуется специальное дорогостоящее оборудование [21].

Сенсоры, полученные данным методом, можно использовать на различных предприятиях, транспортных средствах, для контроля параметров окружающей среды и т.д. Данные сенсоры (в качестве датчиков влажности, газовых, химических) позволят улавливать опасные газы, влагу которая может повредить оборудование (например в самолётах) и химические реактивы опасные как для человека так и для окружающей среды. Сама технология получения сенсоров проста и реализации способа не требуется специальное дорогостоящее оборудование.

*Работа выполнялась в рамках проектной части госзадания Минобрнауки РФ № 16.2112.2014/К по теме «Получение и исследование пористых систем, функционализированных наноматериалами, применений в фотонике, сенсорике и медицине».*

#### **Библиографический список**

1. Александрова О.А., Алешин А.Н., Белорус А.О., Бобков А.А., Гузь А.В., Кальнин А.А., Кононова И.Е., Левицкий В.С., Мазинг Д.С., Мараева Е.В., Матюшкин Л.Б., Москвин П.П., Мошников В.А., Муратова Е.Н., Налимова С.С., Пономарева А.А., Пронин И.А., Спивак Ю.М. Новые материалы. Синтез. Диагностика. Моделирование: лабораторный практикум. Санкт-Петербург, 2015.
2. Волков В.П., Кривошапов С.И. Расчёт выбросов вредных веществ на транспорте //Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 1. С. 165-169.
3. Кошевой В.Л., Белорус А.О., Левицкий В.С. Исследование кристалличности для плёнок mc-Si, полученных методом PECVD, с помощью рамановской спектроскопии // Международный

научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 19 (183). С. 118-123.

4. Белорус А.О., Кошевой В.Л., Спивак Ю.М., Левицкий В.С., Мошников В.А. “Исследование фотолюминесценции пористого кремния, полученного методом фотоэлектрического травления” Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 23 (187). С. 126-132.

5. Koshevoi V.L., Belorus A.O., Levitskiy V.S., Pshchelko N.S. “ The study of the phase composition of polymorphous silicon film by Raman spectroscopy” IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW) 2016, P. 62-64.

6. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Глава 5. «Электрохимические методы получения пористых материалов для топливных элементов» Основы водородной энергетики / Под ред. В.А. Мошникова и Е.И. Терукова. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 288с.

7. Заварицкая Т.Н., Караванский В.А., Квит А.В., Мельник Н.Н. “Исследования структуры пористого фосфида галлия” Физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 2, С. 235 – 240.

8. Зотеев А.В., Кашкаров П.К., Образцов А.Н., Тимошенко В.Ю. “Электрохимическое формирование и оптические свойства пористого фосфида галлия” Физика и техника полупроводников Т.30, № 8, С. 1473 – 1478.

9. Кашкаров П.К., Головань Л.А., Заботнов С.В. и др. “Увеличение эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в наноструктурированных полупроводниках” Физика твердого тела, 2005, том 47, № 1, С. 153 – 159.

10. Белогорохов А.И., Караванский В.А., Образцов А.Н., Тимошенко В.Ю. “Интенсивная фотолюминесценция в пористом фосфиде галлия” Письма в ЖЭТФ, Т.60, № 4, С. 262 – 266.

11. Белогорохов А.И., Белогорохова Л.И. “ Оптические фононы в цилиндрических нитях пористого GaP” Физика твердого тела, 2001, том 43, № 9, С. 1693 – 1697.

12. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. “Оптические свойства наноконпазитов на основе пористых систем” Успехи физических наук, обзоры актуальных проблем, 2007, Т. 117, № 6, С. 619 – 638.

13. Stevens-Kalceff M.A., Langa S., Tiginyanu I.M., Carstensen J. and others. “ Comparative SEM and Cathodoluminescence Microanalysis of Porous GaP Structures”.

14. Tjerkstra R. W. “Electrochemical Formation of Porous GaP in Aqueous HNO<sub>3</sub>” // Electrochemical and Solid-State Letters 2006, 9 (5), P. 81- 84.

15. Бачериков Ю.Ю., Охрименко О.Б., Оптасюк С.В., Яценко Ю.И. и др. “Фотолюминесценция наночастиц CdSe в пористом GaP” Физика и техника полупроводников, 2009, том 43, № 11, С. 1473 – 1476.

16. Дяденчук А.Ф., Кидалов В.В. “ Использование пористых соединений Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для обкладок суперконденсатора” Журнал нано – и электронной физики Т. 7, № 1, 01021(4с) (2015)

17. Заварицкая Т.Н., Караванский В.А., Квит А.В., Мельник Н.Н. “Исследования структуры пористого фосфида галлия” физика и техника полупроводников, 1998, том 32, № 2

18. Плазмохимическое осаждение (PECVD) [Электронный ресурс]// Intech – Режим доступа: <http://www.plasmasystem.ru/technology/pecvd>

19. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. “Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния” 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 168 с.

20. Грачева И. Е., Карпова С.С, Мошников В.А., Пщелко Н.С. “Сетчатые иерархические пористые структуры с электроадгезионными контактами “ Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". - 2010. - № 8. - С. 27-32.

21. Жабрев В.А., Мошников В.А., Пщелко Н.С., Томаев В.В. “Адгезионное упрочнение покрытий металл – стекло” Температурустойчивые функциональные покрытия: Труды 18-го совещания по температурустойчивым функциональным покрытиям. Тула, 2001. Ч.1. С.182-187

22. Пщелко Н. С. “Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлodieлектрических структур” автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Санкт-Петербург 2011.

© Кошевой В.Л., Белорус А.О., Пщелко Н.С. 2016

**Куценко М.А.**

студент 3 курса автомобильного  
факультета Воронежского  
государственного лесотехнического  
университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

**Kutsenko M.A.**

3 year student of the Automotive  
Faculty, Voronezh State Forestry  
Engineering University named after  
G.F. Morozov, Russian Federation

## **О РОЛИ ДОРОЖНОЙ КАРТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

### **ROADMAP ROLE IN THE USE NANOTECHNOLOGY OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL COMPLEX**

Ключевые слова: нанотехнологии, дорожная карта, транспортно-технологический комплекс

Keywords: nanotechnology, roadmap role, transport-technological complex

В настоящее время применение нанотехнологий в транспортно-технологическом комплексе развивается стремительными темпами. Ключевую роль стратегического развития данного направления с учетом экономической эффективности будет играть внедрение дорожных карт в рамках единой временной шкалы.

At present, the application of nanotechnology in the transport-technological complex is developing rapidly. Key role the strategic development of this area taking into account economic efficiency will play a implementation road maps within a single timeline.

В настоящее время применение нанотехнологий в транспортно-технологическом комплексе развивается стремительными темпами [7-10, 13-25]. Ключевую роль стратегического развития данного направления с учетом экономической эффективности будет играть внедрение дорожных карт в рамках единой временной шкалы.

Термин «technology roadmap» («технологическая дорожная карта») объединяет ряд исследовательских подходов, направленных на прогноз технического развития, инновационных продуктов и рамочных условий в будущем. При всем различии определений, результатом исследования выступает графическое представление, которое охватывает важнейшие узлы развития (пройденные, настоящие и будущие шаги в развитии науки и технологии), соединенные причинными или временными «цепочками».

Создание любой дорожной карты основано на научно-техническом прогнозировании, или форсайте, заключающемся в экспертной оценке стратегических направлений социально-экономического и инновационного развития, выявления технологических прорывов, способных оказать воздействие на экономику и общество в средне- и долгосрочной перспективе и позволяющих максимально быстро разработать конкурентоспособные продукты для рынков нанопромышленности.

Дорожная карта взаимосвязанным образом определяет несколько целевых результатов (показателей), строится на основе вероятностных допущений, имеет несколько путей достижения поставленных целей, причем все точки выбора возможных вариантов дальнейшего движения по дорожной карте имеют набор условий (критериев) для принятия решения. При создании дорожных карт учитываются научные и производственные возможности в целом, а не возможности отдельных производителей или научных коллективов.

Дорожная карта содержит набор (спектр) конкретных научных, технических или технологических результатов, которые определяют: параметры и свойства организационных, исследовательских и технологических процессов, необходимых для того, чтобы предсказанные тенденции стали реальностью с учетом ресурсных и других ограничений; целевые характеристики или свойства продуктов, которые будут востребованы рынком, либо необходимы для обеспечения национальной безопасности, либо имеют значимый социальный эффект. одновременно с этим определяются временные горизонты, на которых наиболее вероятно получение продуктов с указанными свойствами; потенциальные возможности, выгоды и угрозы, связанные с применением продуктов с данными свойствами, либо ущерб, вызванный их отсутствием, другие побочные эффекты; области фундаментальной или прикладной науки, а также отрасли, которые необходимо развивать для достижения целей, определяемых данной дорожной картой; потребности в ресурсах и специалистах, необходимых для реализации дорожной карты.

Процесс создания дорожных карт состоит из двух этапов [1-5], первым из которых является проведение постоянных опросов представителей российского и мирового научного и бизнес-сообществ с целью выявления или формирования будущих потребностей рынка и общества в новых видах продукции наноиндустрии. На втором этапе происходит формирование детальных комплексных планов, описывающих пути и способы удовлетворения потребностей рынка и общества в инновационной продукции, с указанием временных горизонтов и точек (моментов и условий) принятия ключевых решений.

Дорожные карты формируются для каждого из ключевых направлений развития, описанных в научных прогнозах и, как правило, носят продуктовый характер — результатом реализации дорожной карты должна быть конкурентоспособная продукция.

Дорожные карты также определяют: круг возможных участников, сторон, заинтересованных в реализации данной дорожной карты (бенефициаров); ресурсы, которые могут быть привлечены для решения задач, определяемых дорожной картой, и ограничения по их привлечению и/или использованию; роль государственных институтов в реализации дорожной карты; порядок координации усилий всех участников процесса.

Дорожные карты по различным направлениям развития наноиндустрии требуют постоянного обновления и соответствующей актуализации. Приоритетность дорожных карт определяется исходя из наличия потенциальных держателей дорожных карт. Если дорожная карта не востребована ни одним дер-



жателем, то формируются критерии для организации и финансирования соответствующих работ [1].

Например, дорожная карта «Использование нанотехнологий в каталитических процессах нефтепереработки» описывает структуру спроса на катализаторы для нефтепереработки, динамику ключевых технико-экономических характеристик основных типов используемых установок (в зависимости от общей схемы проведения каталитического процесса), динамику ключевых характеристик основных типов катализаторов, используемых в данных установках. На карте представлены альтернативные технологии производства катализаторов. Дается оценка перспектив введения в эксплуатацию в России технологических линий различной конфигурации с точки зрения возможности обеспечить производство катализаторов, ключевые характеристики которых отвечают нормативам конкурентоспособности [11,12].

Таким образом, приоритетная роль дорожной карты в области использования перспективных нанотехнологий подчеркнет в дальнейшем развитие транспортно-технологического комплекса с учетом энергетической эффективности и экологической безопасности [6].

#### Библиографический список

1. Brookstein D. Nanotech roadmap 2005-2030: Investing at the cutting-edge // *Industrial Biotechnology*. 2005. Vol. 1, Iss. 3. P. 164-165.
2. Collaert N., Alian A., Arimura H. etc. Ultimate nano-electronics: New materials and device concepts for scaling nano-electronics beyond the Si roadmap // *Microelectronic Engineering*. 2015. Volume 132. P. 218–225. DOI:10.1016/j.mee.2014.08.005.
3. Kaplan S., Radin J. Bounding an emerging technology: Para-scientific media and the Drexler–Smalley debate about nanotechnology // *Social Studies of Science*. 2011. Vol. 41. Iss. 4. P. 457-485. DOI: 10.1177/0306312711402722.
4. Opportunities in & directions for nanotechnology research: technology roadmap for the forest products industry // *Industrial Biotechnology*. 2005. Vol. 1, Iss. 3. P. 166-184.
5. Productive Nanosystems: A Technnnology Roadmap / Battelle Memorial Institute and Foresight Nanotechnology Institute. 2007. URL [www.foresight.org/roadmaps/Nanotech\\_Roadmap\\_2007\\_main.pdf](http://www.foresight.org/roadmaps/Nanotech_Roadmap_2007_main.pdf) (accessed 16 June 2016).
6. Albin A., Protti S. *Paradigms in Green Chemistry and Technology*. Springer, 2016. 112 p. DOI 10.1007/978-3-319-25895-9.
7. Ананьев М.В., Новиков А.И. О применении нанодвигателей // *Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях*. 2013. С. 11-12.
8. Волков В.С., Новиков А.И., Колупаев М.В., Чалик В.А. О снижении токсичности отработавших газов автомобильного транспорта // *Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях*. 2013. С. 34-36.
9. Головин С.А., Бурков М.Р., Елисеев И.Н., Новиков А.И. К вопросу использования на автомобильном транспорте наноматериалов для хранения водорода // *Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: в 3-х томах. ответственный редактор Горохов А.А.* 2014. С. 156-158.
10. Голубев И.Г., Неменуца Л.А. Применение нанотехнологий для увеличения долговечности деталей машин // *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. 2016. Т. 3. № 1. С. 495-500.

11. Дорожная карта «Использование нанотехнологий в каталитических процессах нефтепереработки» [Эл. ресурс] / NANONEWSNET: сайт о нанотехнологиях #1 в России [Сайт]. Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2010/dorozhnaaya-karta-ispolzovanie-nanotekhnologii-v-kataliticheskikh-protsessakh-neftepere> (дата обращения 10.06.2016).
12. Дорожные карты [Эл. ресурс] / РОСНАНО [Сайт]. Режим доступа: <http://www.rusnano.com/investment/roadmap> (дата обращения 10.06.2016).
13. Новиков А.И. О дилемме повышения эффективности и экологической безопасности автомобильных энергетических установок // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 5. С. 246-248.
14. Новиков А.И. Опыт применения альтернативных источников энергии в транспортно-технологическом комплексе // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 62-65.
15. Новиков А.И. Перспективы развития альтернативных источников энергии, способных обеспечить экологическую безопасность и ресурсосбережение в автотранспортном комплексе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5-1. С. 189-194.
16. Новиков А.И. Применение нанотехнологий в автомобильном транспорте. [Текст] : учебное пособие / А.И. Новиков ; М-во образования и науки РФ, ФБГОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2016. – 156 с.
17. Новиков А.И., Гурдов А.В. О возможном использовании графена в автомобильном транспорте // Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 7 частях. 2013. С. 90-92.
18. Новиков А.И., Дорохин С.В., Новикова Т.П., Каширских А.Г. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции; под общей редакцией А.И. Новикова. 2014. С. 272-274.
19. Новиков А.И., Кузьмин А.Г. Механические свойства УНТ как основа выбора сферы их рационального применения в автомобильном транспорте // Перспективы развития науки и образования сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. 2014. С. 87-88.
20. Новиков А.И., Новикова Т.П., Евтеев М.Д. Нанoeлектроника: очередной этап развития электронной техники // Техника и технологии: пути инновационного развития материалы III Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Горохов А.А., Куц В.В., Юго-Западный государственный университет . 2013. С. 140-142.
21. Новикова Т.П. МЭМС и НЭМС: актуальность и опыт применения в системах безопасности // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 449-451.
22. Новикова Т.П. Электронная компонентная база современных средств управления системами автомобильного транспорта // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. №. 2 (3). С. 803-806. DOI: 10.12737/19567.
23. Попов Е.Ю., Новиков А.И. К вопросу использования эффекта гидрофобного скольжения в автомобильном транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 1. С. 333-336.
24. Соколов К.О., Новиков А.И. К вопросу применения квантовых компьютеров в автомобильном транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 458-460.
25. Шигин К.А., Новиков А.И., Новикова Т.П. К вопросу использования наночастиц для повышения качества автомобильных смазочных материалов // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции; под общей редакцией А.И. Новикова. 2014. С. 361-363.

