

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯНКИ КУПАЛЫ»

УДК 620.22:621.79.01:678.033:678.742

СОРОКИН
Валерий Геннадьевич

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ С КОМПОНЕНТАМИ,
МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НЕРАЗРУШАЮЩИМ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности
05.16.09 – материаловедение (химическая промышленность)

Минск 2017

Научная работа выполнена в УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».

Научный руководитель

Струк Василий Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЧ, профессор кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».

Официальные оппоненты:

Крутько Эльвира Тихоновна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Неверов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика и химия» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Оппонирующая организация

Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Защита состоится «23» июня 2017 г. в 11.00 ч на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, зал заседаний ученого совета, ауд. 240, корп. 4.
Тел.: 8-(017)-327-80-46, факс 8-(017)-327-62-17.
e-mail: zholnerovich@belstu.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «22» мая 2017 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

Н.В. Жолнерович

ВВЕДЕНИЕ

Функциональные материалы на основе полимерных матриц с заданными параметрами эксплуатационных характеристик относятся к числу перспективных направлений современного материаловедения. Композиты, содержащие функциональные компоненты различного состава, строения, дисперсности и технологии получения, позволяют создавать конструкционные, герметизирующие и триботехнические комплектующие металлополимерных статических (адгезионных, уплотнительных) и динамических (триботехнических) систем, параметры которых обеспечивают заданный эксплуатационный ресурс в соответствии с техническими требованиями без ремонта и обслуживания.

Параметры деформационно-прочностных, триботехнических и адгезионных характеристик композитов на основе полимерных, олигомерных и совмещённых матриц определяются, преимущественно, структурой межфазных слоёв, кинетика и механизм формирования которых зависят от энергетического состояния компонентов. Для активации компонентов в межфазных процессах используют различные методы технологического воздействия, обеспечивающие образование активных центров различного вида, способных к взаимодействию с образованием физических и химических связей. К числу перспективных технологий модифицирования компонентов относится воздействие лазерным излучением с заданными энергетическими параметрами, которое изменяет структуру, строение и энергетическое состояние поверхностных слоёв дисперсных частиц и субстратов. Как правило, используют лазерное излучение (ЛИ) большой энергии, которое определяет интенсивные процессы деструкции и сублимации полимерных полуфабрикатов, вследствие чего формируются условия для образования покрытий на твёрдых субстратах и высокодисперсных продуктов, которые используют по различному назначению. Воздействие низкоэнергетических (неразрушающих) потоков лазерного излучения на параметры структурных, деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик компонентов металлополимерных систем исследовано фрагментарно, что не позволяет разработать технологические рекомендации для применения этого эффективного метода модифицирования в материаловедении полимерных функциональных композитов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнена на кафедре материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» в рамках заданий государственных научных программ: А15-016 «Наноматериалы и нанотехнологии» (№ госрегистрации 200754, срок

исполнения 03.04.2006 – 31.12.2010), задание № 5.17 «Исследование влияния размера и формы наночастиц на их модифицирующие свойства при создании композитов на основе полимеров»; А16-06 «Кристалло-химические и молекулярные структуры» (№ госрегистрации 2007514, срок исполнения 03.04.2006 – 31.12.2010), задание «Изучение влияния дефектов и состава кристаллов на динамические процессы на ювенильных поверхностях»; задание МО РБ «Разработать технологию получения наномодификаторов природных силикатов, активированных в условиях высокоэнергетического воздействия» (№ госрегистрации 20091287, срок исполнения 01.01.2009 – 30.06.2010); задание 16.1 «Разработать и внедрить материалы и технологии для отечественных конструкций эндопротезов и одноразовых съёмных насадок для аппарата гидровакуумаспирации, используемых для интенсивного лечения отоларингологических заболеваний» ГНТП «Новые технологии диагностики и профилактики» (подпрограмма «Хирургия», № госрегистрации 20131778, срок исполнения 01.03.2013 – 31.12.2015); задание А14-14 «Структура и свойства композиционных электролитических покрытий на основе хрома, модифицированного ультрадисперсными частицами, полученными лазерной абляцией» (№ госрегистрации 20151191, срок исполнения 01.01.2014 – 31.12.2015) ГНТП «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», подпрограмма «Функциональные материалы».

Прикладные исследования по теме диссертационной работы проведены на ОАО «Белкард», ОАО «БелТАПАЗ», УП «Цветлит» и лечебных учреждениях Гродненского региона.

Цель и задачи исследования

Цель работы состояла в исследовании механизмов и кинетики изменения структуры, морфологии и энергетического состояния компонентов материалов и изделий при воздействии неразрушающего импульсного лазерного излучения различной интенсивности.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Исследовать особенности строения, морфологии и энергетического состояния компонентов материалов и изделий, подвергнутых воздействию импульсного неразрушающего лазерного излучения.
2. Разработать технологию модифицирования компонентов материалов на основе термопластичных матриц и изделий импульсным и импульсно-периодическим неразрушающим лазерным излучением с различной плотностью потока излучения и энергией отдельных импульсов.
3. Разработать составы композиционных материалов и конструкции изделий из них с модифицированными импульсным лазерным излучением компонентами для использования в герметизирующих и триботехнических системах.

4. Разработать нормативную техническую документацию, регламентирующую применение изделий, подвергнутых модифицированию неразрушающим импульсным лазерным излучением, в промышленности и лечебной практике.

Объект исследования – компоненты материалов на основе полимерных матриц и изделий.

Предмет исследования – механизмы формирования морфологии и энергетического состояния компонентов при воздействии импульсного лазерного излучения с различной плотностью потока излучения и энергией отдельных импульсов и их влияние на параметры характеристик функциональных материалов и металлополимерных систем.

Научная новизна

Научная новизна исследований состоит в установлении механизмов модифицирующего действия потоков импульсного лазерного излучения с плотностями потока излучения $10^3 \div 10^5$ Вт/см² и энергиями от 0,5 мДж до 50 Дж, обуславливающих формирование оптимальной морфологии и энергетического состояния поверхностных слоёв компонентов материалов и изделий на основе термопластичных матриц.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установленный механизм трансформирования молекулярной и надмолекулярной структуры поверхностных слоёв полимерных термопластичных компонентов, подвергнутых воздействию низкоэнергетических потоков лазерного излучения с плотностью потока излучения $0,5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Вт/см², обуславливающий формирование морфологии поверхностных слоёв с компонентами, находящимися в размерном диапазоне $10 \div 150$ нм, и электретного состояния, оцениваемого по величине термостимулированных токов в диапазоне значений $1,2 \div 20$ пА, вследствие протекания процессов структурного упорядочения и поглощения энергии.

2. Механизм диспергирования компонентов, подвергнутых воздействию низкоэнергетического лазерного излучения в жидкофазных средах с плотностью потока излучения $0,5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Вт/см² и энергией отдельного импульса $75 \div 500$ мДж, состоящий в преобладающем протекании процессов термической деградации и расслоения по плоскостям спайности с образованием фрагментов с размерным диапазоном $10 \div 150$ нм, находящихся в электретном состоянии с большим временем релаксации.

3. Составы и технологии композиционных материалов, содержащих компоненты, активированные низкоэнергетическим лазерным излучением с плотностью потока излучения $0,5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Вт/см² и энергией отдельного импульса $75 \div 500$ мДж, используемые для формирования деталей трения, триботехнических покрытий повышенной износостойкости, уплотнений и изделий, устойчивых к бактерицидному воздействию.

Новизна научных положений, выносимых на защиту, подтверждена 2 патентами Республики Беларусь на изобретение и одной заявкой на получение патента на изобретение.

Личный вклад соискателя учёной степени состоит в формировании цели и задач исследования, разработке методик лазерного модифицирования компонентов и изделий из функциональных материалов, творческом участии в разработке составов композиционных материалов и технологии изготовления изделий из них для применения на предприятиях химической промышленности и машиностроения, в запорной и регулирующей арматуре систем водо- и газоснабжения, а также в лечебных учреждениях. Соискатель осуществлял экспериментальные исследования, участвовал в обсуждении результатов, формировании основных выводов и положений, патентовании разработок и обсуждении результатов на конференциях и симпозиумах.

Апробирование разработанных материалов и изделий в виде уплотнительных элементов, покрытий и изделий отоларингологического назначения осуществлено соискателем совместно со специалистами ОАО «Белкард», УП «Цветлит», УО «Гродненский государственный медицинский университет» и с сотрудниками УМЦ «Промагромаш».

Апробация результатов диссертации и информация об использовании результатов

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на профильных научно-технических, научных конференциях, семинарах и симпозиумах, в т. ч. международных: International conference «Mechanika» (Kaunas, 2009 – 2016 гг.); 29 международной конференции и семинаре «Композиционные материалы в промышленности, «Трубопроводы из полимерных композиционных материалов: изготовление, проектирование, строительство, эксплуатация» (Ялта, 2009 г.); XVI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2009 г.); международной научно-технической конференции «Современные проблемы механики» (Ташкент, 2009 г.); III республиканской научно-методической конференции «Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии» (Брест, 2009 г.); международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (ПОЛИКОМТРИБ–2009) (Гомель, 2009 г.); республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 2009 – 2013 гг.); Десятой международной конференции «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях» (п. Славское, Карпаты, 2010 г.); VI международной конференции, посвящённой памяти академика Г.В. Курдюмова «Фазовые превращения и прочность кристаллов (Черноголовка, 2010 г.); V международной научной

конференции «Актуальные проблемы физики твёрдого тела» (Минск, 2011 г.); международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (ПОЛИКОМТРИБ–2011) (Гомель, 2011 г.); I и II республиканской научно-технической конференции «Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития» (Гродно, 2011, 2012 гг.); XIII международной конференции «Физика и технология тонких пленок для наносистем» (Ивано-Франковск, 2011 г.); международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении» (Андижан, 2012 г.); белорусско-китайском молодёжном инновационном форуме «Новые горизонты – 2015» (Минск, 2015 г.); International scientific conference dedicated to the 70th anniversary of prof. d. sc. Dimitar Stavrev (Varna, 2015 г.); международной научно-технической конференции «Intermatic–2015» (Москва, 2015 г.); XVI международной научной конференции «NDTCS–2015» (Гродно, 2015 г.); II International scientific congress «Innovations in Engineering 2016» (Varna, 2016 г.); международной научной конференции «Современные проблемы науки о полимерах» (Ташкент, 2016 г.).

На основании результатов научных исследований получен патент РБ на изобретение «Протез среднего уха» № 18564 от 30.08.2014 г., патент РБ на изобретение «Способ нанесения фторсодержащего покрытия на твёрдую подложку» № 17130 от 30.06.2013 г. Подана заявка на получение патента РБ на изобретение № а 20140381 «Одноразовая съёмная насадка для аппарата гидровакуумаспирации лакун нёбных миндалин» от 10.07.2014 г.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс на кафедре материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (акт о практическом использовании результатов исследования в учебном процессе от 01.12.2014 г., акт о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс от 30.01.2015 г.) и на кафедре оториноларингологии учреждения образования «Гродненский государственный медицинский университет» (акт о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс от 12.01.2015 г.). Выпущена опытная партия изделий для лечения оториноларингологических заболеваний.

Опубликование результатов диссертации

Результаты теоретических, экспериментальных и прикладных исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в 60 печатных работах (19,375 авт. лист.), в т.ч. 13 статьях, опубликованных в научных изданиях согласно п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в РБ, 6 статьях в научных изданиях (4 статьях, опубликованных в журналах РБ, 2 статьях, издающихся в РФ), 27 статьях, опубликованных в трудах научных конференций и симпозиумов, в том числе зарубежных, 11 тезисах докладов конференций, 2 патентах РБ на изобретение и 1 заявке на получение патента РБ на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Материалы работы изложены на 129 страницах машинописного текста, содержат 49 рисунков, 14 таблиц, 229 использованных литературных источников (19 стр.), 60 публикаций соискателя учёной степени (7 стр.) и 9 приложений (28 стр.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена анализу механизмов межфазных взаимодействий, протекающих в функциональных материалах на основе полимерных матриц при различных видах технологических воздействий – температуры, давления, механохимического воздействия. Показана превалирующая роль энергетического состояния компонентов и морфологии поверхностных слоёв частиц, которые определяют кинетику процессов формирования границ раздела в композитах. Проведен анализ технологий получения композитов с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик на основе высоковязких термопластов.

На основании аналитического обзора литературных, патентных и коммерческих источников сформулированы цель и задачи исследований и определены методологические принципы управления параметрами морфологии и энергетического состояния компонентов материалов и металлополимерных систем.

Во второй главе диссертационной работы обоснованы методики управления параметрами морфологических, деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик компонентов функциональных материалов и металлополимерных статических и динамических систем с использованием лазерного излучения с различной продолжительностью и энергией импульса.

В качестве матричных полимеров для получения композиционных материалов различного функционального назначения были выбраны многотоннажные термопласты класса полиолефинов (ПЭНД, ПЭВД, ПП), полиамидов (ПА6, ПА6.6), полиэфиров (ПЭТФ), фторопластов (ПТФЭ) в состоянии промышленной поставки в соответствии с технической нормативной документацией предприятий – производителей (ОАО «Полимир», ОАО «Гродно Азот», ОАО «Могилевхимволокно»).

Для модифицирования базовых матриц использовали дисперсные и волокнистые компоненты различного состава, строения и технологии получения: кремнийсодержащие частицы микрометровой размерности (глины, трепел, шунгит), углеродсодержащие продукты (графит, технический углерод), продукты детонационного синтеза (УДАГ, УДА), продукты термогазодинамического синтеза

ПТФЭ (УПТФЭ), фрагменты стеклянного (СВ) и углеродного (УВ) волокон (ОАО «СветлогорскХимволокно», ОАО «Полоцк–Стекловолокно»).

Модифицирующие компоненты различной дисперсности подвергали активации на воздухе и в жидкофазных средах при воздействии энергетических потоков: тепловых $673 \div 1373$ К и лазерного излучения с длиной волны $\lambda_o = 1,06$ мкм, $0,532$ мкм и $0,355$ мкм, энергией импульса $15 \div 120$ мДж и длительностью импульса $1,2 \cdot 10^{-3}$ с, $2 \cdot 10^{-3}$ с и $16 \cdot 10^{-9}$ с.

Для модифицирования компонентов материалов и металлополимерных систем использовали лазерные установки типа Квант-15, ГОР-100М и LOTIS LS - 2147. Физико-химические процессы в поверхностных слоях компонентов и на границе раздела «матрица-наполнитель», «покрытие-субстрат» оценивали с использованием методов ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (Дрон-2,0, Дрон-3,0), ДТА (Thermoscan-2) по общепринятым методикам. Морфологические параметры частиц и компонентов металлополимерных систем, подвергнутых энергетическому воздействию, исследовали с применением атомного силового (NT-206), растрового электронного (Mira, Tescan), оптического (MDS) микроскопов. Параметры энергетических характеристик частиц и субстратов исследовали методом спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ) на оригинальной установке ОДО «Микротестмашины» г. Гомель.

Стендовые и натурные испытания изделий различного назначения проводили с использованием оборудования ОАО «Белкард», УП «Цветлит», УО «Гродненский государственный медицинский университет», специализированных учреждений МЗ РБ.

Обработку результатов исследований осуществляли с применением современных программных продуктов «Statistica 13», «Microsoft Office 2010».

В третьей главе диссертационного исследования рассмотрены механизмы трансформирования структуры и морфологии компонентов материалов и металлополимерных систем, подвергнутых воздействию лазерного излучения различной интенсивности.

Анализ литературных источников, посвящённых материаловедению и технологии полимерных композитов и металлополимерных систем, выполненных научными школами академика НАН Беларуси Белого В.А., чл. – корр. НАН Беларуси Рогачёва А.В., проф. Пинчука Л.С., проф. Иванова А.Ю., академика РАН Бузника В.М., свидетельствует о превалировании двух видов энергетического воздействия, обеспечивающего активность в процессах межфазных взаимодействий, приводящих к образованию граничных слоёв оптимальной структуры, которые определяют параметры деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик – термического в диапазоне температур $373 \div 773$ К и лазерного в диапазоне энергий $0,6 \div 30$ Дж.