**Лемешева Е.В.**

ассистент кафедры  
транспортно-технологических машин и  
сервиса Брянского государственного  
инженерно-технологического универси-  
тета, РФ

**Измеров М.А.**

канд. техн. наук, доцент кафедры  
деталей машин Брянского государ-  
ственного технического университета,  
РФ

**Тихомиров П.В.**

канд. техн. наук, доцент кафедры  
транспортно-технологических машин и  
сервиса Брянского государственного  
инженерно-технологического универси-  
тета, РФ

**Lemesheva E.V.**

assistant to department of department  
transport technological machines  
and service of Bryansk state engineer-  
ing and technological university, Rus-  
sian Federation

**Izmerov M. A.**

Cand. Tech. Sci., associate professor  
details of cars of Bryansk state tech-  
nical university,  
Russian Federation

**Tikhomirov P.V.**

Cand. Tech. Sci., associate professor  
transport technological machines and  
service of Bryansk state engineering  
and technological university, Russian  
Federation

**КОНТАКТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ ПЛОСКОГО СТЫКА****CONTACT STIFFNESS OF THE FLAT JOINT**

Ключевые слова: контактная жесткость, шероховатость, фрактальная размерность, деформация.

Keywords: contact stiffness, roughness, fractal dimension, deformation.

В работе предложена модель контактного взаимодействия инженерных поверхностей с учетом шероховатости. Рассмотрена процедура определения несущей способности поверхности и контактной жесткости стыка шероховатых поверхностей.

In work the model of contact interaction of engineering surfaces taking into account a roughness is offered. Procedure of determination of the bearing ability of a surface and contact stiffness of a joint of rough surfaces is considered.

Известные процедуры не позволяют с достаточной точностью произвести оценку контактной жесткости. Это связано с недостаточной точностью определения параметров шероховатости, входящих в расчетные зависимости, и неоднозначным влиянием факторов на контактную жесткость. Так, принятие одинаковым радиус верхней части неровностей в некоторых моделях контактного взаимодействия существенно снижает точность расчета. В известных моделях [1-6] не учитывается распределение радиусов закругления вершин неровностей и рассматривается, как правило, контакт шероховатой поверхности (или поверхности, имеющей эквивалентную шероховатость) с гладкой.

Перспективным при оценке таких эксплуатационных характеристик соприжения, как контактная жесткость, герметичность, а также в задачах тепло-и

электропроводности, трения и изнашивания является применение фрактальных представлений [7].

Сопряжения, состоящие из дисков с торцевой площадью 314 мм<sup>2</sup>, подвергались сжатию при увеличении контролируемой нагрузки. Выходным параметром было сближение за счет деформации волн и шероховатости. Параметры шероховатости и волнистости поверхностей сопряжения изменялись в следующих пределах. Так, среднее арифметическое отклонение профиля в продольном и поперечном направлениях составило:  $Ra_{np} \in [0,31; 0,90]$ ;  $Ra_{non} \in [0,64; 2,30]$ ; радиусы закругления высот выступов неровностей –  $r_{np} \in [44; 704]$ ,  $r_{non} \in [28; 114]$ ; радиусы волн –  $r_{w np} \in [2460; 7640]$ ,  $r_{w non} \in [2190; 9830]$ ; высоты волн –  $Wmax_{np} \in [1,6; 9,1]$ ,  $Wmax_{non} \in [3,0; 9,1]$ ; твердость всех стальных образцов была одинаковой ( $HB 230... 250$ ).

Анализ экспериментальных данных позволил установить парную корреляцию факторов (таблица 1), влияющих на сближение  $\alpha$ .

**Таблица 1 - Парная корреляционная матрица (в скобках приведены данные при повторном нагружении)**

Фактор	$\alpha$	$Rp$	$Wmax$	$r_w$
$\alpha$	1,000	-0,154 (-0,465)	-0,040 (0,008)	-0,500 (-0,429)
$Rp$	-0,154 (-0,465)	1,000	0,324 (0,324)	0,544 (0,544)
$Wmax$	-0,040 (0,008)	0,324 (0,324)	1,000	0,268 (0,268)
$r_w$	-0,500 (-0,429)	0,544 (0,544)	0,268 (0,268)	1,000

Как видно из таблицы 1 наибольшая теснота связи наблюдается с радиусом закругления волны и высотой выступа.

К фрактальным характеристикам поверхности относят фрактальную размерность  $D$ , фрактальный параметр шероховатости  $G$  и среднее квадратичное отклонение профиля  $Rq$ . Модель профиля шероховатой поверхности описывается уравнением Вейерштрасса-Мандельброта

$$y(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos 2\pi \gamma^n x}{\gamma^{(2-D)n}}, \quad 1 < D < 2.$$

Здесь  $G$  – фрактальный параметр шероховатости,  $D$  – фрактальная размерность профиля,  $\gamma$  – масштабный параметр ( $\gamma > 1$ ),  $\gamma^n$  – определяет частотный спектр профиля шероховатой поверхности).

По мнению А. Маджумдара [7] подходящим значением для описания профиля является величина  $\gamma=1,5$ . Фрактальный параметр шероховатости  $G$  зависит от диапазона частот  $[\omega_{max}, \omega_{min}]$  и выражается соотношением

$$G = [4(D - 2) \ln \gamma] Rq^{1/(D-1)} \left( \omega_{min}^{(2-D)/(D-1)} - \omega_{max}^{(2-D)/(D-1)} \right).$$

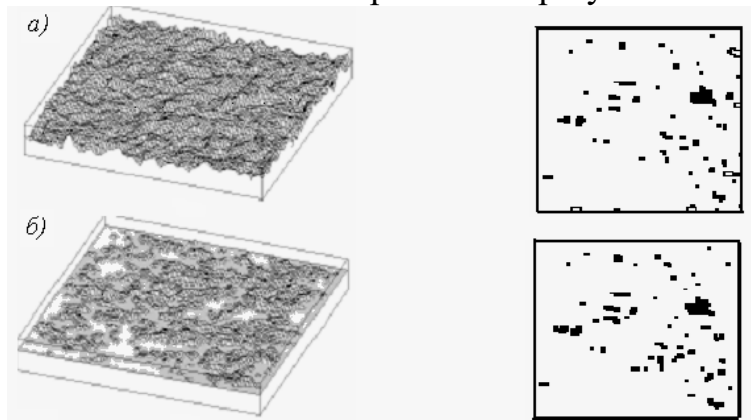
Нижний предел суммирования в уравнении Вейерштрасса-Мандельброта равен

$$n_1 = \ln(1/L) / \ln \gamma,$$

где  $L$  – длина выборки.

В задачах контактного взаимодействия шероховатых поверхностей используют фундаментальное положение о дискретности контакта. Фактическая

площадь контакта состоит из набора пятен касания (рис. 1). Полагаем, что независимо от степени шероховатости двух сопряженных поверхностей (или при контакте шероховатой поверхности с гладкой) распределение площадок контакта относительно максимальной площади пятна касания описывается одним и тем же законом. Более того этот закон сохраняется при увеличении сближения.



**Рисунок 1 - Шероховатые поверхности (слева) и пятна касания при контакте с гладкой поверхностью (справа) : *a* – реальная поверхность, *б* – поверхность в виде набора сферических сегментов [3]**

Общая площадь пятен контакта с размерами  $0 < a^* \leq \varepsilon$ , где  $a^* = a/a_{max}$ , равна

$$A(0 < a^* \leq \varepsilon) = \int_0^\varepsilon B a^{*-B} da^* = B(1 - B)^{-1} \varepsilon^{1-B}, \quad B > 1.$$

Здесь  $B = D/2$ , где  $D$  – фрактальная размерность  $1 < D < 2$ .

При  $\varepsilon \rightarrow 0$  имеем  $A(0 < a^* \leq \varepsilon) \rightarrow 0$ , т.е. площадь пятен, имеющих размер, меньший  $\varepsilon$ , практически равен нулю. При этом число пятен с площадью, большей  $\varepsilon$ , равно

$$N(A > \varepsilon) = F(a^*)^{-B}.$$

Здесь  $F$  – параметр ( $F=1$ ).

При  $a^* = \varepsilon \rightarrow 0$  число пятен стремится к бесконечности  $N(A > \varepsilon) \rightarrow \infty$ .

Площадь пятен контакта (фактическая площадь) определяется выражением

$$A(0 < a^* \leq 1) = \int_0^1 B a^{*-B} da^* = B(1 - B)^{-1} = Ar.$$

Уравнение интегральной функции (закона) распределения имеет вид

$$F(a^*) = \frac{\int_0^{a^*} B \varepsilon^{-B} d\varepsilon}{\int_0^1 B \varepsilon^{-B} d\varepsilon} = a^{*(1-B)}.$$

Итак, закон распределения пятен контакта может быть представлен в виде

$$F(a^*) = a^{*\left(\frac{2-D}{2}\right)}, \quad 1 < D < 2.$$

Дифференциальная функция (плотность) распределения следует уравнению

$$f(a^*) = \frac{dF(a^*)}{da^*} = \frac{2-D}{2} a^{*\left(-\frac{D}{2}\right)}.$$

На рисунке 2 показаны законы распределения пятен касания шероховатых поверхностей с разными фрактальными размерностями.

Как показано на рисунке 2 с увеличением фрактальной размерности вероятность появления пятен касания с малой площадью растет.

Относительная средняя площадь пятен контакта  $\langle a^* \rangle$  определяется выражением

$$\langle a^* \rangle = \int_0^1 a^* f(a^*) da^* = \int_0^1 a^* \frac{2-D}{2} a^{*-D/2} da^* = \frac{2-D}{4-D}.$$

Так, при  $D = 1,50$  относительная величина средней площади равна  $\langle a^* \rangle = 0,200$ , а при  $D = 1,20 - \langle a^* \rangle = 0,286$ .

Фрактальная модель профиля позволяет учесть влияние локальных выступов через фрактальную размерность, которая отражает структурные особенности профиля инженерной поверхности в широком диапазоне масштабов измерения. Несущая способность пятен контакта оценивается состоянием отдельных пятен (упругое, упругопластическое, пластическое).

Критическое сближение шара с плоскостью равно

$$\delta_{cr} = \left( \frac{\pi K H}{2 E'} \right)^2 r,$$

где  $r$  – радиус шара;  $K$  – коэффициент твердости, определяемый по формуле [11]

$$K = 0,454 + 0,410\mu;$$

$\mu$  – коэффициент Пуассона материала, у которого твердость  $H = \min[H_1, H_2]$ ;  $E'$  – модуль упругости, представленный в виде

$$E' = \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}.$$

При деформации  $\delta \geq \delta_{cr}$  упругое состояние контакта переходит в упругопластическое, а затем при дальнейшем росте деформации в пластическое.

Известные модели Н.Б. Демкина, Дж. Гринвуда и Дж. Вильямсона [12, 6] представляют шероховатую поверхность в виде набора сферических сегментов, расположенных на плоскости. В этом случае соотношение «сила-деформация», записанное в относительных величинах для разных видов состояния контакта, представлено в таблице 2.

Таблица 2 - Соотношение «сила-деформация» [11]

Состояние контакта	Формула	Условие существования
Упругое	$F^* = \delta^{*3/2}$	$\delta^* < 1$
Упругопластическое	$F^* = 1,03\delta^{*1,425}$	$1 \leq \delta^* \leq 6$
	$F^* = 1,40\delta^{*1,146}$	$6 < \delta^* \leq 110$
Пластическое	$F^* = \delta^*$	$\delta^* > 110$

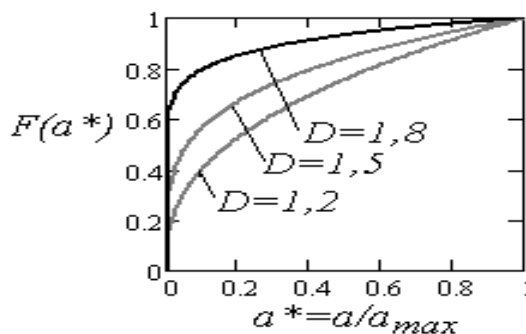


Рисунок 2 - Законы распределения пятен касания шероховатых поверхностей с разными фрактальными размерностями

Здесь  $F^*=F/F_{cr}$ ,  $\delta^* = \delta/\delta_{cr}$ , где  $F_{cr}$  – критическая нагрузка, приводящая к появлению пластической деформации, определяется выражением

$$F_{cr} = \frac{4}{3} \left( \frac{r}{E'} \right)^2 \left( \frac{\pi H}{2} \right)^3.$$

Следует отметить, что опорная кривая Аббота-Фейерстоуна определяет несущую способность контакта всех выступов, не выделяя несущую способность отдельно взятого выступа шероховатой поверхности.

Фрактальное представление выступа, форма которого определяется дробной (фрактальной) размерностью, дает возможность найти для каждого выступа радиус закругления его вершины. Так, радиус закругления выступа равен [7]

$$r = \frac{a^{D/2}}{\pi^2 G^{D-1}}.$$

Если для известных моделей шероховатой поверхности, используемой в контактных задачах, переход от упругого состояния к пластическому определяется условием  $\delta^* = \delta/\delta_{cr} > 1$ , то для фрактального объекта этот переход осуществляется выражением  $a/a_{cr} < 1$ . Это означает, что пятна, имеющие площадь, меньше критического значения, находятся в пластическом состоянии. Действительно, малое пятно имеет малый радиус закругления верхней части выступа, что приводит к снижению критической деформации  $\delta_{cr}$ .

Итак, если  $\delta \sim a/r$  или  $\delta = a/(2\pi r \xi)$ , где  $\xi = 0,5$  – для упругого состояния контакта;  $\xi = 1,0$  – для пластического и  $0,5 \leq \xi \leq 1,0$  – для упругопластического.

Запишем отношение  $\delta/\delta_{cr}$  с учетом того, что это отношение должно быть больше единицы для перехода от упругого состояния к пластическому.

Приравняв  $\delta/\delta_{cr} = 1$ , получим

$$\frac{a}{2\pi\xi \left( \frac{\pi KH}{2E'} \right)^2 r^2} = \frac{a^{1-D}}{2\pi r \xi \left( \frac{\pi KH}{2E'} \right)^2 \frac{1}{\pi^4 G^{2(D-1)}}} = 1.$$

Перепишем полученное выражение, приравняв площадь  $a = a_{cr}$ .

Тогда

$$\frac{1}{a_{cr}^{D-1} C_1} = 1, \quad \text{при } 1 < D < 2.$$

В данном выражении параметр  $C_1$  является константой. Поэтому пластическому состоянию контакта соответствует  $a < a_{cr}$ , при этом относительная деформация  $\delta^* > 1$ .

Критическая площадь пятна контакта инженерной фрактальной поверхности определяется формулой

$$a_{cr} = \frac{G^2}{(H/2E')^{2/(D-1)}}.$$

Запишем связь между нагрузкой и площадью для единичного пятна соответственно при упругом и пластическом состояниях в виде

$$F_e(a) = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} a_e^{(3-D)/2}, \quad F_p(a) = H_m a_p,$$

где  $a_e \in [a_c, a_{max}]$ ,  $a_p \in [0, a_c]$ ,  $H_m$  – твердость по Мейеру.

Из условия равновесия нагрузки, отнесенной к номинальной площади касания, найдем

$$F = \sum_{i=1}^{N_e} F_{ei}(a) + \sum_{j=1}^{N_p} F_{pj}(a).$$

Здесь  $N_e, N_p$  – число пятен касания, находящихся в упругом и пластическом состояниях

$$N_e = N \int_{a_c^*}^1 f(a^*) da^*, \quad N_p = N \int_0^{a_c^*} f(a^*) da^*,$$

где  $N$  – общее число пятен, равное [4]

$$N(A > a) = a^{*-D/2}.$$

Для множественного контакта можно записать

$$F = F_e + F_p,$$

где

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} a_{max}^{(3-D)/2} a^{*-D/2} \int_{a_c^*}^1 a^{*[(3-D)/2]} f(a^*) da^* \\ &= \frac{4\sqrt{\pi}}{3} E G^{D-1} a_{max}^{(3-D)/2} \int_{a_c^*}^1 a^{*[(5-3D)/2]} a^{*1-D/2} da^* \\ &= \frac{8\sqrt{\pi}}{3(7-3D)} E G^{D-1} a_{max}^{(3-D)/2} (1 - a_c^{*(7-3D)/2}). \\ F_p &= H_m a_{max} a^{*-D/2} \int_0^{a_c^*} a^{*2-D} da^* = H_m \frac{a_{max}}{3-D} a_c^{*(3-D)}. \end{aligned}$$

Отношение фактической площади контакта к номинальной (при условии, что ординаты профиля подчиняются нормальному закону) следует выражению

$$\frac{A_r}{A_a} = \operatorname{erfc} \left( \frac{a_{max}}{\pi r \sqrt{2} R q} \right) = \operatorname{erfc} \left( \frac{\pi a_{max}^{1-\frac{D}{2}} G^{D-1}}{\sqrt{2} R q} \right).$$

Здесь  $\operatorname{erfc}(\dots)$  – функция ошибок.

Так как

$$A_r = \frac{D a_{max}}{(2-D)},$$

то номинальная площадь равна

$$A_a = \frac{D \cdot a_{max}}{2-D} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\pi a_{max}^{1-\frac{D}{2}} G^{D-1}}{\sqrt{2} R q} \right) \right]^{-1}.$$

Номинальное давление равно.

Найдем максимальную площадь деформированных неровностей  $a_{max}$  и уточненное значение сближение  $\alpha_{ш}$ , которое определяется деформацией наибольшего выступа и связано с максимальной площадкой контакта



$$\alpha_{ш} = G^{D-1} \frac{2^{2-D} \frac{2-D}{2}}{\pi \cdot 2} a_{max}^2.$$

Контактная жесткость стыка шероховатых поверхностей найдем из выражения

$$j_n = \frac{F}{A_a \alpha_{ш}}.$$

### Выводы:

1. Получен закон распределения пятен контакта при взаимодействии фрактальных поверхностей.
2. Предложена модель контактного взаимодействия инженерных поверхностей с учетом шероховатости, причем шероховатость представлена в виде фрактального объекта с определенной размерностью.
3. Рассмотрена процедура определения несущей способности поверхности и контактной жесткости стыка шероховатых поверхностей.

### Библиографический список

1. Воронин, Н.А. Закономерности контактного взаимодействия твердых топокомпозиционных материалов с жестким сферическим штампом/ Н.А. Воронин//Трение и смазка в машинах и механизмах, 2007.-№5, 3-8.
2. Иванов, А.С. Нормальная, угловая и касательная контактные жесткости плоского стыка/А.С. Иванов//Вестник машиностроения, 2007.-№1, 34-37.
3. Демкин, Н.Б., Удалов С.В., Алексеев В.А., Измайлов В.В., Болотов А.Н. Контакт шероховатых волнистых поверхностей с учетом взаимного влияния неровностей/Н.Б. Демкин, С.В. Удалов, В.А. Алексеев [и др.]//Трение и износ, 2008.-Т.29, №3, 231-237.
4. Буланов, Э.А. Контактная задача для шероховатых поверхностей/Э.А. Буланов//Техника машиностроения, 2009.-№1(69), 36-41.
5. Ланков, А.А. Вероятность упругих и пластических деформаций при сжатии металлических шероховатых поверхностей/А.А. Ланков// Трение и смазка в машинах и механизмах, 2009.-№3, 3-5.
6. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces/J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson// Proc. R. Soc., Series A, 1966.-V.295, №1422.-P.300-319.
7. Маджумдар, М. Фрактальная модель упруго- пластического контакта шероховатых поверхностей/М. Маджумдар, Б. Бхушан// Современное машиностроение.-1991.- №6.- С. 11-23.
8. Федер, Е. Фракталы/Е. Федер/Пер. с англ.- М.: Мир, 1991.-254 с.
9. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы/Б. Мандельброт. -М.: Институт компьютерных исследований, 2002. -656 с.
10. Varadi, K. Evaluation of the real contact areas, pressure distributions and contact temperatures during sliding contact between real metal surfaces / K. Varodi, Z. Neder, K. Friedrich // Wear. 1996.-200. 55-62.
11. Jackson, R.L. A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat/ R.L. Jackson, I. Green // Journal of Tribology, 2005.- Vol. 127.- P. 343-354.
12. Демкин, Н.Б. Развитие теории фрикционного контакта/ Н.Б. Демкин// Трение и износ, 1992.-Т.13, №1.-С. 71-80.
13. Голубев И.Г. Применение нанотехнологий для увеличения долговечности деталей машин [Текст] / И.Г. Голубев, Л.А. Неменушая // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. - 2016. Т.3. № 1 (4). - С.495-500.

© Лемешева Е.В., Измеров М.А., Тихомиров П.В., 2016

**Новиков Е.П.**

аспирант кафедры автомобилей, транспортных систем и процессов Юго-Западного государственного университета, РФ

**Агеев Е.В.**

д-р техн. наук, профессор кафедры автомобилей, транспортных систем и процессов Юго-Западного государственного университета, РФ

**Алтухов А.Ю.**

канд. техн. наук, доцент кафедры автомобилей, транспортных систем и процессов Юго-Западного государственного университета, РФ

**Novikov E.P.**

graduate student of the department vehicles, transport systems and processes Southwestern State University, Russian Federation

**Ageev E.V.**

Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of vehicles, transport systems and processes Southwestern State University, Russian Federation

**Altukhov A. Yu.**

candidate of technical Sciences, associate Professor of Department of vehicles, transport systems and processes Southwestern State University, Russian Federation

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРА И НАНОФРАКЦИЙ

### APPLICATION OF ALUMINIUM ELECTROEROSIVE MATERIALS ULTRA AND NANOFRACTAL

Ключевые слова: наноматериалы, алюминиевые нанопорошки, электроэрозионное диспергирование, частицы, применение.

Keywords: nanomaterials, nanopowders of aluminum, electroerosive dispersing, the particles, use.

Рассмотрена область применения алюминиевых электроэрозионных материалов ультра и нанопорошков. Представлены результаты исследования формы и морфологии частиц алюминиевого нанопорошка. Установлено, что порошок полученный методом электроэрозионного диспергирования из отходов алюминия, состоит из частиц правильной сферической формы (или эллиптической), неправильной формы (конгломератов) и осколочной формы.

Considered the scope of electroerosive aluminum materials, ultra and nanotraces. Presents the results of a study of the shape and morphology of particles of aluminum nanopowder. It is established that the powder obtained by electroerosion dispersion of waste of aluminium, consists of particles of spherical shape (or elliptical) or irregular shape (conglomerates) and fragmental shapes.

К нанопорошкам относят порошковые материалы, имеющие дисперсность наночастиц. Как следует из самого определения, диаметр наночастицы должен быть менее 100 нм. Почти половина из существующих нанопорошков имеет диаметр менее 30 нм [1, с. 67].

Девять процентов порошков, которые относятся к группе «нано», имеют диаметр более 100 нм. Большинство из производителей предлагают свои порошки диаметром от 5 до 100 нм [1, с. 67].

Свойства наноматериалов позволяют использовать их в широких областях:

- создание новых высокопрочных композиционных материалов на основе нанотрубок, физико-механические характеристики, которых будут в десятки раз превышать аналогичные характеристики высокопрочных сталей при меньшей плотности;

- высокопрочные покрытия для пар трения, режущего инструмента, превышающие по твердости алмаз;

- смазывающе-охлаждающие технологические среды и присадки для пар трения, значительно повышающие эксплуатационные характеристики изделий;

- аккумуляторы и батареи нового поколения, обладающие большой емкостью при малых габаритах;
- нанодатчики для измерения физических величин со сверхвысокой чувствительностью;
- элементы электронных схем для приборов нового поколения;
- контрастирующие вещества для магнитно-резонансной томографии и других видов диагностики в биологии и медицине;
- создание защитных покрытий поверхностей, невидимых для радаров и других средств обнаружения;
- контейнеры для транспортировки лекарств и диагностических датчиков в медицине;
- создание сверхпрочных волокон, нитей, канатов, стержней для запуска и удержания на геостационарной орбите спутников и космических станций;
- матрицы и дисплеи сверхвысокой четкости и яркости и чувствительности [2, с. 166].

Конструкционные машиностроительные наноматериалы общего назначения применяются пока еще недостаточно широко. Применение порошковых консолидированных наноматериалов ограничено размерами и формой порошковых изделий, низкой текучестью и прессуемостью, легкой окисляемостью и загрязняемостью, а также трудностью сохранения наноструктуры при спекании. Многие порошковые наноматериалы имеют низкие пластические характеристики и остаточную пористость [2, с. 170].

Следует отметить, что характеристики прочности и твердости металлических наноматериалов выше, чем для обычных материалов, в 4...6 раз. Металлические наноматериалы должны эксплуатироваться преимущественно в условиях сжатия (а не растяжения), что будет затруднять распространение хрупких трещин и позволит повысить допустимый уровень разрушающих напряжений в несколько раз. Для изготовления низко- и высокотемпературных узлов трения могут применяться керметные нанокомпозиты на основе  $Al_2O_3$  с добавками Fe и FeCr (размер кристаллитов 40-60 нм) изготовленные механохимическим синтезом с последующим горячим изостатическим прессованием.

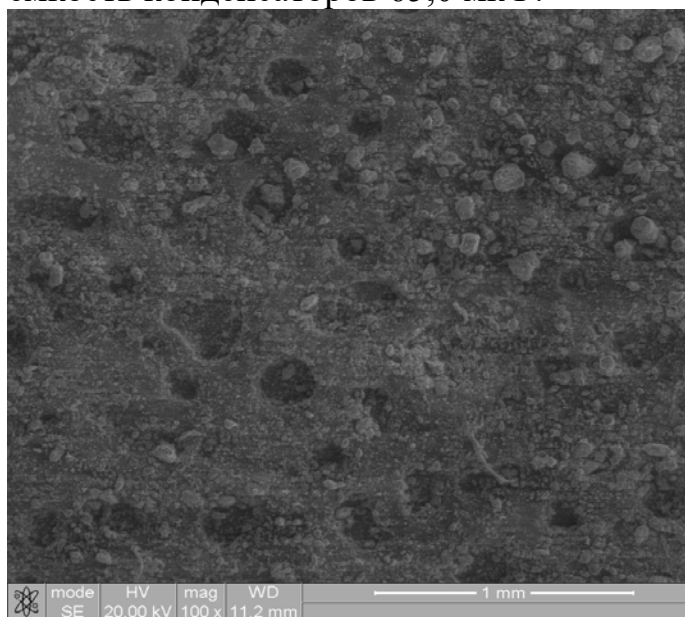
Одним из перспективных методов получения порошка, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и отходов алюминия, является метод электроэрозионного диспергирования ЭЭД [3, с. 04038-1; 4, с. 03001-1; 5, с. 288], отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса [6, с. 87; 7, с.193; 8, с. 13].

Однако широкое использование метода электроэрозионного диспергирования сдерживается отсутствием справочного материала по оптимизации режимов порошкообразования и свойствам полученных алюминиевых порошков. Для широкого использования метода требуются обширные теоретические и экспериментальные исследования [9, с.51]. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование формы и морфологии поверхности частиц порошков, полученных электроэрозионным диспергированием из отходов алюминия в дистиллированной воде.

Для получения алюминиевого порошка методом электроэрозионного диспергирования использовали отходы алюминия. Отходы загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – водой дистиллированной, процесс проводили, варьируя электрические параметры: напряжение на электродах, частоту генератора импульсов и емкость разрядных конденсаторов. В результате локального воз-

действия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение алюминиевых отходов [10, с. 20; 11, с.330].

Процесс проводили, используя следующие электрические параметры установки: частота следования импульсов 100 Гц; напряжение на электродах 140 В; емкость конденсаторов 65,0 мкФ.



**Рисунок 1 – Снимок**

Исследование формы и морфологии частиц алюминиевого нанопорошка, проводили на электронно-ионном сканирующем (растровом) микроскопе с полевой эмиссией электронов «QUANTA 600 FEG» (рис.1).

Форма частиц порошка обусловлена тем, в каком виде материал выбрасывается из лунки в процессе электроэрозионного диспергирования. На рисунке 1 показано, что порошок полученный методом электроэрозионного диспергирования отходов алюминия в воде дистиллированной, состоит из частиц правильной сферической формы (или эллиптической), неправильной формы (конгломератов) и осколочной формы.

#### **Библиографический список**

1. Макаров С.В., Сапожков С.Б. Способы изготовления нанопорошков // Глобальный научный потенциал, 2013. № 11 (32). С. 67-71.
2. Рогов В.А., Соловьев В.В., Копылов В.В. Новые материалы в машиностроении: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 324 с.
3. Ageev, E.V. Properties and Characterizations of Powders Produced from Waste Carbides / E.V. Ageev, A.S. Osminina, E.V. Ageeva // Ageeva E.V., Journal of nano- and electronic physics. – 2013. – Vol. 5. - № 4.– P. 04038-1–04038-2.
4. Ageev, E.V. Hard Alloy Synthesis from Tungsten-containing Electroerosion Powders of Micro- and Nanometric Fractions / E.V. Ageev, A.V. Kirichek, A.Yu. Altuhov, E.V. Ageeva // Journal of nano- and electronic physics. – 2014. – Vol. 3. – P. 03001-1–03001-4.
5. Новиков Е.П. Методы переработки алюминиевых отходов автомобильного производства [Текст] / Е.П. Новиков // Будущее науки – 2015 : сб. науч. статей 3-й Межд. науч.-практ. конф. в 2 томах (Том 2). – Курск: ЮЗГУ – 2015 – С. 287–293.
6. Хардинов С.В. Утилизация изношенных автомобильных подшипников методом электроэрозионного диспергирования // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса Материалы 5-ей Международной научно-практической интернет-конференции, 2016. С. 87-91.
7. Хардинов С.В. Изучение фазового состава порошковой шарикоподшипниковой стали // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации сборник научных трудов XII-ой Международной научно-практической конференции в 4-х томах, 2015. С. 193-196.
8. Новиков Е.П., Агеева Е.В., Чумак-Жунь Д.А. Изучение формы и морфологии порошка, полученного из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования // Известия ЮЗГУ. Серия: техника и технологии. – 2015. – №4 (17). – С. 13-17.
9. Агеева Е.В. Рентгеноструктурный анализ порошка, полученного электроэрозионным диспергированием медных отходов в среде керосина / Е.В. Агеева, Н.М. Хорьякова, Р.А. Латыпов, П.И. Бурак // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 2. С. 59-64.
10. Латыпов Р.А. Исследование алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования в дистиллированной воде / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, Е.П. Новиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 4. С. 19-22.
11. Новиков Е.П., Агеев Е.В., Алтухов А.Ю. Технология переработки алюминиевых деталей автомобилей до микро и нанодисперсий // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе. 2015. Т. 2. № 1. С. 328-333.

© Новиков Е.П., Агеев Е.В., Алтухов А.Ю., 2016

**Папанова К.А.**

студент 2 курса механического факультета Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

**Новиков А.И.**

канд. техн. наук, доцент кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ

**Papanova K.A.**

2 year student of the Mechanical Faculty, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Russian Federation

**Novikov A.I.**

PhD., associate professor of cars and service department, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Russian Federation

## **К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ В АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫТИЯХ**

### **BY THE USE OF NANO CORROSION INHIBITORS IN AUTOMOTIVE COATINGS**

Ключевые слова: автомобильные покрытия, защита от коррозии, самовосстановление, композит, наноингибитор, углеродные нанотрубки

Keywords: automotive coatings, corrosion protection, self-healing, composite, nanoinhibitor, carbon nanotubes

Рассмотрены проблемы использования наноингибиторов коррозии в составе автомобильных покрытий. Показано влияние наноконтейнеров на свойства антикоррозионных составов при защите автомобильных кузовов из различных сплавов.