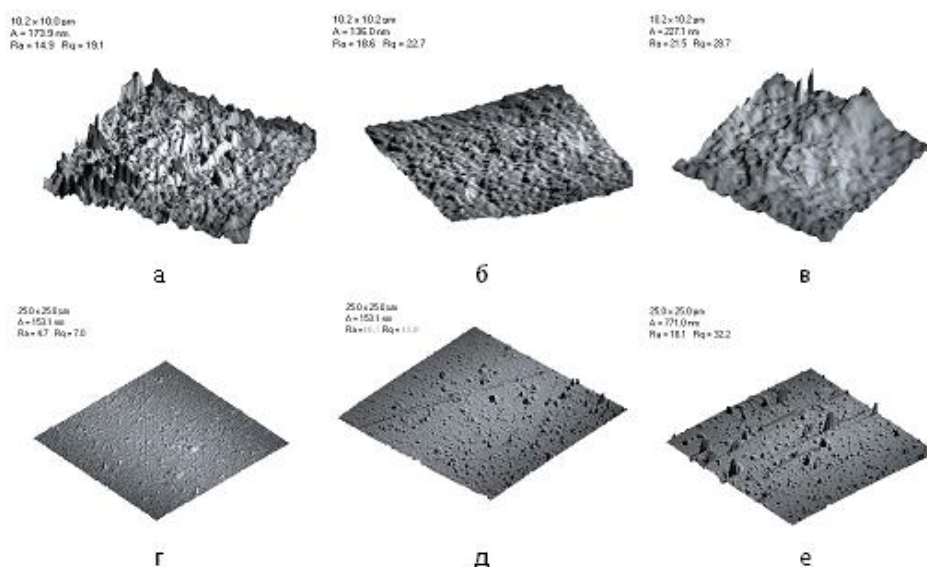
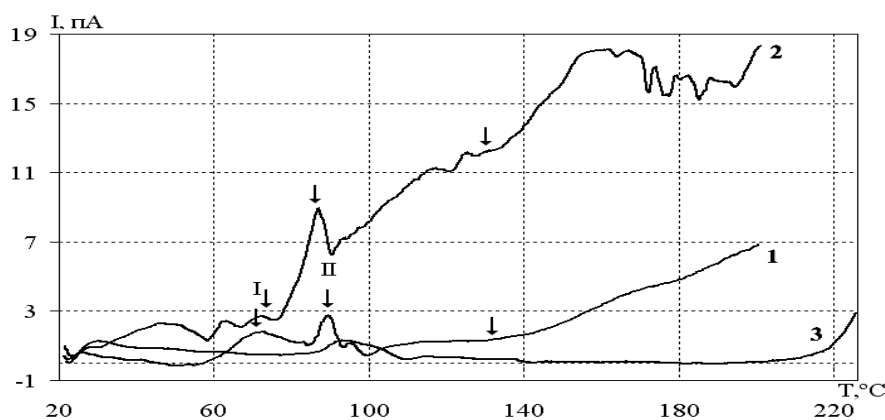


Рисунок 1. – Характерная морфология поверхности пленочного образца из полиэтилена высокого давления (ПЭВД) исходная (а) и после однократного воздействия излучения лазера ГОР-100М с энергией импульса свободной генерации 30 Дж (б) и 2 Дж (в)

чeskих волн, возникающих при взаимодействии импульсного ЛИ с полимерной матрицей. Проявление эффекта свелинга (swelling) и бампинга (bumping) зависит от энергии импульса и вида подложки. На диффузно рассеивающей подложке ЛИ с одной и той же энергией одного импульса вызывает существенно меньшее изменение параметров топографии поверхности, чем графитированной.



**1 – диффузно рассеивающая подложка,
2 – графитированная подложка,
3 – исходный образец**

Рисунок 2. – Зависимость величины термостимулированных токов I от температуры T в образце ПЭВД, подвергнутом однократной обработке излучением лазера «Квант-15» с энергией импульса $E \sim 0,6$ Дж

Воздействие излучения лазера ГОР-100М с энергией импульса свободной генерации $0,6 \div 30$ Дж приводит к образованию характерного рельефа поверхностного слоя, образованного нанокompонентами в размерном диапазоне $1 \div 100$ нм (рисунок 1).

Образование подобных компонентов обусловлено процессами перекристаллизации под действием акустических волн, возникающих при взаимодействии импульсного ЛИ с полимерной матрицей.

Комплексное воздействие ЛИ различной интенсивности приводит к изменению энергетического состояния поверхностного слоя и появлению электретов с большим временем релаксации, очевидно связанных с протеканием локальных процессов деструкции наиболее напряженных участков макромолекул с образованием различных продуктов, формированием ловушек носителей (рисунок 2).

Особый интерес представляет технология лазерного модифицирования для обработки дисперсных частиц, используемых в композиционном материаловедении для направленного регулирования параметров эксплуатационных характеристик изделий (σ_p , $\sigma_{сж}$, УУВ, $f_{тр}$, J). Комплексное действие ЛИ на частицы различных составов, строения и технологии получения обуславливает формирование развитой морфологии поверхностного слоя, активность которого в межфазных процессах взаимодействия увеличивается по сравнению с исходными частицами вследствие реализации механической составляющей адгезии и структурного упорядочения макромолекул связующего в граничных слоях.

Проведенные исследования морфологических особенностей и энергетического состояния частиц углерода и кремнийсодержащих соединений (графит, УДАГ, УВ, глина, трепел), нашедших наиболее широкое распространение в функциональном материаловедении, свидетельствуют (рисунок 3, 4) о возможности реализации феномена наносостояния, который приводит к синергическим эффектам.

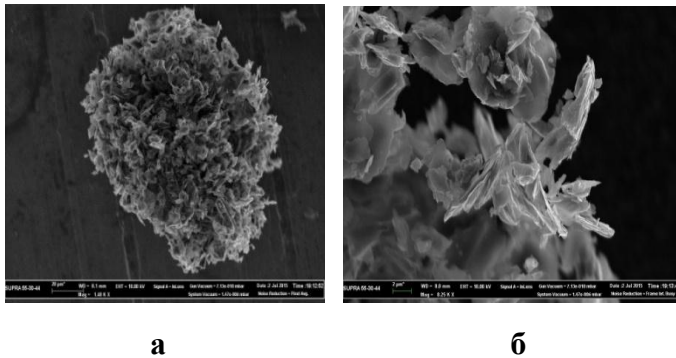


Рисунок 3. – Характерная морфология частицы графита марки С-1 исходной (а) и подвергнутой воздействию 5 импульсов ЛИ с энергией 140 мДж и длительностью 1÷2 мс (б)

механизма действия. Рассмотрены особенности действия импульсного лазерного излучения на структуру, морфологию и энергетическое состояние углеродных волокон УВ.

Установлен эффект диспергирования поверхностного слоя, обусловленный процессами абляции и термической деградации (рисунок 4). В результате действия ЛИ поверхностный слой УВ приобретает характерную морфологию (рисунок 4 г, д, е), сформированную сочетанием наноразмерных компонентов. Отмечены эффекты деградации фрагментов УВ с образованием сквозных трещин в теле волокна. Развитая морфология и наличие полостей способствуют увеличению механической составляющей адгезионного взаимодействия на границе раздела «матрица – УВ». Модифицированные импульсным ЛИ углеродные волокна приобретают повышенную склонность к процессам диспергирования при использовании механических измельчителей ножевого и ударного действия. Протекание

Частицы слоистых компонентов различного состава под действием высокоэнергетического потока ЛИ диспергируются вследствие разрушения по плоскостям спайности под действием термических напряжений, процессов дегидратации и дегидроксиляции (рисунок 3). Лазерное воздействие может быть осуществлено как в воздушной среде, так и жидкофазной среде, содержащей функциональные компоненты различного состава и