The problems of use corrosion nanoinhibitors in the composition of automotive coatings. The influence of nanocontainers for anticorrosion properties of compositions in the protection of car bodies made of various alloys.

Масштабы применения нанотехнологий в автомобильном транспорте расширяются по мере роста достижений в области взаимосвязанных направлений: наноэлектроники, наноэлектрохимии, нанокомпозитов и др. [1-14].

Автомобильные покрытия играют ключевую роль в эстетических и функциональных характеристиках автомобиля, защищая внутреннюю структуру его компонентов от негативного воздействия окружающей среды, вызванного погодой, антиобледенительными составами, вылетом гравия при ремонтных работах дорожного покрытия [2, с. 373]. Автомобильные покрытия состоят из определенного количества слоев, нанесенных на основной металл: фосфатный слой (1 нм), электрослой (25 нм), грунтовочный слой (25 нм), базовый слой (20 нм), слой лака (50 нм) Однако автомобильные покрытия подвержены различным видам коррозии [4]. Коррозией принято называть самопроизвольное разрушение металлов и различных сплавов под влиянием окружающей среды. Однако можно защититься от этих процессов. Есть разные методы защиты от кор-

розии, как и виды воздействия. В области автомобильного сервиса наиболее известными типами коррозии является электрохимическая коррозия – процесс разрушения, связанный с возникновением электрического тока при контакте металла с электролитом. Таким электролитом может быть обычная вода, поскольку в ней имеется большое количество растворенных солей и газов (дистиллированную воду в расчет не берем). Как правило, окислителями являются ионы водорода и кислород, растворенный в воде [4].

Ингибитор коррозии представляют собой химические соединения, которые используются для блокирования или задержания процесса образования ржавчины. Ингибиторы образуют на поверхности металлов тонкую защитную пленку, которая не дает проникать в поры металлов воздуху и жидкостям, которые могут нарушить их целостность. Они являются одним из самых эффективных методов борьбы с образованием ржавчины [2-4,6,7]

Ингибитор не является каким-то конкретным веществом. Так называют целую группу веществ, которые направлены на остановку или задержку протеканий каких-либо физических или физико-химических процессов. В большинстве своем он направлен на задержку ферментативных процессов.

Ингибиторы в основном действуют в тех случаях, где имеется цепная реакция или процессы с активными центрами и частицами. Ингибитор действует на активные вещества. Он либо их блокирует, либо задерживает. В некоторых случаях он вступает в реакцию с активными частицами и из-за этого образуются свободные радикалы.

Ингибиторы действуют на металлы следующим образом: вещество попадает на металлический материал и впитывается в него. После этого металл приобретает положительный потенциал, который делает процесс образования ржавчины намного более медленным.

В настоящее время существует огромное множество веществ, которые можно использовать в качестве ингибиторов для блокирования процесса образования коррозии на поверхности металлических предметов или объектов:

- амины,
- азотсодержащие гетероциклические соединения,
- мочевины,
- тиолы,
- альдегиды,
- сульфиды.

Пассиваторы (уротропин, гексамин, хроматы и другие), не адсорбируясь на поверхности, вступают в реакцию с металлом, создавая нерастворимые пленочные соединения. Металлическая поверхность, подвергнутая пассивации, почти невосприимчива к коррозии. Однако следует отметить, что при несоответствии кислотности среды, неправильно подобранной концентрации или при наличии ионов хлора, пассиваторы могут усилить коррозионные процессы, вызвав точечную коррозию.

Адсорбционные ингибиторы образуют устойчивую адсорбционную или фазовую пленку на поверхности металла, которая, в свою очередь, замедляет электрохимические реакции.

Летучие ингибиторы (бензонаты, фосфаты, нитриты и др.) – эффективное средство защиты при атмосферной коррозии. Принцип действия довольно прост: химическое соединение образует пары, которые проникают через слой воздуха к обрабатываемой поверхности и, адсорбируясь, защищают ее.

Органические вещества применяются в основном для кислотного травления металла и для его очистки от окалины, ржавчины, накипи. Чаще всего органические ингибиторы — это ароматические амины или алифатические соединения, в составе которых имеется сера, азот и кислород. Как правило, к этой группе относятся ингибиторы кислотной коррозии, которые при относительно малых концентрациях (~5 г/л) способны задержать процесс распада в кислотной среде.

Многие неорганические вещества обладают способностью замедлять коррозионные процессы в агрессивных средах, ингибирующее воздействие таких соединений вызвано наличием в них анионов или катионов. К данной группе относятся: фосфаты, силикаты, нитрит и нитрат натрия [6].

Благодаря развитию нанотехнологий в антикоррозионной защите существуют несколько направлений: формирование на поверхности металлов тонкой наноразмерной пленки труднорастворимых комплексных соединений (наноингибиторов коррозии), золь-гелевый метод модификации металлической поверхности и применение наноразмерных пигментов, наполнителей и других специальных добавок в рецептуре лакокрасочных материалов. В качестве наноразмерных пигментов используется диоксид титана, оксид цинка

Принцип действия наноингибиторов заключается в следующем: наночастицы, что осуществляют функции ингибиторов коррозии, следует добавить к обычному, стандартному покрытию кузова машины, придавая им такие характеристики, благодаря которым они при возникновении необходимости быстро обеспечивают диффузию требуемых компонентов покрытия в поврежденную зону. Данный процесс напоминает процесс локализованного воздействия при затягивании раны на коже [2,4,6].

Наноингибиторы коррозии вполне способны перемещаться в уже затвердевшем покрытии автомобиля. Наночастицы в каждой твердой поверхности, будь то стекло, керамика, либо металл ведут себя подобно ионам в независимом растворе. Иными словами, указанные выше наночастицы, которые будут входить в состав нового защитного покрытия, будут стремиться обеспечить равновесие во всем объеме за счет быстрого выравнивания любой неровности, к примеру, царапины на поверхности, за счет диффузии.

Таким образом, использование наноингибиторов коррозии для защиты автомобильных покрытий позволит увеличить жизненный цикл изделий.

#### **Библиографический список**

1. Achkasov V.N., Zolnikov V.K., Belyaeva T.P. Controlling means of development electronic

component basis : monograph / V. N. Achkasov, V. K. Zolnikov, T. P. Belyaeva; Federal state unitary enterprise "Scientific research institute of electronic engineering", Federal state budget educational establishment "Voronezh state academy of forestry engineering". Lorman, MS, USA, 2012.

2. Active Protective Coatings. New-Generation Coatings for Metals / A.E. Hughes, J.M.C. Mol, M.L. Zheludkevich, R.G. Buchheit. – Springer Science+Business Media Dordrecht, 2016. 429 p. DOI 10.1007/978-94-017-7540-3.

3. Coelho M.C., Torráo G., Emami N., Grácio J. Nanotechnology in Automotive Industry: Research Strategy and Trends for the Future – Small Objects, Big Impacts // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2012. Vol. 12. P. 6621-6630. DOI: 10.1166/jnn.2012.4573.

4. Handbook of Nanoelectrochemistry. Electrochemical Synthesis Methods, Properties, and Characterization Techniques / M. Aliofkhaezai, A.S. Makhlof Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. 1446 p. DOI 10.1007/978-3-319-15266-0.

5. Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application. Volume B: Carbon Nanotube Based Polymer Composites / K.K. Kar, J.K. Pandey, S. Rana. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. 603 p. DOI 10.1007/978-3-642-45229-1.

6. Kartsonakis I. A., Koumoulos E. P., Charitidis C. A., Kordas G. Hybrid organic-inorganic coatings including nanocontainers for corrosion protection of magnesium alloy ZK30 // Journal of Nanoparticle Research. 2013. Vol. 15. 1871. doi:10.1007/s11051-013-1871-3.

7. Presting H., König U. Future nanotechnology developments for automotive applications // Materials Science and Engineering: C. 2003. Vol. 23, Iss. 6-8. P. 737–741. DOI:10.1016/j.msec.2003.09.120.

8. Голубев И.Г., Неменуцкая Л.А. Применение нанотехнологий для увеличения долговечности деталей машин // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3. № 1. С. 495-500.

9. Новиков А.И. Применение нанотехнологий в автомобильном транспорте. [Текст] : учебное пособие / А.И. Новиков ; М-во образования и науки РФ, ФБГОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2016. – 156 с.

10. Новиков А.И., Дорохин С.В., Новикова Т.П., Каширских А.Г. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции; под общей редакцией А.И. Новикова. 2014. С. 272-274.

11. Новиков А.И., Новикова Т.П., Евтеев М.Д. Нанозлектроника: очередной этап развития электронной техники // Техника и технологии: пути инновационного развития материалы III Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Горохов А.А., Куц В.В., Юго-Западный государственный университет . 2013. С. 140-142.

12. Новикова Т.П. МЭМС и НЭМС: актуальность и опыт применения в системах безопасности // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 449-451.

13. Новикова Т.П. Электронная компонентная база современных средств управления системами автомобильного транспорта // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. №. 2 (3). С. 803-806. DOI: 10.12737/19567.

14. Шигин К.А., Новиков А.И., Новикова Т.П. К вопросу использования наночастиц для повышения качества автомобильных смазочных материалов // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции; под общей редакцией А.И. Новикова. 2014. С. 361-363.

© Папанова К.А., Новиков А.И., 2016



**Просветов К.В.**

магистр 1 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ.

**Аксенов А.А.**

канд. техн. наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ.

**Малюков С.В.**

канд. техн. наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, РФ.

**Prosvetov K.V.**

1th year master of the Automotive Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation.

**Aksenov A.A.**

Ph.D., assistant professor of productions, repair and operation of cars department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation.

**Malyukov S.V.**

Ph.D., assistant professor of department of forestry mechanization and machine design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

**АНТИФРИКЦИОННАЯ ПРЕССОВАННАЯ ДРЕВЕСИНА****THE ANTIFRICTIONAL PRESSED WOOD**

Ключевые слова: узел трения, подшипник, прессованная древесина, антифрикционный материал, механизм.

Keywords: friction knot, bearing, pressed wood, antifrictional material, mechanism.

Антифрикционная прессованная древесина используется в машиностроении для изготовления узлов трения, работающих на самосмазке. Описанный антифрикционный материал имеет значительные преимущества над металлическими и полимерными антифрикционными материалами, особенно при эксплуатации машин в условиях отрицательных температур.

The antifrictional pressed wood is used in mechanical engineering for production of knots of the friction working at self-lubricant. The described antifrictional material has considerable advantages over metal and polymeric antifrictional materials, especially at operation of cars in the conditions of subzero temperatures.

В настоящее время во всех отраслях производства стремятся снизить энерго- и трудозатраты, а также материалоемкость производимой продукции. Система технического сервиса в сельском хозяйстве не является исключением. Здесь одной из самых актуальных задач является экономия металла или, другими словами, замена деталей или узлов, выполненных из металла, на другой материал, который по некоторым характеристикам даже превосходит его, при этом имеет меньшую массу, является более дешевым и легко поддается обработке [1, 2].

В связи с истощением мировых запасов сырья для производства конструкционных материалов все большее внимание привлекают новые композиционные материалы из возобновляемых источников сырья. Одним из таких материалов является модифицированная древесина, которая используется для изготовления деталей трения, таких как подшипники скольжения, втулки, вкладыши, направляющие, зубчатые колеса и т. д. [3].

Использование МД в узлах трения различных машин до настоящего времени решалось экспериментальным подбором и созданием различных конструктивных вариантов опор трения скольжения. Целенаправленное же решение этой проблемы невозможно без создания и использования надежных, удобных и проверенных методов расчета подшипников из МД [4, 5, 6].

Надежность машин и механизмов в значительной степени зависит от антифрикционных материалов, применяемых в узлах трения. Выбор материала для изготовления подшипников определяется условиями эксплуатации узла трения и машины в целом и зависит от нагрузки, скорости трения, температуры, условий смазки и др.

Эксплуатация узлов трения многих механизмов протекает в абразивных, агрессивных и влажных средах. Одним из лучших антифрикционных материалов, способных работать в таких сложных условиях, является прессованная древесина. Данный антифрикционный материал получают путем одноосного прессования древесины мягких лиственных пород с дальнейшей пропиткой различными веществами. Различная степень прессования позволяет получить необходимую плотность, а композиции пропиток позволяют получать необходимые заданные свойства материала.

Большое значение при эксплуатации узлов трения имеет температура, так как при ее изменении меняются линейные размеры деталей, а также свойства материалов. При отрицательных температурах металлы и пластмассы становятся хрупкими, часто происходит примерзание поверхностей трения во время остановок. Антифрикционная прессованная древесина лишена таких недостатков.

Узлы трения машин и механизмов испытывают значительные нагрузки, поэтому антифрикционная прессованная древесина должна обладать достаточной твердостью. Исследованиями [7, 8] доказано, что при уменьшении температуры твердость антифрикционной прессованной древесины увеличивается, а также возрастает упругость. Это способствует увеличению надежности узлов трения механизмов и машины в целом.

Степень уплотнения прессованной древесины также влияет на твердость, причем можно прогнозировать твердость в зависимости от температуры и степени уплотнения [9].

Для обеспечения работы узла трения на самосмазке, а также увеличения различных механических и эксплуатационных свойств антифрикционной прессованной древесины ее пропитывают под давлением полным погружением в расплавленную смесь церезина, полиэтилсилоксана и животного жира [10].

Антифрикционная прессованная древесина должна состоять из следующих компонентов, вес. %:

- церезин  $10,7 \div 11,3$ ;
- полиэтилсилоксан  $0,8 \div 1,2$ ;
- животный жир  $2,2 \div 2,8$ ;
- прессованная древесина  $84,7 \div 86,3$ .

Данный вид пропитки позволяет повысить предел прочности при сжатии вдоль волокон (до 10 %), увеличить торцевую твердость (до 15 %), а также снизить коэффициент трения (до 2 раз) и скорость износа (до 2 раз) по сравнению с различными аналогами.

Значительное увеличение триботехнических свойств антифрикционной прессованной древесины связано с применением в пропитке животного жира, который сохраняет смазочные свойства не только при положительных, но и при отрицательных температурах. При одновременном увеличении механических свойств у прессованной древесины при уменьшении температуры это позволяет значительно повысить ресурс и надежность узлов трения.

Процесс прессования древесины заключается в уменьшении полостей между волокнами, их размер приближается к сотням и даже десяткам нанометров. Это обстоятельство позволяет предположить, что прессованная древесина с достаточной степенью прессования является наноструктурным материалом.

Таким образом, степень прессования древесины влияет на размер полостей в материале при этом, чем больше степень прессования, тем меньше полости. Однако при увеличении плотности возрастает твердость, прочность и упругость прессованной древесины. Поэтому закон изменения (уменьшения) размеров полостей является не линейным, а гиперболическим.

Уменьшение полостей во всех направлениях может происходить только при трехосном прессовании. Так как для получения антифрикционной прессованной древесины применяется более простое одноосное прессование, полости будут уменьшаться только в одном направлении. Следовательно, имеющиеся полости у натуральной древесины примут форму трубок с наноразмерным сечением.

Механизм самосмазки обеспечивается выдавливанием на поверхность трения смазочных веществ, из которых в основном состоит пропитка, под нагрузкой, которую испытывает узел трения. Естественно предположить, что выдавливание смазки из трубок будет значительно легче и продолжительней, чем из равноосных полостей. Следовательно, наиболее предпочтительной поверхностью трения для подшипников из антифрикционной прессованной древесины является торцевая, а прессование необходимо осуществлять перпендикулярно торцевой поверхности. Тем более, что в работах [7, 8] торцевая поверхность подшипников признана оптимальной из-за наибольшей интенсивности увеличения твердости и упругости при отрицательных температурах.