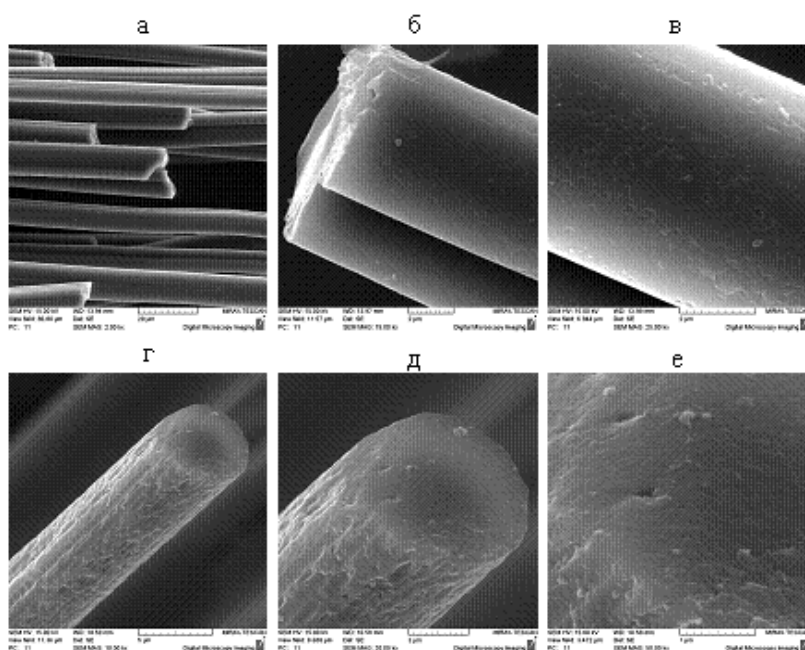


Рисунок 4. – Морфология фрагментов механической резки УВ исходных (а, б, в) и обработанных ЛИ (г, д, е) с длиной волны $\lambda_0=1,06$ мкм и энергией воздействующего импульса 530 мДж

но-прочностных и триботехнических характеристик.

Четвертая глава диссертации посвящена эффективным направлениям использования лазерного модифицирования при создании композиционных электролитических покрытий, композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и изделий, используемых при лечении и профилактике оториноларингологических заболеваний.

Для модифицирования матриц фторсодержащих полимеров (ПТФЭ), отличающихся отсутствием выраженного вязко-текучего состояния и инертностью в процессах межфазных взаимодействий, разработана технология получения дисперсных фрагментов УВ с повышенной адгезионной способностью. Сущность технологии состоит в обработке волокнистых полуфабрикатов (единичных волокон, жгутов или тканей) импульсным лазерным излучением с длиной волны 0,69 мкм и энергией импульса $500 \div 600$ кДж при плотности потока излучения $(0,25 \div 6) \cdot 10^3$ Вт/см². Модифицированные полуфабрикаты в виде мерных отрезков подвергали воздействию напряжения сжатия в замкнутом объеме формы в диапазоне значений $100 \div 300$ МПа. Полученные продукты диспергирования с оптимальными размерными параметрами использовали для модифицирования ПТФЭ в состоянии промышленной поставки (марки Ф4, Ф-4М) с использованием традиционного технологического оборудования – лопастных смесителей.

Анализ особенностей морфологии и фракционного состава свидетельствует о том, что лазерное модифицирование обеспечивает не только развитую морфоло-

процессов сублимации и термической деградации УВ способствует хемосорбционному взаимодействию функциональных модификаторов, предварительно нанесённых на волокнистый полуфабрикат. Фрагменты УВ, обработанные раствором фторсодержащих олигомеров («Фолеокс», «Эпилам»), после лазерного модифицирования импульсным излучением приобретают повышенную совместимость с матрицей политетрафторэтилена и могут быть использованы для получения композитов с повышенными параметрами деформационно-

гию поверхностного слоя, но и получение частиц с более стабильными размерными параметрами (рисунок 5).

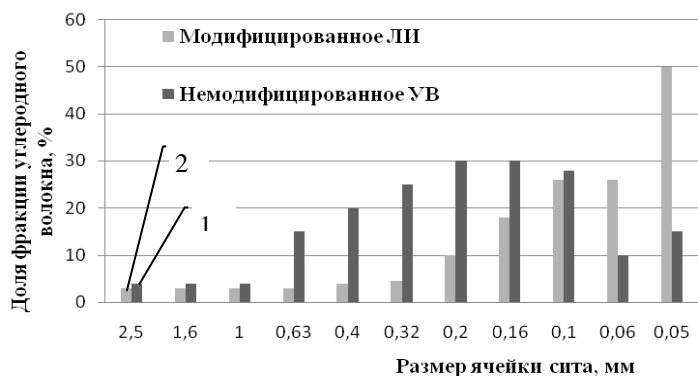


Рисунок 5. – Фракционный состав продуктов диспергирования углеродных волокон исходных (1) и модифицированных лазерным излучением (2)

затратами, потерей значительных количеств дисперсных продуктов, не улавливаемых фильтрами.

Использование диспергированного по разработанному процессу УВ в сочетании с технологией механохимического совмещения компонентов позволило повысить параметры деформационно-прочностных характеристик в $1,3 \div 1,5$ раза ($\sigma_p = 22,5$ МПа) и износостойкости в $1,1 \div 1,3$ раза ($J = 1,5 \cdot 10^{-7}$ мм³/нм) по сравнению с параметрами композитов аналогичного состава «Флубон» и «Флувис».

К числу распространённых методов повышения эксплуатационного ресурса трибосистем, эксплуатируемых в условиях действия абразивных и коррозионных сред, относится нанесение композиционных покрытий на рабочие поверхности электролитическим, плазменно-дуговым, вакуумным и др. методами.

Разработаны составы и технологии электролитических композиционных покрытий на основе хрома, модифицированного продуктами лазерного диспергирования полимерных и углеродных полуфабрикатов.

Лазерное воздействие на блочный полуфабрикат (ПТФЭ, ПЭТФ, ПА6, ПЭВД, электродный графит) в жидкофазной среде приводит к протеканию процессов абляции поверхностного слоя с образованием высокодисперсных продуктов (рисунок 6, а-г). При диспергировании в среде электролита формируется устойчивая суспензия, которая обеспечивает модифицирование матричного Cr и образование покрытия с характерной морфологией. Продукты диспергирования различных блоков, образованные по механизму абляции, имеют наноразмерный диапазон и активное состояние. Благодаря этому изменяется кинетика формирования покрытий на основе электролитического Cr и образуется композиционная структура с повышенной однородностью (рисунок 6, е, ж).

Технология лазерного модифицирования предпочтительнее технологии термоокислительной обработки, т.к. не только повышает диспергируемость, но и увеличивает совместимость компонентов, снижая дефектность заготовок. Необходимо подчеркнуть эффективность разработанного метода диспергирования УВ с применением деформаций сжатия по сравнению с дисмембраторным методом, который сопряжён со значительными энергетическими

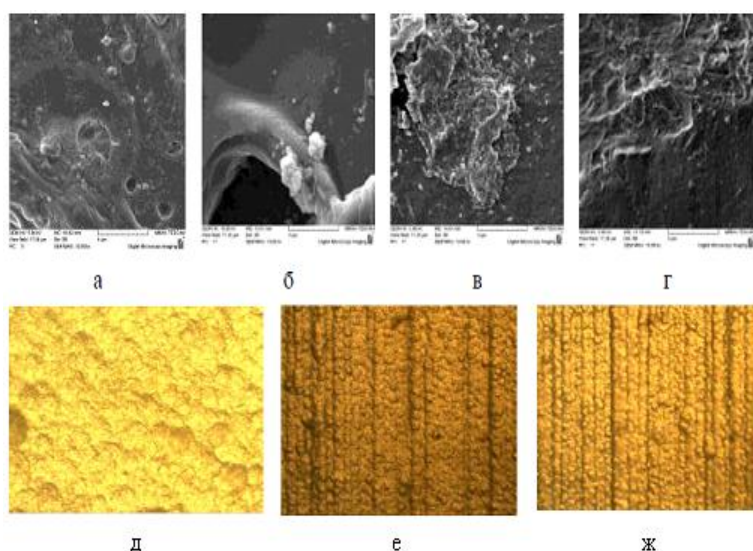


Рисунок 6. – Морфология частиц лазерного диспергирования (а, б, в, г) блоков ПЭТФ (а), ПА6 (б), ПЭНД (в), ПТФЭ (г) и покрытий на основе Cr (д, е, ж) исходного (д) и модифицированного 0,4 мас.% ПТФЭ(е) и 0,8 мас.% ПТФЭ (ж)

для восстановления клапанов тепловозных двигателей, эксплуатируемых на БелЖД.

Комплексное воздействие импульсного ЛИ на поверхностные слои изделий различного состава и функционального назначения приводит к изменению параметров энергетических характеристик, в т.ч. к возникновению электретного состояния с большим временем релаксации. На основе основных закономерностей формирования электретного состояния в субстратах на основе полимерных матриц и его использования в функциональных изделиях, которые разработаны научными школами проф. Пинчука Л.С., проф. Гольдаде В.А., проф. Кравцова В.Ю., разработана технология лазерного модифицирования изделий, используемых в оториноларингологии. Воздействие лазерного излучения с энергией импульса $(5 \div 10)$ Дж при плотности потока излучения $(5 \div 10) \cdot 10^3$ Вт/см² и числе импульсов $1 \div 5$ способствует формированию в поверхностном слое электрета силового поля, которое оказывает угнетающее действие на развитие патогенной среды. Модельные исследования кинетики развития колоний тестовых микроорганизмов (*B. subtilis* ATCC 6633, *S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922, *K. pneumoniae* ATCC PCM 64/ATCC 13882) однозначно свидетельствуют о проявлении модифицированными изделиями на основе ПП – эндопротезом слуховой цепи и съёмной насадкой для гидровакуумаспирации лакун нёбных миндалин – бактерицидного эффекта. Установленные закономерности позволили повысить качество стерилизационной обработки изделий, сохраняя бактерицидный эффект в течение длительного времени.

Нанокпозиционные покрытия на основе электролитического Cr, модифицированного $(0,4 \div 2)$ мас.% продуктов абляции в электролите, обладают повышенными параметрами триботехнических и защитных характеристик. В процессе изнашивания наноразмерные продукты абляции блочных полуфабрикатов из ПТФЭ, ПЭНД, ПЭТФ, ПА6, электродного графита выполняют функцию сухой смазки, снижают коэффициент трения при эксплуатации покрытия без подвода внешней смазки. Разработанные составы электролитических покрытий рекомендованы

На разработанные элементы, применяемые для лечения и профилактики оториноларингологических заболеваний, разработана нормативная документация (технические условия ТУ ВУ 500037559.002-2015, ТУ ВУ 500037559.003-2015), которые регламентируют их применение в лечебной практике. Получены регистрационные удостоверения № ИМ-7.103398 и № ИМ-7.103625 на эндопротез цепи слуховых косточек и одноразовую съёмную насадку для аппарата гидровакуумаспирации, которые регламентируют использование разработанных изделий в лечебных учреждениях РБ. Принято решение о создании инновационного производства изделий в структуре УО «ГрГУ имени Янки Купалы» с программой выпуска, обеспечивающей потребности РБ. Расчётный экономический эффект от применения комплекта съёмной насадки для аппарата гидровакуумаспирации составляет свыше 6 400,00 рублей на пациента, благодаря снижению вероятности рецидивов ангин и обострений хронических тонзиллитов.

В 2017 г. изготовлена опытная партия изделий в количестве 300 шт. для обеспечения потребности лечебных учреждений Гродненского региона в проведении расширенных клинических испытаний.

Технология модифицирования импульсным лазерным излучением эффективна при обработке фильтрующих и защитных элементов, используемых в производстве с повышенными требованиями к качеству производственной среды.

В приложении к диссертационной работе приведена документация, подтверждающая эффективность применения разработанных составов и технологий лазерного модифицирования компонентов материалов и металлополимерных систем (акты внедрения в учебный процесс, технические условия, расчёт экономического эффекта, регистрационные удостоверения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведены комплексные исследования закономерностей формирования структуры и морфологии поверхностных слоёв компонентов материалов на основе термопластичных и металлополимерных систем неразрушающим импульсным лазерным излучением. Определены направления применения компонентов и изделий, модифицированных импульсным лазерным излучением с различными параметрами, в материаловедении и технологии полимерных композитов на основе термопластичных матриц [1–60].

2. Исследованы закономерности трансформирования структуры и морфологии компонентов материалов на основе термопластичных матриц при модифицировании импульсным неразрушающим лазерным излучением с плотностью потока излучения $0,5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Вт/см² в воздушной среде. Установлены механизмы формирования развитой морфологии поверхностных слоёв, содержащей нанораз-

мерные компоненты в электретьном состоянии, обусловленные процессами надмолекулярного структурирования и локальной деструкции термопластичных субстратов, расположенных на отражающих и поглощающих подложках. Показана возможность управления параметрами деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик плёночных полуфабрикатов вследствие изменения параметров надмолекулярной структуры, морфологии и энергетического состояния поверхностного слоя [1–4].

3. Исследованы особенности состава, структуры и морфологии дисперсных продуктов, полученных лазерной абляцией полимерных (ПТФЭ, ПЭТФ, ПА6, ПЭНД) и углеродных (электродный графит) блочных полуфабрикатов при воздействии низкоэнергетического лазерного излучения в жидкофазных средах с плотностью потока излучения $0,5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Вт/см² и энергией отдельного импульса $75 \div 500$ мДж. Установлена возможность модифицирования поверхностных слоёв продуктов абляции функциональными компонентами благодаря их адсорбции на ювенильных поверхностях [6, 11, 12, 18].

4. Разработаны составы нанокпозиционных материалов на основе хрома и технология формирования электролитических покрытий с повышенными параметрами триботехнических и защитных характеристик, содержащие компоненты, активированные низкоэнергетическим лазерным излучением с плотностью потока излучения $0,5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Вт/см² и энергией отдельного импульса $75 \div 500$ мДж. Показано, что введение в состав хромового электролита $0,6 \div 2,3$ мас. % продуктов абляции полимерных и углеродных субстратов, оптимизирует структуру покрытия, морфологию поверхностного слоя и в $1,1 \div 1,3$ раза увеличивает его стойкость к коррозионно-механическому изнашиванию [5, 7, 8, 10, 13, 14, 34–38].

5. Разработана технология модифицирования углеродных наполнителей (углеродных волокон, графита коллоидного и электротехнического, продуктов детонационного синтеза УДАГ), используемых для получения композиционных материалов на основе термопластов, импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda_0 = 1,06$ мкм, плотностью потока излучения $0,3 \cdot 10^5$ Вт/см², энергией единичного импульса $500 \div 600$ мДж и числе импульсов $1 \div 10$. Установлен эффект формирования развитой морфологии поверхностного слоя дисперсных частиц и волокон, обусловленный преимущественным протеканием процессов абляции и термической деградации, и обеспечивающий повышение интенсивности адгезионного взаимодействия на границе раздела «матрица-наполнитель» и параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов на основе термопластичных матриц (ПТФЭ, ПА6, ПА6.6). [9, 10, 14–17, 19].

6. Разработаны составы и технология композиционных материалов на основе политетрафторэтилена с параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, в $1,1 \div 1,5$ раза превышающих параметры промышленно выпускаемых аналогов «Флубон», «Флувис» при содержании напол-

нителя 20 ÷ 30 мас. %. Показано, что использование в качестве функционального наполнителя фрагментов углеродного волокна (УВ) оптимального фракционного состава 90 ÷ 100 мкм, полученного механическим деформированием при давлениях $\sigma_{сж} = 80 \div 100$ МПа волокнистых полуфабрикатов, модифицированных импульсным лазерным излучением с плотностью потока излучения $0,3 \cdot 10^5$ Вт/см², энергией единичного импульса 500 ÷ 600 мДж, снижает дефектность композита, увеличивает совместимость матричного связующего и УВ и увеличивает параметры их эксплуатационных характеристик [9, 10, 13–16, 19].

7. Исследованы параметры бактерицидных характеристик полимерных субстратов, модифицированных импульсным неразрушающим лазерным излучением с мощностью единичного импульса (5 ÷ 10) Дж. Установлен эффект ингибирования скорости роста патогенных сред вида *B. subtilis* ATCC 6633, *S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922, *K. pneumoniae* ATCC РСМ 64/ATCC 13882 вследствие действия энергетического поля поверхностного слоя, сформированного электретным зарядом, оцениваемый по величине термостимулированного тока $J_{тст} = (1,5 \div 19)$ пА. Показана целесообразность использования лазерного модифицирования изделий из термопластичных материалов, предназначенных для применения в лечебной практике отоларингологических заболеваний и очистки жидкофазных и газообразных технологических сред [11, 38]

Результаты научных исследований использованы в материалах двух патентов РБ на изобретение, заявки на получение патента РБ на изобретение [58–60] и технической документации на изделия «Унислух» и «Лорвак» .