После установки подшипника из антифрикционной прессованной древесины в узел трения с необходимым зазором, который рассчитывается в зависимости от габаритных размеров и условий эксплуатации подшипника, при трении торцевой поверхности об обычно металлическую сопряженную

поверхность смазка выдавливается из трубчатых пор на поверхность трения. Это обеспечивает оптимальный смазочный режим и износ только поверхности подшипника из антифрикционной прессованной древесины.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Антифрикционная прессованная древесина является наиболее предпочтительным аналогом (заменителем) антифрикционных металлических и полимерных материалов;
2. Применение пропитки, состоящей из церезина, полиэтилсилоксана и животного жира позволяет увеличить механические и триботехнические свойства прессованной древесины;
3. При проектировании узлов трения с подшипниками из антифрикционной прессованной древесиной необходимо применять торцевую поверхность трения.

### Библиографический список

1. Иншаков А.П. Перспективное направление диагностирования подшипникового узла турбокомпрессора [Текст] / А.П. Иншаков, Д.С. Мочалин, М.С. Курбакова // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 1. С. 101-103. DOI: 10.12737/13861.
2. Al-Haddad J.M. Chemical responses to modified lignin composition in tension wood of hybrid poplar (*populus tremula* × *populus alba*) [Text] / J.M. Al-Haddad, F.W. Telewski, K.-Y. Kang, S.D. Mansfield // Tree Physiology. 2013. Vol. 33. no. 4. pp. 365-373. DOI: 10.1093/treephys/tpt017.
3. Шамаев В.А. Химико-механическое модифицирование древесины [Текст] : монография / В.А. Шамаев. Воронеж, 2003. 260 с.
4. Белокуров В.П. Термо-влагоупругость подшипников скольжения из ДМ при использовании задачи Ламе [Текст] / В.П. Белокуров // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5. № 2. С. 104-110. DOI: 10.12737/111984
5. Duanmu J. Hygromechanical properties of composites of crosslinked allylglycidyl-ether modified starch reinforced by wood fibres [Text] / J. Duanmu, E.K. Gamstedt, A. Rosling // Composites Science and Technology. 2007. Vol. 67. no. 15-16. pp. 3090-3097. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.04.027
6. Temiz A. Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood [Text] / A. Temiz, N. Terziev, M. Eikenes, J. Hafren // Applied Surface Science. 2007. Vol. 253. no. 12. pp. 5355-5362. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.12.005.
7. Аксенов А.А. Влияние отрицательных температур на твердость прессованной древесины [Текст] / А.А. Аксенов // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». 2010. №6. С. 133-137.
8. Аксенов А.А. Исследования зависимости триботехнических свойств сильно нагруженных подшипников из модифицированной древесины [Текст] / А.А. Аксенов, С.В. Малюков // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 1 (21). С. 168-185. DOI: 10.12737/18740
9. Аксенов А.А. Зависимость твердости прессованной древесины от степени уплотнения при отрицательных температурах [Текст] / А.А. Аксенов // Воронежский научно-технический вестник. 2013. №3(5). С. 23-30.
- 10 Патент РФ №2491162. Антифрикционная прессованная древесина для изготовления деталей трения. Заявлено 23.03.2012; опубл. 27.08.2013; бюл. №24. 4 с.

© Просветов К.В., Аксенов А.А., Малюков С.В., 2016

**Рыжов О.А.**

Аспирант кафедры микро и  
наноэлектроники Санкт-  
Петербургского государственного  
электротехнического университета  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова-Ленина,  
РФ

**Ryzhov O.A.**

Graduate student department of micro and  
nanoelectronics Saint - Petersburg  
Electrotechnical University "LETI"  
Russian Federation

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

### **AUTOMATED SYSTEM SYNTHESIS OF NANOPARTICLES FOR SOLAR ENERGY IN THE TRANSPORT AND PROCESSING FACILITY**

Ключевые слова: альтернативные источники, транспорт, наночастицы, автоматизированный синтез, квантовые точки, плазмонные наночастицы

Keywords: alternative sources, transport, nanoparticles, automated synthesis, quantum dots, plasmonic nanoparticles

В статье изложены основные положения концепции поточного синтеза коллоидных полупроводниковых и металлических наночастиц в качестве перспективных материалов используемых в солнечной энергетике. Методы автоматизированного синтеза позволяют получать нанокристаллы более высокого качества в промышленных масштабах.

The article outlines the basic concepts of flow synthesis of colloidal semiconductor and metal nanoparticles as promising materials used in solar energy. Automated methods of synthesis allow to obtain nanocrystals of higher quality on an industrial scale.

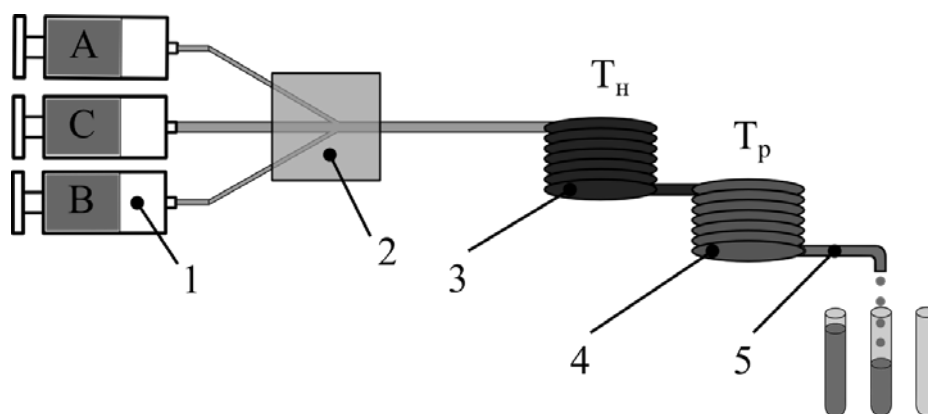
Солнечная энергетика начала зарождаться в середине прошлого столетия и прошла на данный момент огромный путь. Еще два десятилетия назад производство промышленных энергетических систем на солнечных фотоэлектрических элементах было делом далекого будущего. А сегодня можно сказать что это будущее наступило. Применение солнечной энергетике достаточно обширно, от космонавтики [1, с. 178] до сельского хозяйства [2, с. 30] в том числе и транспортно-технологический комплекс [3, с. 163], [4, с. 60].

Перед научным сообществом, на сегодняшний день, ставят следующие задачи: повышение эффективности, удешевление технологий, создание гибких солнечных элементов и т.д. Некоторые из них можно решить с помощью наноматериалов.

Полупроводниковые (квантовые точки) и металлические (плазмонные) коллоидные наночастицы это нанокристаллы выращенные в растворе, благодаря своим малым размерам обладают эффектами не свойственными макрообъектам, главной особенностью является высокая поглощательная способность наночастиц внешнего электромагнитного излучения, диапазон поглощения зависит от размера наночастиц [5, с. 61], [6, с. 1729]. Таким образом создавая по-

крытия из наночастиц для уже существующих солнечных элементов возможно повысить их КПД на 8% [7, с. 113]. Также на основе наночастиц возможно создавать гибкие солнечные элементы [8, с. 657].

На данный момент традиционным является лабораторный синтез нанокристаллов [9, с. 15], [10, с. 012029], [11, с. 19], [12, с. 27], который сложно масштабировать в промышленности, что приводит к высокой стоимости получаемого материала. Решением данной проблемы является система автоматизированного синтеза наночастиц, которая состоит из блока синтеза (реактор поточного синтеза наночастиц) [13, с. 1813], [14, с. 13], [15, с. 12] и блока диагностики (спектрофлуориметр для полупроводниковых наночастиц) [16, с. 61]. На рисунке 1 представлена принципиальная схема реактора поточного синтеза нанокристаллов.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема реактора поточного синтеза наночастиц: 1 – шприцевые насосы; 2 – модуль смешивания; 3 – модуль нуклеации; 4 – модуль роста; 5 – отбор наночастиц.**

В реакторе можно выделить три основных элемента:

1. Система задания скоростей потоков жидкости-носителя и реагирующих веществ. В качестве системы управления потоками жидкостей используются шприцевые насосы на основе шаговых двигателей. За счет изменения скорости вращения вала двигателя изменяется скорость потока жидкости, попадающей в отсек смешения и далее в капилляр. Количество насосов соответствует числу участвующих в синтезе веществ.

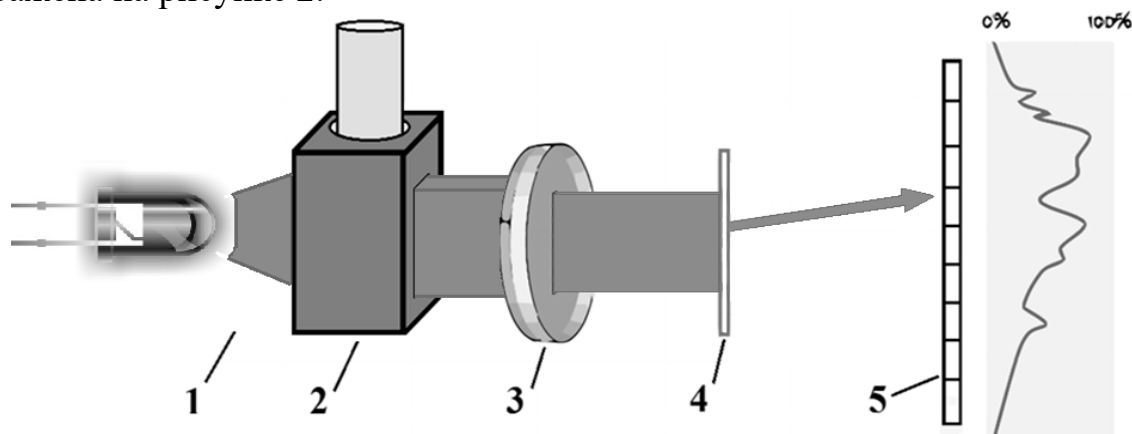
2. Капиллярная система. Так как диаметр капилляра составляет доли миллиметра, поток является ламинарным, однако скорость неравномерно распределена по сечению капилляра, что приводит к нежелательной дисперсии размеров наночастиц. По этой причине используется сегментированный поток, в котором реагенты перемещаются в виде последовательности разделенных капель. Это происходит, когда сегментированная фаза представляет собой жидкость, смачивающую стенки канала и находящуюся в избытке, которая при этом не смешивается с растворителем реагирующих веществ. Так капли проходят через реактор с одинаковой скоростью, уменьшается дисперсия наночастиц. Реакционный объем ограничен объемом капли, изолированным от стенок канала, что снижает риск загрязнения или закупорки канала продуктами реакции.

3. Система контроля температуры. Самым распространенным и способом подогрева реакционной смеси является ванна с минеральным маслом,

которой температура передается от нагревателя и контролируется датчиком температуры с микроконтроллером.

Поточный синтез можно представить в виде последовательности технологических этапов: 1) исходные вещества, служащие источниками ионов (прекурсоры) поступают в отсек смешивания, 2) смешанный раствор попадает в контур с температурой  $T_n$ , соответствующей нуклеации нанокристаллов, 3) далее зародыши кристаллов попадают в контур с более низкой температурой  $T_g$ , при которой происходит рост наночастиц, 4) на заключительной стадии происходит отбор растворов наночастиц.

Для диагностики полупроводниковых материалов в процессе их синтеза применяются фотометрические приборы, использование большинства которых в составе реактора нового типа является затруднительным. Необходимость в компактном устройстве экспресс-анализа люминесценции наночастиц была удовлетворена при помощи спектрофлуориметра, оптическая схема которого изображена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Оптическая схема спектрофлуориметра:**

**1 – источник излучения (светодиод  $\lambda=365$  нм, галогенная лампа широкого спектра излучения); 2 – кювета с исследуемым раствором; 3 – оптическая щель варьируемого размера; 4 – дифракционная решетка; 5 – КМОП-матрица (веб-камера).**

Возбуждающее излучение проходит сквозь кювету и вызывает фотолюминесценцию исследуемого образца. Вторичное излучение проходит через узкую щель и попадает на дифракционную решетку, после чего интенсивность люминесценции регистрируется в виде спектра КМОП-матрицей. Корпус устройства изготовлен при помощи экструзионной печати на 3D-принтере Up Plus 2 [17, с. 38].

Аппаратный комплекс предназначен как для исследовательских целей так и для производственного синтеза наночастиц. Модульная конструкция позволяет использовать комплекс для создания наночастиц большого спектра материалов и различной структуры, так например, добавив в систему несколько шприцевых насосов и еще одного модуля для смешивания растворов, возможен синтез структур ядро-оболочка. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-15-00324).

### Библиографический список

1. Глазер П. Э. Перспективы космической солнечной энергетики // Ракетная техника и космонавтика. – 1979. – Т. 17. – №. 1. – С. 176-189.
2. Ахмед Т.А. Джайлани Перспективы использования возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве Египта // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. – №1. – С.30-32.
3. Гречихин Л. И., Куць Н. Г. Современная энергетика. Пути и методы развития и применения на транспорте // Наукові нотатки. – 2010. – №. 28. – С. 162-165.
4. Шевельков В. В. Состояние и перспективы применения солнечных элементов питания на автомобильном транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2015. – Т. 2. №. 1. – С. 60-64. DOI: 10.12737/13845.
5. Aleksandrova O. A., et al. Features of colloidal quantum dots synthesis in nonpolar and aqueous media // Smart Nanocomposites. – 2014. – Т. 5. – №. 2. – С. 61.
6. Tarasov S. A. et al. Study of the self-organization processes in lead sulfide quantum dots // Semiconductors. – 2014. – Т. 48. – №. 13. – С. 1729-1731.
7. Парашук Д. Ю., Кокорин А. И. Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52. – №. 6. – С. 107-117.
8. Алёшин А. Н. Органическая оптоэлектроника на основе композитных (полимер—неорганические наночастицы) материалов // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – №. 6. – С. 657-664.
9. Мазинг Д. С. и др. Синтез коллоидных квантовых точек селенида кадмия в водной среде // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2014. – №. 7. – С. 15-19.
10. Mikhailov I. I. et al. The study of CdSe colloidal quantum dots synthesized in aqueous and organic media // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – Т. 572. – №. 1. – С. 012029. (Scopus)
11. Александрова О.А. и др. Синтез и самоорганизация квантовых точек сульфида свинца для люминесцентных структур, полученных методом испарения коллоидного раствора // Нано-и микросистемная техника. – 2013. – №. 2. – С. 19-23.
12. Матюшкин Л. Б. и др. Особенности синтеза люминесцирующих полупроводниковых наночастиц в полярных и неполярных средах // Биотехносфера. – 2013. №2 (26). – С.27-32.
13. Nightingale A.M., de Mello J.C. Segmented flow reactors for nanocrystal synthesis // Adv. Mater. 2013. V. 25. P. 1813–1821.
14. Aleksandrova O.A., Ryzhov O.A. et al. Development of flow reactor for the synthesis of semiconductor and metal nanoparticles // Университетский научный журнал. – 2015. – № 15. – С. 13-21.
15. Aleksandrova O. A. et al. A flow reactor for synthesis of nanoparticles with a system of optical diagnostics // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). 2015 IEEE NW Russia. – IEEE, 2015. – С. 12-12.
16. Александрова О.А., Матюшкин Л.Б., Рыжов О.А. Компактный спектрофлуориметр для экспресс-диагностики оптических свойств коллоидных квантовых точек в реакторах точного типа. // В сборнике: Диагностика наноматериалов и наноструктур Труды VII всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению. 2014. С. 61-65.
17. Матюшкин Л.Б., Пермяков Н.В. Применение технологии 3D-печати в обеспечении профессионально ориентированной подготовки кадров в интересах nanoиндустрии // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 38-47.