Рекомендации по практическому использованию результатов.

Дисперсные частицы с повышенной модифицирующей способностью вследствие развитой морфологии поверхностного слоя и электретного состояния, полученные воздействием импульсного лазерного излучения на дисперсные, волокнистые и блочные полуфабрикаты: полимерные (ПТФЭ, ПА6, ПЭТФ, ПП, ПЭНД), углеродные (УВ, графит), силикатные (глины, шунгит, трепел), эффективны для применения в составах композиционных материалов на основе термопластичных и металлических матриц.

Композиционные покрытия на основе электролитического хрома, модифицированного продуктами лазерной абляции блочных полуфабрикатов (ПТФЭ, ПА6, ПЭНД, ПЭТФ) в среде электролита при воздействии лазерного излучения с длиной волны $\lambda_0 = 532$ нм, с длительностью импульса $\tau = 16$ нс и энергией импульса 450 мДж при плотности потока излучения $6 \cdot 10^5$ Вт/см², целесообразно использовать в тяжело нагруженных узлах, подвергаемых интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию.

Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена, содержащие 20 ÷ 30 мас. % углеродного волокна, полученного диспергированием полу-

фабрикатов, подвергнутых лазерному воздействию, эффективны при изготовлении герметизирующих и триботехнических элементов, применяемых в запорной арматуре предприятий теплоэнергетики и в компрессорной технике для получения сжатых и сжиженных газов (ОАО «Гродно Азот»).

Уплотнительные элементы с поверхностью трения, модифицированной лазерным неразрушающим импульсным воздействием с энергией импульса 150 мДж при плотности потока излучения $6 \cdot 10^4$ Вт/см², увеличивают ресурс и температурный диапазон эксплуатации запорной и регулирующей арматуры для газопроводов с давлением рабочей среды до 14 атм (УП «Цветлит»).

Конструкции эндопротезов цепи слуховых косточек и съёмной насадка для аппарата гидровакуумаспирации с повышенной бактерицидной устойчивостью рекомендованы для применения в лечебной практике учреждений Минздрава РБ. Разработаны нормативные документы (ТУ ВУ 500037559.002-2015, ТУ ВУ 500037559.003-2015), регламентирующие их применение в оториноларингологии, и получены регистрационные удостоверения (№ ИМ-7.103398 и № ИМ-7.103625), разрешающие промышленное изготовление изделий и практическое использование их в лечебных учреждениях РБ. Расчётный экономический эффект от применения одного комплекта одноразовой съёмной насадки составляет свыше 6 400,00 рублей. Выпущена опытная партия насадок 300 шт.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯСтатьи

1. Рыскулов, А. А. К механизму диспергирования политетрафторэтилена энергетическими потоками / А. А. Рыскулов, В. Г. Сорокин, В. А. Струк // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і ўпраўленне. Біялогія. – 2009. – № 3 (87). – С. 80–85.
2. Сорокин, В. Г. Влияние лазерного излучения на структурные параметры полимерных материалов / В. Г. Сорокин, Е. И. Эйсымонт // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і ўпраўленне. Біялогія. – 2009. – № 2 (82). – С. 109–116.
3. Механизмы диспергирования полимерных полуфабрикатов под действием высокоэнергетических потоков / В. Г. Сорокин [и др.] // Инженерный вестник. – 2009. – № 2 (28). – С. 112–117.
4. Сорокин, В. Г. Трансформирование структуры поверхностных слоев полимерных полуфабрикатов под действием высокоэнергетических потоков / В. Г. Сорокин, Е. И. Эйсымонт, В. А. Струк // Инженерный вестник. – 2009. – № 2 (28). – С. 118–125.
5. Оценка размерных неоднородностей наноразмерных модификаторов / В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Сер. 6, Тэхніка. – 2011. – № 1 (116). – С. 13–18.
6. Технология модифицирования поверхностей трения деталей металлополимерных систем с применением высокоэнергетических воздействий / В. Г. Сорокин [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Сер. 6, Тэхніка. – 2011. – № 1 (116). – С. 19–24.
7. Лиопо, В. А. Анизотропия наночастиц / В. А. Лиопо, В. А. Струк, В. Г. Сорокин // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Сер. 6, Тэхніка. – 2012. – № 2 (133). – С. 24–28.
8. Особенности процесса кристаллизации расплавов металлов / С.Л. Гей, В. Г. Сорокин [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы, Сер. 6, Тэхніка. – 2012. – № 2 (133). – С. 36–43.
9. Струк, В. А. Структура нанокпозиционных фторматериалов, технологии их получения / В. А. Струк, В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин // Информация и инновации. – 2013. – № 1–2. – С. 119–128.
10. Наночастицы, как модификаторы композиционных материалов / В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин [и др.] // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 4, Фізіка. Матэматыка. – 2014. – № 2 – С. 13–21.

11. Принципы формирования оптимальной структуры полимерных композитов для эндопротезирования в оториноларингологии / В. А. Новоселецкий, В. Г. Сорокин [и др.] // Оториноларингология. Восточная Европа. – 2014. – № 2 (15). – С. 88–98.

12. Структурно-морфологические факторы совершенствования технологической парадигмы фторкомпозитов / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 2. – С. 81–95.

13. Structural principles of formation highly durable tribotechnical materials based on polytetrafluoroethylene / S. Avdeychik, V. Sarokin [et al.] // Materials Science. – 2015. – Is. 1. – P. 25–31.

14. Laser technology in materials science nanocomposite materials based on thermoplastics / V. Sarokin [et al.] // Materials Science. – 2015. – Is. 1. – P. 51–54.

15. Композиционные материалы на основе термопластичных матриц и модифицированных короткоимпульсным лазерным излучением компонентов / В. Г. Сорокин [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 86–95.

16. Energy technology activation components functional materials based on polymeric matrix / V. Sarokin [et al.] // Machines. Technologies. Materials. – 2016. – Is. 7. – P. 51–52.

17. Technology laser modification in material science nanocomposites for Metal-Polymeric systems / V. Sarokin [et al.] // Materials Science. – 2016. – Is. 3. – P. 8–9.

18. Особенности реализации наноразмерности в композитах на основе полимерной матрицы / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин [и др.] // Наноматериалы и наноструктуры. – 2016. – № 2, т. 7. – С. 37–44.

19. Методология выбора функциональных модификаторов для композитов на основе высокомолекулярных матриц / С.В. Авдейчик, В. Г. Сорокин [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017 – № 1. – С. 76–95.

Материалы научных конференций

20. Nanocomposite functional material on base thermoplastic matrixes / A. Antonov, V. Sarokin [et al.] // *Mechanika–2009 : proceedings of the 14th International conference, Kaunas, 2–3 April 2009 / KUT. – Kaunas, 2009. – P. 19–22.*

21. Механизмы диспергирования политетрафторэтилена высокоэнергетическими потоками / А. А. Рыскулов, В. Г. Сорокин [др.] // Композиционные материалы в промышленности : материалы 29 междунар. конф., Ялта, 1–5 июня 2009 г. / УИЦ «Наука. Техника. Технология» ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2009. – С. 430–434.

22. Модифицирование полимерных изделий короткоимпульсным излучением / В. Г. Сорокин [и др.] // Композиционные материалы в промышленности : ма-

териалы 29 междунар. конф., Ялта, 1–5 июня 2009 г. / УИЦ «Наука. Техника. Технология»; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2009. – С. 434–441.

23. Механизмы диспергирования полимеров лазерным излучением / А. А. Рыскулов, В. Г. Сорокин [и др.] // Современные проблемы механики : материалы междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 23–24 сент. 2009 г. / ТАДИ. – Ташкент, 2009. – С. 260–265.

24. Лазерные технологии модифицирования компонентов трибосистем / В. К. Пестис, В. Г. Сорокин [и др.] // Современные проблемы механики : материалы междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 23–24 сент. 2009 г. / ТАДИ. – Ташкент, 2009. – С. 222–227.

25. Структура поверхностных слоев полимерных полуфабрикатов, подвергнутых лазерному модифицированию / В. Г. Сорокин [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XVI междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 14–19 сент. 2009 г. : в 4 т. / ДонНТУ ; редкол.: А. Н. Михайлов [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – Т. 3. – С. 129–138.

26. Получение низкоразмерных полимерных частиц высокоэнергетическим диспергированием / А. А. Рыскулов, В. Г. Сорокин [и др.] // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XVI междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 14–19 сент. 2009 г. : в 4 т. / ДонНТУ ; редкол.: А. Н. Михайлов [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – Т. 3. – С. 89–98.

27. Анизотропия температуры Дебая / В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин [и др.] // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии : сб. материалов III респ. науч.-метод. конф., Брест, 22–23 окт. 2009 г. / БрГУ. – Брест : БрГУ, 2009. – С. 68–71.

28. Влияние технологии диспергирования на структурные характеристики и физические свойства дисперсных частиц слюды / В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин [и др.] // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 10 междунар. конф., Славское, 18–22 февр. 2010 г. / УИЦ «Наука. Техника. Технология» ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2010. – Р. 384–387.

29. Structure and Technology of Engineering Nanocomposite Fluorinated Materials / A. N. Antanovich, V. G. Sarokin [et al.] // *Mechanika–2010 : proceedings of the 15th International conference*, Kaunas, 8–9 April 2010 / KUT. – Kaunas, 2010. – С. 19–24.

30. Hierarchy levels of real objects nanostate: physical models in the analysis methodology / V. A. Liopo, V. G. Sarokin [et al.] / Физика и технология тонких пленок для наносистем : Материалы XIII Международной конференции 16-11 мая 2011г. / Ивано-Франковск: Издательство Прикарпатского национального универ-

ситета имени Василия Стефанника, 2011. – С. 204–205.

31. Влияние лазерного излучения на адсорбционные свойства полимерных материалов / Е. В. Новгородская, В. Г. Сорокин [и др.] // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 19–20 мая 2011 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно : ГрГУ, 2011. – С. 317–325.

32. Методы модифицирования деталей триботехнических систем с применением высокоэнергетических воздействий / В. Г. Сорокин [и др.] // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 19–20 мая 2011 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно: ГрГУ, 2011. – С. 67–76.

33. Влияние размерных неоднородностей на параметры физических свойств их смесей / В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин [и др.] // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 19–20 мая 2011 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно : ГрГУ, 2011. – С. 148–156.

34. Конструкционные материалы на основе модифицированных полиамидов для узлов автотракторных агрегатов / Ж. С. Авлиекулов, В. Г. Сорокин [и др.] // Современные материалы, техника и технологии в машиностроении : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Андижан, 19–20 апр. 2012 г. / АМИ. – Андижан, 2012. – С. 327–332.

35. Рассеяние рентгеновских лучей на дефектных структурах / С. Л. Гей, В. Г. Сорокин [и др.] // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы II Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 17–18 мая 2012 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2012. – С. 55–57.

36. Атомно-кластерная модель структуры расплавов металлов / В. А. Лиопо, В. Г. Сорокин [и др.] // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы II Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 17–18 мая 2012 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2012. – С. 68–75.

37. Сорокин, В. Г. Влияние размерных параметров, особенностей кристаллохимического строения и энергетического состояния наноразмерных частиц на структуру и служебные характеристики полимерных матриц / В. Г. Сорокин, Л. В. Михайлова // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы II Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 17–18 мая 2012 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2012. – С. 89–92.

38. Сорокин, В. Г. Рентгенографические исследования действия лазерного излучения на структуру полимеров / В. Г. Сорокин // Физика конденсированного состояния : материалы XXI международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18 – 19 апреля 2013 г. / ГрГУ

им. Я.Купалы [и др.] ; редкол.: Г. А. Хацкевич (гл. ред.) [и др.] // – Гродно : ГрГУ, 2013. – С.135–137.

39. Implementation of the principle of multi-level modification Technology of highly filled fluoride composites / S. Avdeychik, V.Sarokin [et al.] // *Mechanika–2015 : proceedings of the 20th International conference*, Kaunas, 23–24 April 2015 / KUT. – Kaunas, 2015. – P. 28–35.

40. Energy-saving technology obtaining of mechanical engineering fluorine composites / S. Avdeychik, V. Sarokin [et al.] // *Mechanika–2015 : proceedings of the 20th International conference*, Kaunas, 23–24 April 2015 / KUT. – Kaunas, 2015. – P. 36–41.

41. Laser technology in materials metal-polymer systems / V. Sarokin, S. Avdeychik, V. Struk, Y. Auchynnika // *Mechanika–2015 : proceedings of the 20th International conference*, Kaunas, 23–24 April 2015 / KUT. – Kaunas, 2015. – P. 224–229.

42. Энергетический фактор оценки активности модифицирующего действия дисперсных частиц при создании композитов на основе термопластов / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин [и др.] // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Intermatic-2015*, Москва, 1–5 дек. 2015 г. под ред. академика РАН А. С. Сигова. / МИРЭА ; – М., 2015. – Ч. 2. – С. 115–118.

43. Физические критерии наноразмерности дисперсных модификаторов / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин [и др.] // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Intermatic-2015*, Москва, 1–5 дек. 2015 г. / МИРЭА под ред. академика РАН А. С. Сигова.; – М., 2015. – Ч. 2. – С. 129–132.

44. Методологические подходы к оптимальному выбору дисперсных модификаторов высокомолекулярных матриц / А. С. Антонов, В. Г. Сорокин [и др.] // *Новые горизонты – 2015 : сб. материалов белорусско-китайского молодёжного инновационного форума*, Минск, 26–27 нояб. 2015 г. / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 180–182.

45. Formation thin-film coatings for little wears Metal-Polymer Systems / A. Antonov V. Sarokin [et al.] // *Mechanika-2016 : proceedings of the 21th International conference*, Kaunas, 12–13 May 2016 / KUT. – Kaunas, 2016. – P. 9–11.

46. Activation of components functional polymer materials according to energy technologies / V. Sarokin [et al.] // *Mechanika-2016 : proceedings of the 21th International conference*, Kaunas, 12–13 May 2016 / KUT. – Kaunas, 2016. – P. 241–244.

Тезисы докладов

47. Сорокин, В. Г. Высокоэнергетические технологии модифицирования изделий из полимерных материалов / В. Г. Сорокин // ФКС : тез. докл. XVII респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16–17 апр. 2009 г. / ГрГУ, 2009 – С. 218–219.

48. Сорокин, В. Г. Лазерные технологии модифицирования деталей металлополимерных трибосистем / В. Г. Сорокин, Е. И. Эйсымонт, А. М. Бандысик // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2009) : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–25 июня 2009 г. / ИММС НАН Б. – Гомель, 2009. – С. 213.

49. Лазерные технологии модифицирования деталей трибосистем автотракторной и специальной техники / В. Г. Сорокин [и др.] // Фазовые превращения и прочность кристаллов : сб. тез. шестой междунар. конф., посвященной памяти академика Г. В. Курдюмова, Черногловка, 16–19 нояб. 2010 г. / ГНЦ «ЦНИИЧермет им. Бардина». – Черногловка, 2010. – С. 189–190.

50. Сорокин, В. Г. Изменение структурных параметров плёночных полуфабрикатов при лазерной обработке / В. Г. Сорокин // Материалы XIX республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19–20 апреля 2011 г. / – Гродно: ФКС ГрГУ, 2011. – С. 343–346.

51. Сорокин, В. Г. Методика оценки размерных параметров наночастиц в дисперсных смесях / В. Г. Сорокин, С. Л. Гей, В. А. Лиопо // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2011) : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 27–30 июня 2011 г. / ИММС НАН Б. – Гомель, 2011. – С. 238.

52. Оценка размерных параметров наночастиц в дисперсных смесях / В. Г. Сорокин [и др.] // Тезисы докладов V международной научной конференции "Актуальные проблемы физики твердого тела – 2011, Минск, 18 – 21 октября 2011 г. / – Минск. – 2011. – С. 228–229.

53. Сорокин, В. Г. Влияние размерных неоднородностей частиц наномодификаторов на свойства полимерных композитов / В. Г. Сорокин // Сборник научных статей XX республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19-20 апреля 2012 г. / – Гродно: ФКС ГрГУ, 2012, ч.2. – С. 136–138.