© Рыжов О.А., 2016



**Собачкин А.В.**

магистр 1 курса факультета  
энергомашиностроения и  
автомобильного транспорта  
Алтайского государственного  
технического университета им.  
И.И. Ползунова, г. Барнаул, РФ

**Свиридов А.П.**

аспирант 3 года факультета  
энергомашиностроения и  
автомобильного транспорта  
Алтайского государственного  
технического университета им.  
И.И. Ползунова, г. Барнаул, РФ

**Яковлев В.И.**

канд. техн. наук, доцент кафедры  
наземных транспортно-  
технологических систем Алтайского  
государственного технического  
университета им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул, РФ

**Ситников А.А.**

д-р техн. наук, профессор кафедры  
наземных транспортно-  
технологических систем Алтайского  
государственного технического  
университета им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул, РФ

**Радионов Р.В.**

магистр 2 курса факультета  
энергомашиностроения и  
автомобильного транспорта  
Алтайского государственного  
технического университета им.  
И.И. Ползунова, г. Барнаул, РФ

**Sobachkin A.V.**

1th year master of the Faculty of power  
engineering and automobile transport,  
Polzunov Altai State Technical University,  
Barnaul, Russian Federation

**Sviridov A.P.**

3th year post-graduate student of the  
Faculty of power engineering and  
automobile transport, Polzunov Altai State  
Technical University, Barnaul,  
Russian Federation

**Yakovlev V.I.**

Ph.D., associate professor of the  
Department of land transport and  
technological systems, Polzunov Altai  
State Technical University, Barnaul,  
Russian Federation

**Sitnikov A.A.**

Doctor of technical sciences, professor of  
the Department of land transport and  
technological systems, Polzunov Altai  
State Technical University, Barnaul,  
Russian Federation

**Radionov R.V.**

2nd year master of the Faculty of power  
engineering and automobile transport,  
Polzunov Altai State Technical University,  
Barnaul, Russian Federation

**АНТИФРИКЦИОННЫЕ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ  
ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

**ANTIFRICTIONAL GAS DETONATION COATINGS OF PISTONS FOR  
COMBUSTION ENGINES BASED ON NANOSTRUCTURED COMPOSITE  
MATERIAL**

Ключевые слова: детонационное напыление, композиционный материал, алюминий, фуллерен, механоактивация, антифрикционное покрытие, поршень двигателя внутреннего сгорания.

Keywords: detonation spraying, composite material, aluminum, fullerene, mechanical activation, antifriction coatings, piston of internal combustion engine.

Проведено исследование особенностей получения алюмоматричных композиционных материалов с углеродными ультрадисперсными структурами с помощью технологии механоактивационной обработки. Электронно-оптические исследования показали, что напыленное газодетонационным способом покрытие имеет слоистую структуру. Установлено, что износостойкость и антифрикционные свойства подобных покрытий намного превосходят свойства алюминиевого поршневого сплава.

Experimentally carried out the study of features of obtaining aluminum-matrix composite materials with carbon dispersed structures using technology of mechanical activation treatment. Electron optical studies showed that coatings, sprayed by gas detonation method, have a layered structure. The wear resistance and antifriction properties of these coatings are far superior to the properties of standard aluminum alloy piston.

Поршень двигателя внутреннего сгорания принадлежит к числу наиболее сложных и ответственных деталей двигателя, поскольку эффект от термодинамического процесса, который происходит непосредственно в двигателе, осуществляется именно при помощи поршня. Эта деталь эксплуатируется в экстремальных условиях: при высоких давлениях, значительных инерционных нагрузках и температурных воздействиях.

Во время работы ДВС наиболее часто встречаемая проблема – износ юбки поршня на нерасчетных режимах (так называемые задиры поршня), особенно в условиях масляного голодания при запуске двигателя [1, с. 17]. Анализ существующих конструкций, а также теоретических разработок в области изготовления и конструирования деталей цилиндро-поршневой группы ДВС показывает, что существует два наиболее эффективных способа воздействия на режим трения в этой группе деталей [2, с. 218]. Первый способ относится к конструкторским решениям – профилирование юбки поршня, второй способ заключается в создании на поверхности юбки поршня покрытия с особыми свойствами.

На наш взгляд, наиболее перспективным и позволяющим управлять режимом трения деталей цилиндро-поршневой группы является второй способ: в зависимости от необходимых условий можно менять особые свойства поверхности юбки поршня, получая тот или иной коэффициент трения. Например, известным материалом для антифрикционного покрытия являются материалы типа твердой смазки на основе дисульфида молибдена, покрытия «Grafal» на основе графита и т.п. [3, с. 22].

Значительный прорыв в увеличении срока службы поршня дизельного двигателя (как детали, лимитирующей срок эксплуатации двигателя) может быть достигнут с развитием и применением композиционных материалов. Масштабное применение нанотехнологий в последние годы позволило проводить материаловедческий дизайн композиционных материалов, т.е. конструировать и изучать их на уровне отдельных атомов или кластеров. Многими ис-

следователями замечено, что при снижении характерных размеров частиц до наноуровня материалы начинают проявлять специфические механические, тепловые, электрические свойства, обусловленные наличием в подобных материалах особой структуры [4, с. 337]. Поэтому, перспективой развития направления работ по композиционным материалам, может стать отрасль получения новых материалов – наноструктурированных порошков, которые будут в основе будут иметь матрицу из одного материала с равномерно распределенными в ней наночастицами другого элемента.

В качестве возможных упрочнителей, вводимых в матрицу композиционного материала, используют различные частицы в наноразмерном виде: оксиды, нитриды, карбиды и т.п. [5, с. 3]. Однако, особое внимание в последнее время уделяется наночастицам на основе углерода: графены, фуллерены  $C_{60}$ , наноалмазы и другие. В случае сохранения отличительных свойств этих частиц в композиционном материале можно быть получить изделие с уникальным комплексом свойств.

Поскольку углеродные дисперсные частицы в исходном состоянии представляют собой нанопорошки, то при их использовании в качестве упрочнителей в композиционных материалах возникают достаточно сложные задачи их гомогенного распределения в матрице.

Технологией, позволяющей решить задачу равномерного распределения частиц упрочнителя в объеме матрицы, является процесс механической активационной обработки порошковых материалов [6, с. 173]. В основе технологии лежит использование шаровых планетарных мельниц-активаторов.

Технологией, позволяющей сохранить фазовый и химический состав, а также размерные порядки напыляемого материала практически на исходном уровне (следовательно, обеспечить появление наноструктур в покрытии), является способ газодетонационного формирования покрытия [7, с. 16]. Также способ детонационного напыления позволяет практически полностью устранить минусы электролитических способов получения покрытий и диффузионной металлизации, таких как большая длительность процесса получения покрытий, невысокую толщину покрытия (порядка нескольких микрометров); плазменного напыления, газоплазменной наплавки, при которой происходит деформация обрабатываемой детали в результате интенсивного нагрева [8, с. 23].

Целью работы является исследование структуры и свойств покрытий поршня ДВС, полученных газодетонационным напылением механоактивированных наноструктурированных композиционных порошков состава «алюминий-фуллерен».

Для создания порошковой композиционной смеси в качестве матрицы использовался алюминий (марки АД0) в порошковом состоянии. В качестве упрочняющей фазы использовали суспензию, содержащую смесь фуллеренов  $C_{60}$  и ультрадисперсных алмазов.

Выбор компонентов порошковой смеси обусловлен рядом факторов [9, с. 115]:

- необходимостью обеспечить химическое сродство материала покрытия к материалу основы (поршня). Поскольку поршень наиболее часто изготавлива-

ется из силумина, то в качестве матрицы композиционной смеси логично выбрать алюминий;

- необходимостью обеспечить низкие коэффициенты трения в паре трения поршень-цилиндр. Для выполнения этого требования с учетом анализа современного состояния вопроса был выбран перспективный материал – фуллерен  $C_{60}$ .

Гранулометрический состав исходного порошка алюминия варьировался в пределах 63...100 мкм, фуллерен находился в наноструктурном состоянии (порядка 50 нм). Выбранные компоненты смешивались в требуемых соотношениях. Полученная порошковая смесь подвергалась механической активации в планетарной шаровой мельнице-активаторе АГО-2С по стандартной технологии [10, с. 142]. Интенсивность размола составляла 400 м/с<sup>2</sup>. Время механоактивации смеси варьировалось и составляло 5...15 минут.

Для исследования частиц механокомпозитов, полученных в результате обработки в АГО-2С, нами использовался растровый электронный микроскоп EVO 50 XVP фирмы Carl Zeiss, с максимальным увеличением до 1 млн. крат и разрешающей способностью 2 нм.

Напыленное покрытие имеет характерную для газодетонационного покрытия слоистую структуру со светлыми границами между слоями, содержащими повышенное количество алюминия (рис. 1).

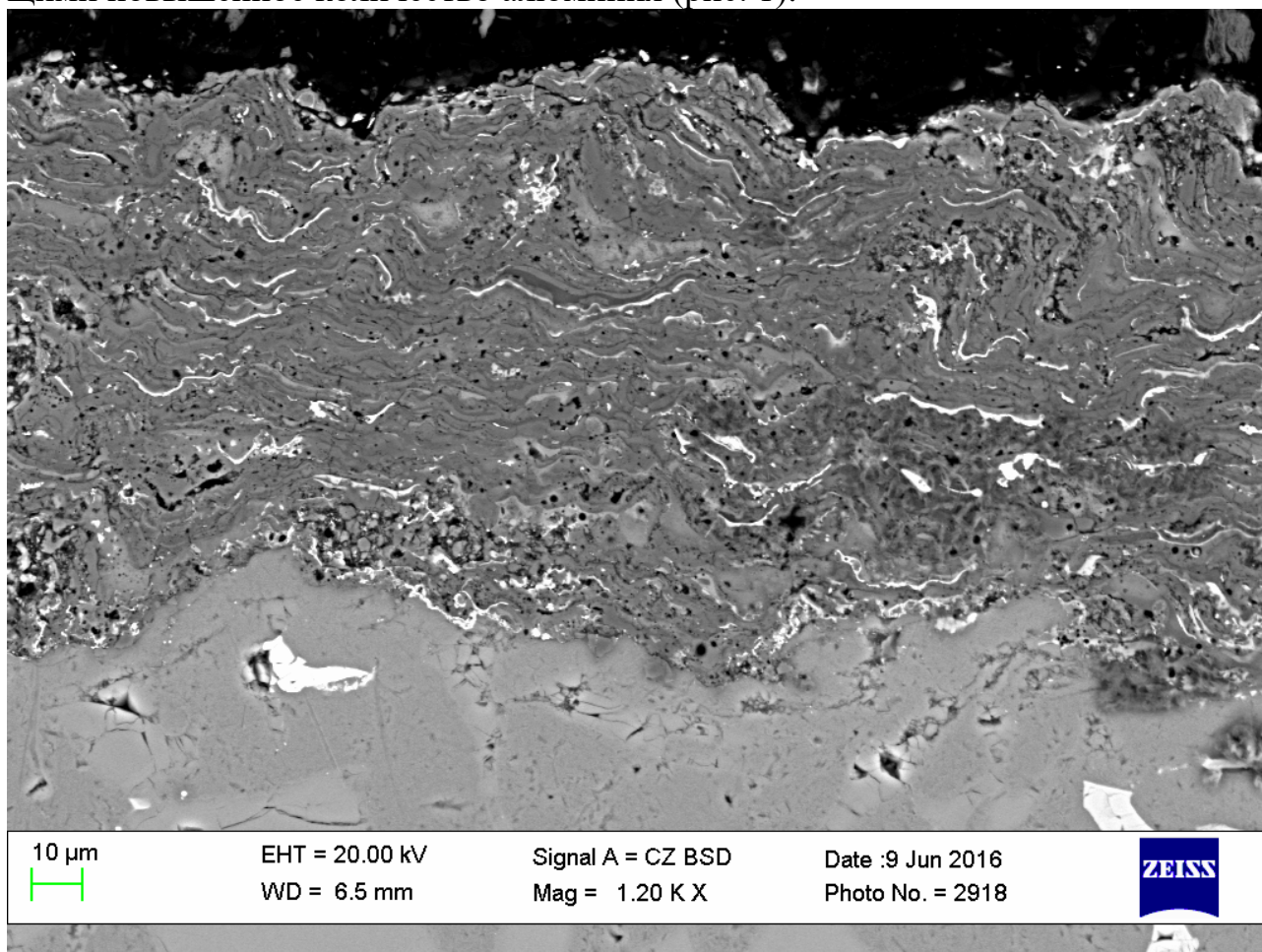
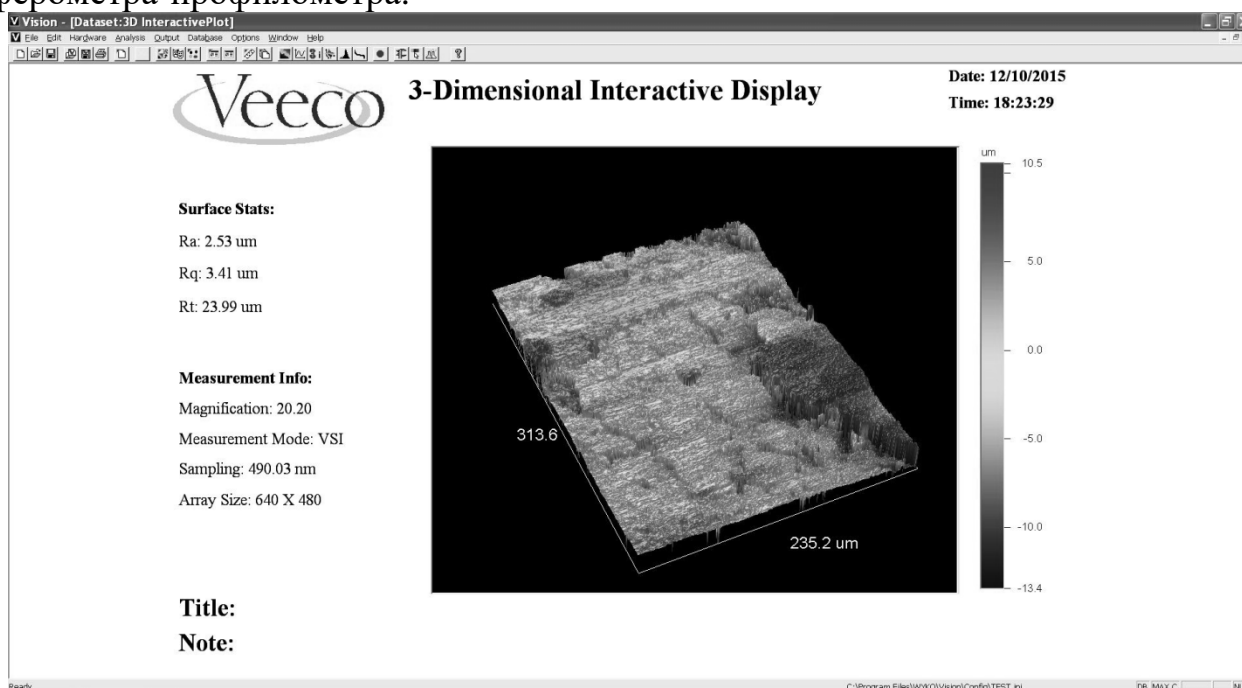


Рисунок 1 – Структура покрытия образца, напыленного составом 70 % Al + 30 %  $C_{60}$

Покрытие довольно однородное, структура слоистая, граница раздела «покрытие-материал» четкая, пористость незначительная (менее 3 %). Средний размер пор составляет порядка 5 мкм, максимальный размер пор – 11 мкм, минимальный размер пор – 3,7 мкм. Поры являются закрытыми, локализованы в покрытии. Присутствие незначительного количества пор в покрытии предположительно будет способствовать увеличению антифрикционных свойств поршня в связи с возможностью удержания в порах некоторого количества смазочного вещества. Средняя толщина покрытия составляет 85 мкм.

Анализ поверхности газодетонационных покрытий проводился с помощью оптического профилометра-интерферометра Veeco NT 9080.

Результаты определения топологии поверхности покрытия показаны на рисунке 2. Топология поверхности была определена путем компьютерного трехмерного моделирования на основе данных, полученных с помощью интерферометра-профилометра.



**Рисунок 2 – Трехмерная модель газодетонационного покрытия**

По результатам определения топологии поверхности можно сделать вывод о наличии выступов и впадин по площади поверхности покрытия. Величина шероховатости определяется прибором с высокой точностью и составляет от Ra 1,614 до Ra 5,455. Данные значения шероховатости поверхности поршня ДВС выходят за пределы установленных по технологическому циклу, потому необходимо предусматривать финишную операцию по доводке значений шероховатости до заданных требований в процессе производства поршней ДВС.

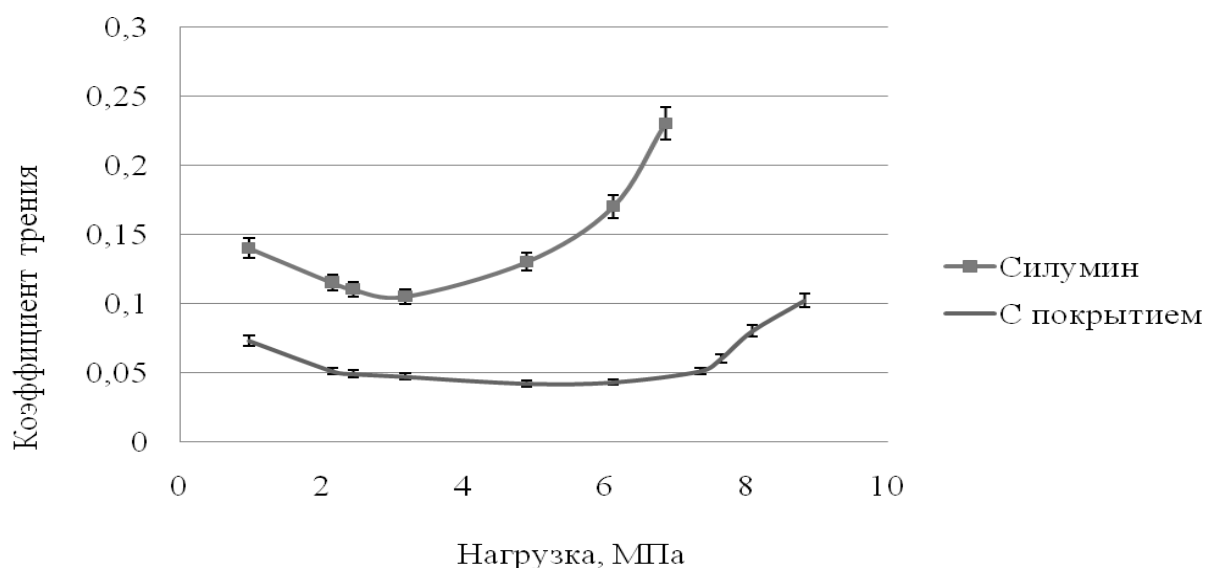
Трибологические исследования полученных покрытий проводились с помощью триботехнического комплекса, разработанного на базе машины для испытания материалов на трение 2168 УМТ. Исследования антифрикционных и износостойких свойств проводились в режиме сухого трения по схеме «диск-колодка» при вращательном движении диска.

В качестве материала диска использовалась сталь 40, на внутреннюю поверхность колодки из алюминиевого поршневого сплава (силумина

AK21M2,5H2,5) происходило напыления покрытий. Перед каждым испытанием проводилась промывка пары трения и ее просушка с целью удаления продуктов износа.

Нагрузить диски с покрытием до задира не удалось вплоть до нагрузки 9,6 МПа, в то время как на ролике из поршневого сплава AK21M2,5H2,5 начинают появляться следы задира при 4,41...4,9 МПа, а при 6,86 МПа наступает схватывание со шлифованной поверхностью колодки.

Зависимость коэффициента установившегося трения покрытий от нагрузки показана на рисунке 3. Видно, что при нагрузке свыше 7,85 МПа появились локальные очаги схватывания покрытия, однако до 9,61 МПа явления задира не наблюдалось.



**Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения покрытий от нагрузки**

Коэффициент трения покрытия при нагрузках 2,94...6,86 МПа не превышает 0,051, а минимальное значение коэффициента (0,042) достигается при 4,99 МПа.

Исследование износостойкости покрытий проводилось по ГОСТ 23.204-78 Обеспечение износостойкости изделий. Методы определения истирающей способности поверхностей при трении. Износостойкость измеряли по потере массы трущихся тел: относительную износостойкость брали как отношение уменьшения массы образца после испытания к первоначальной массе этого же образца и выразили в процентах.

Испытания на износ проведены в условиях, показанных в таблице 1. Здесь же даны для сравнения результаты испытания AK21M2,5H2,5.

Из приведенных в таблице данных видно, что износостойкость и антифрикционные свойства образцов с покрытиями значительно превосходят свойства стандартного алюминиевого поршневого сплава.

Таким образом, исследования газодетонационных покрытий на основе алюмоматричного композиционного материала, напыленных на алюминиевые поршневые сплавы, показали, что комплекс физико-механических свойств покрытий обеспечивает возможность их использования в качестве антифрикционных и износостойких на поршнях дизелей.

**Таблица 1 – Параметры и результаты трения и износа**

Материал диска / покрытия	Условия испытания на износ			Момент трения, Н·м	Коэффициент трения	Нагрузка задира, МПа	Относительная износостойкость, %
	Скорость, м/с	Нагрузка, МПа	Время, ч				
Образец с покрытием, состав напыления 70 % Al + 30 % Cr60	0,9	7,35	6	2,65	0,045	>9,81	93
Поршневой сплав АК21М2,5Н2,5		5,37		4,71			

### Библиографический список

1. Бондарев, А. А. Технология ремонта изношенных поршней [Текст] / А. А. Бондарев // Сварщик. – 1999. – № 6. – С. 17.
2. Путинцев, С. В. Теоретические предпосылки снижения механических потерь в ЦПГ модификацией трущейся поверхности поршня [Текст] / С. В. Путинцев, М. Д. Пронин // Двигатель-2007 : Сборник научных трудов международной конференции. – М., 2007. – С.218–220.
3. Воропай, Н. М., Двухдуговая наплавка алюминиевых поршней комбинированным – неплавящимся и плавящимся электродом [Текст] / Н. М. Воропай, В. В. Лесных, В. А. Мишенков // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С. 21–25.
4. Хорьякова, Н. М. Разработка медных гальванических покрытий для поршневых колец, модифицированных наночастицами электроэрозионной меди [Текст] / Н. М. Хорьякова, Е. В. Агеев // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 337–339.
5. Евдокимов, И.А. Исследование структурно-фазового состава и физико-механических свойств алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных углеродными наноструктурами [Текст] / И. А. Евдокимов // автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Владимир, 2013. – 23 с.
6. Sobachkin, A. V. Application of Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Mechanoactivating Treatment for Producing Multi-Component Composite Alloying Materials [Text] / A. V. Sobachkin, V. I. Yakovlev, A. A. Sitnikov // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 173–177.
7. Собачкин, А. В. Структура и свойства газодетонационных покрытий различного функционального назначения на основе порошков слоистых механокомпозиатов с металлической и интерметаллидной матрицей [Текст] / А. В. Собачкин, А. А. Попова, И. В. Назаров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 6 (102). – С. 16–22.
8. Иванов, А. А. Практические применения газотермических технологий нанесения защитных покрытий [Текст] : руководство для инженеров / А. А. Иванов. – М. : Машиностроение, 2009. – 65 с.
9. Хасуй, А. Наплавка и напыление [Текст] / А. Хасуй, О. Моригаки / пер. с яп. В. И. Попова; под ред. В. С. Степина, И. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
10. Собачкин, А. В. Морфология покрытий из многокомпонентных, предварительно механоактивированных порошков СВС-композитов [Текст] / А. В. Собачкин, И. В. Назаров, В. И. Яковлев и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 141–144.

**Хардиков С.В.**аспирант, «Юго-Западный  
государственный университет».**Агеев Е.В.**доктор техн. наук, доцент, профессор  
кафедры автомобилей, транспортных  
систем и процессов, «Юго-Западный  
государственный университет».**Khardikov S. V.**graduate student, "South West  
state University".**Ageev E. V.**doctor of technical Sciences, do-  
cent, Professor of the Department of  
cars, transport systems and processes,  
"South West state University".**НАНОПОРОШОК ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ****NANOPOWDER BALL-BEARING STEEL**

Ключевые слова: нанопорошок, электроэрозионное диспергирование, шарикоподшипниковая сталь.

Keywords: nanopowder, electroerosion dispersion, ball-bearing steel.

В статье представлены результаты исследования нанопорошка шарикоподшипниковой стали, полученного методом электроэрозионного диспергирования выбракованных подшипников в дистиллированной воде. Установлено, что нанопорошок включает в себя частицы правильной сферической формы, что значительно расширяет область его применения.

The article presents the results of a study of nanopowder ball-bearing steel obtained by electro erosion dispersing of rejected bearings in distilled water. It is established that the nanopowder comprises particles of spherical shape, which significantly expands the scope of its application.

Одним из основных направлений развития технологии машиностроения в настоящее время является совершенствование существующих и разработка новых безотходных, экологически чистых, материалосберегающих производственных процессов, т. е. таких процессов, которые обеспечивают получение заготовок с минимальными припусками под последующую механическую обработку либо вообще без них при одновременном снижении расхода дефицитных материалов. В решении этой проблемы определенная роль принадлежит порошковой металлургии [1, с. 29-32; 2, с. 45-48].

Порошковая металлургия – это отрасль техники, включающая изготовление порошков из металлов и их сплавов и получение из них заготовок и изделий без расплавления основного компонента. Методами порошковой металлургии можно создавать материалы из различных компонентов с резко отличающимися свойствами и температурами плавления, новые материалы с разнообразным комплексом физико-механических свойств. Порошковая металлургия используется как для создания принципиально новых материалов и изделий из них, так и для изготовления самой широкой номенклатуры конструкционных деталей общего назначения [3, с. 243; 4, с. 95; 5, с.398].

Среди интенсивно развивающихся направлений современных исследований особое место уделяется малоразмерным объектам, например, порошкам различных металлов. Уникальная микроструктура нанопорошков придает им ряд новых свойств по сравнению с обычными материалами. В настоящее время нанопорошки шарикоподшипниковой стали представляют большой интерес.

Нанотехнология – область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических



методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомной структурой путём контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами.

Наиболее перспективным методом получения нанопорошков из отходов шарикоподшипниковой стали является метод электроэрозионного диспергирования. Метод ЭЭД отличается экологической чистотой, малыми энергозатратами, хорошей управляемостью процесса [6, с. 695; 7, с. 315; 8, с. 389].

Процесс ЭЭД представляет собой разрушение токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами [9, с. 360; 10, с. 15; 11, с. 174].

Для получения порошка шарикоподшипниковой стали из отходов методом электроэрозионного диспергирования использовали установку для ЭЭД токопроводящих материалов и выбракованные подшипники качения [12, с. 2-3].

Процессы, происходящие при электроэрозионном диспергировании, протекают в межэлектродном пространстве, заполненном рабочей жидкостью, которая, находясь в рабочей зоне, оказывает на процесс, электроды, кусочки диспергируемого материала и продукты эрозии физическое, химическое, моющее и механическое воздействие. Это влияние сказывается на всех стадиях процесса ЭЭД.

Рабочая жидкость должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечению высоких технологических показателей ЭЭД, термической стабильности физико-химических свойств при воздействии электрических разрядов с параметрами, соответствующими применяемым при ЭЭД;
- низкой коррозионной активности к диспергируемым материалам;
- высокой электрической прочности; – высокой температуре вспышки и низкой испаряемости;
- высокой охлаждающей способностью и низкой стоимостью.

Всем вышеперечисленным требованиям в наибольшей степени отвечает вода дистиллированная, имеющая наиболее простой химический состав, достаточно высокую охлаждающую способность, а также относительно низкую стоимость.

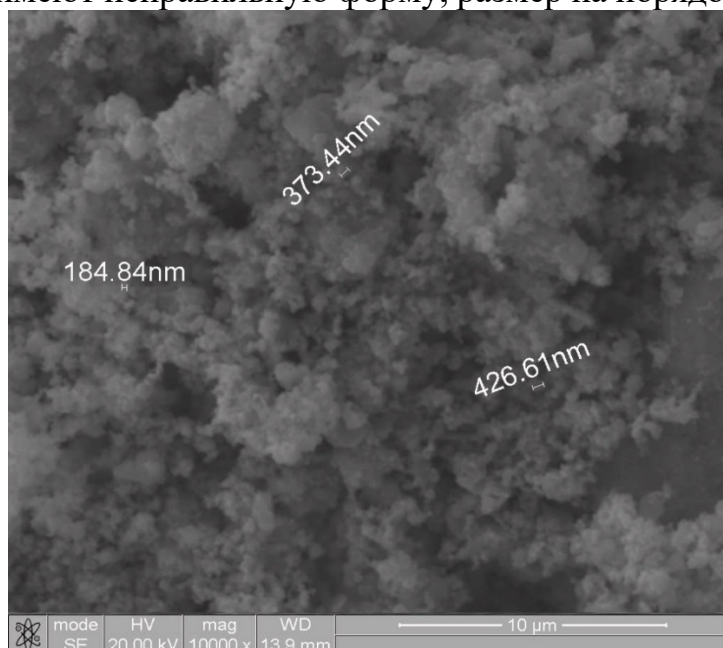
Отходы загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной водой, процесс проводили при следующих электрических параметрах: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ, напряжение 125...135 В, частота импульсов 118...123 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение материала отходов с образованием дисперсных частиц порошка.

Поэтому, целью настоящей работы являлось изучение морфологии частиц порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования из отходов шарикоподшипниковой стали.

Частицы образца порошка были исследованы методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью детектора вторичных электронов встроенного в растровый электронный микроскоп Nova NanoSEM 450 (рис. 1).

На снимке видно, что форма частиц порошка обусловлена тем, в каком виде материал выбрасывается из лунки в процессе ЭЭД. Видно также, что в порошке преобладают частицы, имеющие правильную сферическую или эллиптическую форму. Они получаются кристаллизацией расплавленного материала (жидкой фазы). Частицы, образующиеся при кристаллизации кипящего материала (паровой фазы),

имеют неправильную форму, размер на порядок меньше частиц, образующихся их жидкой фазы, и обычно агломерируются друг с другом и на поверхности других частиц. В процессе ЭЭД такие частицы наиболее подвержены химическим и фазовым изменениям.



**Рисунок 1 – Снимок с РЭМ частиц порошковой шарикоподшипниковой стали**

Таким образом, в ходе проведенного исследования было установлено, что порошок, полученный методом ЭЭД из отходов шарикоподшипниковой стали в дистиллированной воде, состоит в основном из частиц правильной сферической формы и имеет в своем составе наноразмерные частицы, что значительно расширяет область его применения.

#### **Библиографический список**

1. Жолдошов Б.М. Особенности термоциклической обработки стали ШХ15 / Б.М. Жолдошов, В.С. Муратов, М.С. Кенис // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 3. С. 29-32.
2. Водовозова Г.С., Жданов П.А., Ливанова О.В., Филиппов Г.А., Белоусов Г.С. Структура и механические свойства среднеуглеродистой подшипниковой стали // Технология колесных и гусеничных машин. 2013. № 6. С. 45-48.
3. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник /Б.Н. Бабич, Е.В. Вершинина, В.А. Глебов и др. - М.: ЭКОМЕТ, 2005.- 520 с. - ISBN 5-89594- 122-2.
4. Ультрадисперсные системы: получение, свойства, применение: Уч. пособие / Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. – М.: МИСиС, 2006. – 182 с.
5. Нанотехнология. Физика химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / Суздаев И.П. - М.: КомКнига, 2006. 592 с.
6. Ageeva E.V. Morphology of Copper Powder Produced by Electrospark Dispersion from Waste / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, N.M. Noryakova // Russian Engineering Research, 2014, Vol. 34, No. 11, pp. 694–696.
7. Агеев Е.В., Хардииков С.В., Пикалов С.В. Электроэрозионное диспергирование – перспективная технология переработки выбракованных подшипников // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2. № 1. С. 314-317.
8. Хорьякова Н.М. Морфология и элементный состав медного порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования / Н.М. Хорьякова, В.С. Малюхов // Современные материалы, техника и технология: сб. матер. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 388-390.
9. Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. Применение медных порошков и зависимость их свойств от размера частиц // Перспективное развитие науки, техники и технологий: матер. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 358-362.
10. Новиков Е.П. Изучение формы и морфологии порошка, полученного из отходов алюминия методом электроэрозионного диспергирования / Е.П. Новиков, Е.В. Агеева, Д.А. Чумак-Жунь // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 4 (17). С. 13-17.
11. Новиков Е.П. Исторические аспекты получения порошков из токопроводящих отходов производства методом электроэрозионного диспергирования // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 1 (4). С. 170-177.
12. Патент 2449859, Российская Федерация, С2, В22F9/14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2010104316/02; заяв. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012. – 4 с.

© Хардииков С.В., Агеев Е.В., 2016

**Юрьев Н.Ю.**

студент 2 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

**Камалова Н.С.**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова», РФ

**Евсикова Н.Ю.**

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова», РФ

**Yuryev N.Yu.**

2nd year student of the Automotive Faculty, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

**Kamalova N.S.**

Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

**Evsikova N.Yu.**

Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

## СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ ПРИ РЕМОНТНОЙ ПОКРАСКЕ АВТОМОБИЛЯ

### SPECTROPHOTOMETRY FOR REPAIR CAR PAINTING

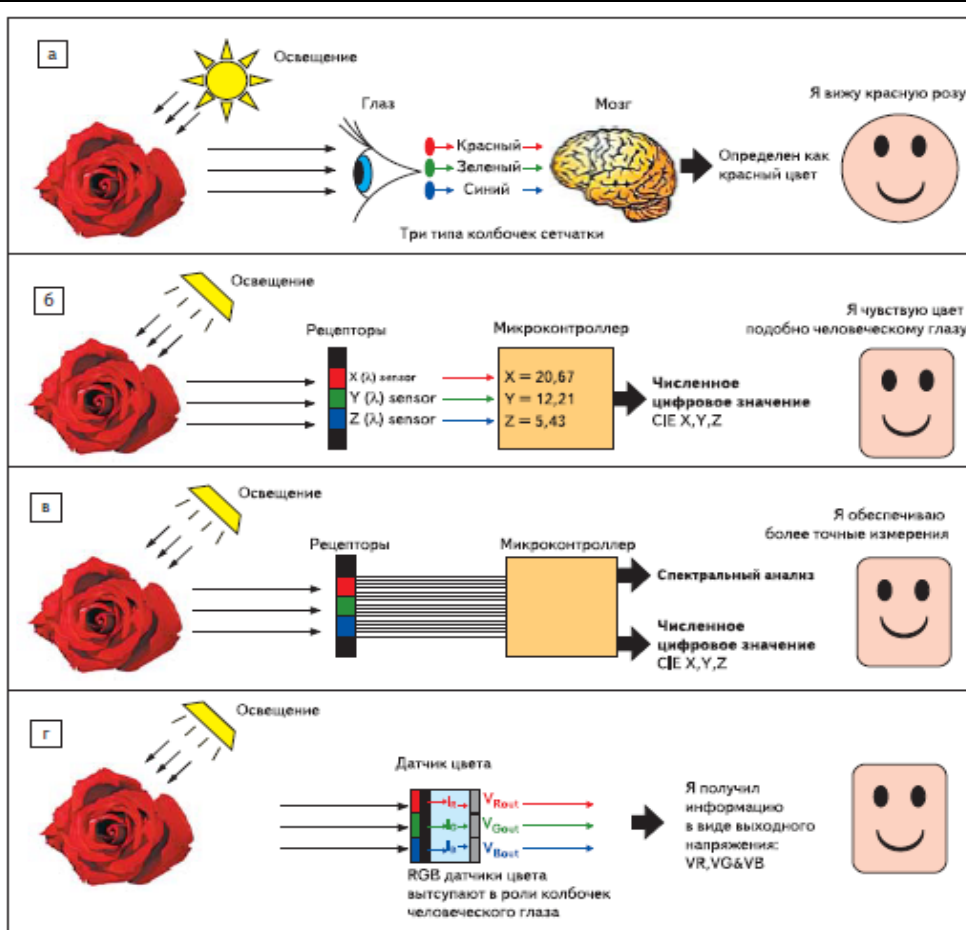
Ключевые слова: наноструктуры, световые потоки, индекс восприятия, взаимодействие световых потоков с периодическими структурами

Keywords: nanostructures, light streams perception index, the interaction of light streams with periodic structures

В работе предлагается для решения основной проблемы технологий ремонтной покраски автомобиля сформулировать фундаментальные подходы мониторинга световых потоков, отраженных от сложных структур. Таким образом, принципы квантовой механики позволят разработать методики анализа лакокрасочных покрытий на наноуровне.

We propose to solve the basic problem of car paint repair technology to formulate fundamental approaches for monitoring light beams reflected from the complex structures. Thus, the principles of quantum mechanics allow to develop techniques for analysis of coatings on a nanolevel.

Основная проблема современных технологий ремонтной покраски автомобиля состоит в том, что невозможно добиться идеального совпадения цвета ремонтного и изначального лакокрасочного покрытия. Можно лишь приблизиться к заводскому цвету, сделать границу перехода максимально незаметной. К сожалению, в российской колористической практике государственными стандартами не предусмотрены никакие допуски на цветосовпадение. Качество подбора цвета оценивается по субъективным параметрам, либо по параметрам, установленным фирмой или заводом-изготовителем (см. рис.1). Однако, неуклонно возрастающая публикационная активность [10] в области нанотехнологий [13] дает основания предположить возможное использование УНТ [11] или квантового эффекта [12] в рассматриваемом направлении.



**Рисунок 1 – Определение цвета а)человеческим глазом;б)колориметром; в)спектрофотометром г)RGB-датчиком цвета**

Цель данной работы – анализ существующих качественных методик оценки цвета и принципов работы приборов в рамках физических основ нанотехнологий. Такой подход позволяет выработать основные требования к параметрам приборов и сформулировать общие положения, которые могут лечь в основу системы стандартов качества спектрометрических исследований [1,2].

В настоящий момент существуют две количественные методики описания цвета: фотоколориметрия и спектрофотометрия. Фотоколориметрия основана на измерении интенсивности света, прошедшего через поляризованное стекло, фотоэлектрическим способом. Спектрофотометрия – на измерении фотоэлектрическим способом интенсивности прошедшего через светофильтр строго монохроматического света. Применяемые в данных методах монохроматизаторы и приемники света приведены в таблице 1 в сравнении с визуальным методом.

При количественном анализе используются три различных типа датчиков цвета: датчики, преобразующие поглощенный световой поток в фототок, и датчики, преобразующие поглощенный световой поток в аналоговый или цифровой сигнал. Если отбросить различия в методах обработки сигналов (аналоговой или цифровой), в основе принципа работы датчиков лежит спектральный анализ поглощенного света с помощью фотоэлектрических приборов. Очевидно, что данные технологии основываются на особенностях взаимодействия комплексного (многочастотного) светового сигнала с периодическими наноструктурами: кристаллическими решетками, наноструктурами конечного порядка и т.д. Поэтому параметры качества подобных датчиков зависят от распределения мощности в

спектре облучателя и от особенностей взаимодействия световых потоков с квантовыми периодическими структурами [3,4].

Таблица 1

Метод Прибор	Визуальная колориметрия	Фотоколориметрия	Спектрофотометрия
Монохроматизатор света	нет	светофильтры, дифракционные решётки	призмы, дифракционные решётки
Приёмник света	глаз	фотоэлемент	фотоэлемент

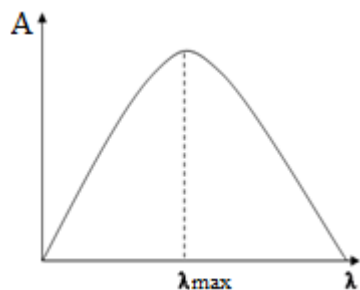


Рисунок 2 - Спектр светового сигнала

Согласно квантовой механике и обширной базе экспериментальных данных спектр излучения является сплошным и неоднородным. На рисунке 2 представлено типичное распределение излучаемой мощности  $A$  в спектре любого исследуемого сигнала. Очевидно, первоочередной задачей является выбор области спектра с максимальным поглощением ( $\lambda_{max}$ ). Затем энергия светового потока квантов преобразуется в фототок или фотоэдс (преобразование в аналоговой или цифровой сигнал) по законам внутреннего или внешнего фотоэффекта.

На рисунке 2 показано, что величина фототока насыщения сильно варьируется в зависимости от длины волны падающего светового потока. Эта зависимость определяется такими факторами, как  $\lambda_{max}$ , поглощательной способностью фильтра на выбранной длине волны и особенностями взаимодействия светового потока квантовой периодической структурой.

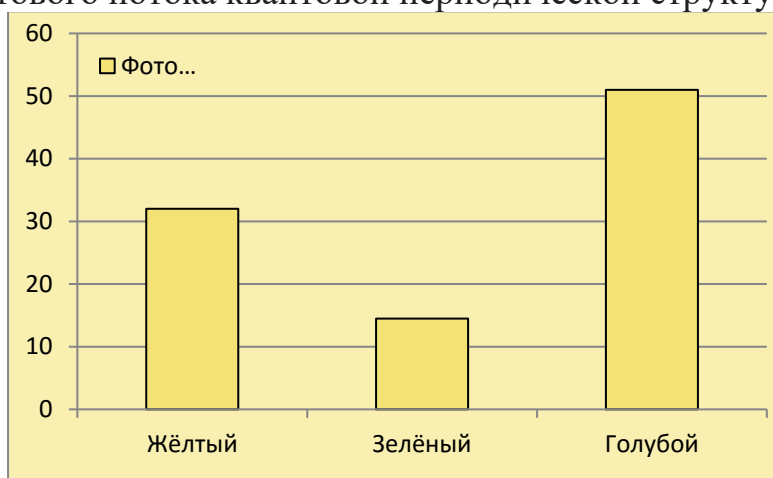


Рисунок 2 - Зависимость величины фототока от длины волны света

Технически в современных датчиках экспериментальные зависимости анализируются методом нелинейной регрессии. Уравнение нелинейной регрессии, так же как и в линейной зависимости, дополняется показателем корреляции полученной зависимости  $y=A(\lambda_{max})$ , с калибровочными зависимостями для известных цветов  $y_1=A_1(\lambda_{max})$ ;  $y_2=A_2(\lambda_{max})$ , а именно индексом корреляции  $R$ , так называемым

VCI (индексом визуальной корреляции)

$$R = \sqrt{1 - \frac{SS_{ост}}{SS_{общ}}} = \sqrt{1 - \frac{\sum(y_2 - y_1)^2}{\sum(y_1 - y)^2}},$$

где  $SS_{ост}$  – остаточная сумма квадратов отклонений, определяемая из уравнения регрессии;  $SS_{общ}$  – общая сумма квадратов отклонений результативного признака.

Величина данного показателя находится в границах  $[0;1]$ ; чем ближе к единице, тем теснее связь рассматриваемых признаков, тем более надежно найденное уравнение регрессии.

Ошибка  $S$  оценивается через средний квадрат отклонений или дисперсию на одну степень свободы  $S^2$ .

$$SS_{\text{ост}} = \frac{\sum(y_2 - y_1)^2}{df}; m = \sqrt{S_{\text{ост}}^2}.$$

Поэтому точность исследуемой зависимости  $A(\lambda_{\text{max}})$  является основой всех известных методов измерения и анализа цвета. В рамках такого подхода актуальной является задача исследований особенностей формирования отраженного от поверхности светового потока.

В заключении хотелось бы отметить, что отраженный поток несет в себе информацию о структуре поверхностного слоя, а следовательно о толщине и  $\lambda_{\text{max}}$  (цвете) лакокрасочного покрытия [5-8]. Поэтому мониторинг зависимости распределения мощности в спектре отраженного светового потока может лечь в основу фундаментальных подходов разработки инновационных технологий, определяющих структуру лакокрасочного покрытия на микро и наноуровне.

### Библиографический список

1. Юрьев Н.Ю., Аксенов А.А., Третьяков А.И. Перспективы применения неметаллических материалов для деталей кузова автомобиля // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 465-467.
2. Лисицын, В.И. Физические основы использования нанотехнологий в автотранспорте [Текст] / В.И. Лисицын, Н.С. Камалова // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : в 2 т. : сб. науч. трудов по материалам Международной науч.-практ. конф., Воронеж 20-21 марта 2014 г. / под общ. ред. А.И. Новикова ; ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2014. – Т. 2. – С. 332-335.
3. Патент на лакокрасочное покрытие 2312875 РФ, МПК C09D5/08, C09D5/10, C08K3/04, C08K7/04, C08K3/08. Многослойное антикоррозионное покрытие с углеродными нанотрубками [Текст] / С.С. Меркулов, А.Б. Новиков, Б.И. Ройтман. – № 2006109416/0 ; заявл. 24.03.2006 ; опубл. 20.12.2007.
4. Панкрашкин А. Определение и измерение цвета // Компоненты и технологии, 2007. №1. С.74-77.
5. Морозов В.В., Сысоев Э.П. Нанотехнологии в керамике: монография: в 2 ч. : Ч. 2 : Нанопленки, нанопокртия, наномембраны, нанотрубки, наностержни, нанопроволока / Владимир: Владимирский государственный университет (ВлГУ), 2011. – 166 с.
6. Новиков, Л.С. Перспективы применения наноматериалов в космической технике [Текст] : учеб. пособие / Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина. – М.: Университетская книга, 2008. – 188 с.
7. Литвинов В.Б., Кобец Л.П., Токсанбаев М.С., Деев И.С., Бучнев Л.М. Структурно-механические свойства высокопрочных углеродистых волокон // Композиты и наноструктуры. 2011. № 3. С. 36-50.
8. Крючков, В.А. Наномодифицирование углепластиков гранулированными многослойными углеродными нанотрубками [Текст] / В.А. Крючков, М.В. Крючков, Н.В. Выбороков, Я.М. Портнова, Л.А. Плясункова, Н.В. Бушанский, С.Н. Бушанский // Композиты и наноструктуры. 2015. Т. 7, № 3. С. 183-190.
9. Du, H. The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites / H. Du, J. Bai, Y.-M.J. Cheng // Express Polymer Letters. – 2007. – V. 1, № 5. – P. 253-273.
10. Драпалок М.В., Новиков А.И., Новикова Т.П. К вопросу публикационной активности в области нанотехнологий // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции; под общей редакцией А.И. Новикова. Воронеж, 2014. Т. 2. С. 295-298.
11. Новиков А.И., Кузьмин А.Г. Механические свойства УНТ как основа выбора сферы их рационального применения в автомобильном транспорте // Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. 2014. С. 87-88.
12. Соболев К.О., Новиков А.И. К вопросу применения квантовых компьютеров в автомобильном транспорте // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2014. № 1. С. 458-460.
13. Новиков А.И. Применение нанотехнологий в автомобильном транспорте. [Текст] : учебное пособие / А.И. Новиков ; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2016. – 156 с.