54. Sarokin, V. Mechanisms of laser modification in the technology nanocomposites and Metal-Polymer Systems / V. Sarokin, S. Avdeychik, V. Struk // NDTCS' 2015 : тез. докл. XVI междунар. науч. конф., Гродно, 22–25 сентября 2015 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2015. – С. 38–41.

55. Structural principles of creating highly filled fluorine composites / V. Sarokin [et al.] // NDTCS' 2015 : тез. докл. XVI междунар. науч. конф., Гродно, 22–25 сент. 2015 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2015. – С. 139–142.

56. Технология фторкомпозитов для изделий повышенного ресурса / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин [и др.] // Современные проблемы науки о полимерах : сборник тезисов докладов Международной конференции, Ташкент, 14 ноября 2016 г. / Научно-исследовательский Центр химии и физики полимеров при Национальном университете Узбекистана. – Ташкент, 2016. – С. 170–173.

57. Энергетический фактор материаловедения и технологии полимерных нанокompозитов / В. Г. Сорокин [и др.] // Современные проблемы науки о полимерах : сборник тезисов докладов Международной конференции, Ташкент, 14 ноября 2016 г. / Научно-исследовательский Центр химии и физики полимеров при Национальном университете Узбекистана. – Ташкент, 2016. – С. 173–175.

Патенты и заявки на получение патентов

58. Протез среднего уха : пат. ВУ 18564 / О. Г. Хоров, В. А. Струк, В. А. Новоселецкий, В. Г. Сорокин. – Оpubл. 30.10.2012.

59. Способ нанесения фторсодержащего покрытия на твердую подложку : пат. ВУ 17130 / В. Г. Сорокин, А. С. Балыкин, В. А. Струк, Е. В. Овчинников, Д. А. Прушак, С. В. Авдейчик. – Оpubл. 03.06.2013

60. Одноразовая съемная насадка для аппарата гидровакуумаспирации лакун небных миндалин : заявка ВУ 20140381 / О. Г. Хоров, В. А. Струк, В. В. Зинчук, И. Ч. Алешик, В. А. Новоселецкий, В. Г. Сорокин, С. В. Авдейчик, С. В. Белецкий. – Оpubл. 28.02.2016.

Функцыянальныя матэрыялы і вырабы з кампанентамі, мадыфікаванымі
неразбураючым лазерным выпраменьваннем

Ключавыя словы: *функцыянальны матэрыял, лазернае ўздзеянне, імпульснае
выпраменьванне, энергетычны стан, марфалогія, паверхневы слой*

Мэта работы: даследаванне механізмаў і кінетыкі змянення структуры,
марфалогіі і энергетычнага стану кампанентаў матэрыялаў і вырабаў пры ўздзеянні
неразбураючага лазернага выпраменьвання рознай інтэнсіўнасці.

Метады даследавання: ІЧ-спектраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, атамная
сілавая, растрвая электронная і аптычная мікраскапія, ТСТ-аналіз, метады
даследавання дэфармацыйна-трываласных, адгезійных, трыбатэхнічных,
бактэрыцыдных характарыстык.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Даследаваны асаблівасці структуры,
энергетычнага стану і марфалогіі кампанентаў матэрыялаў і вырабаў, падвергнутых
ўздзеянню неразбураючага лазернага выпраменьвання рознай інтэнсіўнасці і
працягласці. Устаноўлена, што пры нізкаэнергетычным лазерным уздзеянні
пераважным механізмам фарміравання марфалогіі паверхневага слою з
нанакампанентамі і павышанай энергетычнай актыўнасцю з'яўляецца
трансфармаванне надмалекулярнай пабудовы і лакальная дэструкцыя. Для
высокаэнергетычнага лазернага выпраменьвання ў большай ступені працяўляюцца
працэсы абляцці і тэрмічнай дэградацыі.

Распрацаваны саставы і тэхналогія кампазіцыйных матэрыялаў на аснове
політетрафторэтылену і пакрыццяў на аснове хрому, мадыфікаваных кампанентамі,
падвергнутымі ўздзеянню неразбураючага лазернага выпраменьвання.

На распрацаваныя вырабы медыцынскага прызначэння, якія прымяняюцца для
лячэння і прафілактыкі отарыналарынгалагічных захворванняў, распрацавана
нарматыўная дакументацыя. Разліковы эканамічны эфект ад прымянення камплектаў
здымнай асадкі для апарата гідравакуумаспірацыі складае звыш 6 400,00 рублёў на
пацыента. Выраблена доследная партыя вырабаў у колькасці 300 шт.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласці ўжывання: Распрацаваныя
матэрыялы эфектыўны для вырабу герметызуючых і трыбатэхнічных вырабаў, што
прымяняюцца ў канструкцыях запорнай і рэгулюючай арматуры і тэхналагічным
абсталяванні хімічных і машынабудаўнічых прадпрыемстваў (УП «Цветліт», ААТ
«Гродна Азот», ЗАТ «СПР с ВВ»). Канструкцыі эндапратэзаў ланцугу слыхавых
костачак і аднаразовай здымнай насадкі для апарата гідравакуумаспірацыі са
стэрылізацыйнай лазернай апрацоўкай рэкамендаваны Міністэрствам аховы здароўя
РБ для прымянення ў лячэбнай практыцы.

Функциональные материалы и изделия с компонентами, модифицированными
неразрушающим лазерным излучением

Ключевые слова: *функциональный материал, лазерное воздействие, импульсное излучение, энергетическое состояние, морфология, поверхностный слой*

Цель работы: исследование механизмов и кинетики изменения структуры, морфологии и энергетического состояния компонентов материалов и изделий при воздействии неразрушающего импульсного лазерного излучения различной интенсивности.

Методы исследования: ИК-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, атомная силовая, растровая электронная и оптическая микроскопии, ТСТ-анализ, методы исследования параметров деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических, бактерицидных характеристик.

Полученные результаты и их новизна: Исследованы особенности структуры, энергетического состояния и морфологии компонентов материалов и изделий, подвергнутых воздействию импульсного лазерного излучения различной интенсивности и продолжительности. Установлено, что при низкоэнергетическом лазерном воздействии преимущественным механизмом формирования морфологии поверхностного слоя с нанокompонентами и повышенной энергетической активностью является трансформирование надмолекулярной структуры и локальная деструкция. Для высокоэнергетического лазерного импульса в большей степени проявляются процессы абляции и термической деградации.

Разработаны составы и технология композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и покрытий на основе хрома, модифицированных компонентами, подвергнутыми воздействию импульсного лазерного излучения.

На разработанные изделия медицинского назначения, применяемые для лечения и профилактики оториноларингологических заболеваний, разработана нормативная документация. Расчётный экономический эффект от применения комплекта съёмной насадки для аппарата гидровакуумаспирации составляет свыше 6 400,00 рублей на пациента. Изготовлена опытная партия изделий в количестве 400 шт.

Рекомендации по использованию и области применения: Разработанные материалы эффективны для изготовления герметизирующих и триботехнических изделий, применяемых в конструкциях запорной и регулирующей арматуры и технологическом оборудовании химических и машиностроительных производств (УП «Цветлит», ОАО «Гродно Азот», ЗАО «СИПР с ОП»). Конструкции эндопротезов цепи слуховых косточек и одноразовой съёмной насадки для аппарата гидровакуумаспирации со стерилизационной лазерной обработкой, рекомендованы Минздравом РБ для применения в лечебной практике.

SUMMARY

Sarokin Valery Gennadevich

Functional materials and products with components modified by non-destructive laser radiation

Keywords: *functional materials, laser treatment, impulse radiation energy state, morphology, surface layer*

The aim of work: research of the mechanisms and kinetics of structural changes, morphology and energy state of the components of materials and articles under the action of non-destructive pulsed laser radiation of varying intensity..

Methods of investigation: IR spectroscopy, X-ray diffraction, atomic force, scanning electron and optical microscopy, TST-analysis, research methods of strength, adhesion, tribological, bactericidal properties.

The results and their novelty: The features of the structure, the energy state and morphology of components materials and products to non-destructive pulsed laser beam of varying intensity and duration were investigated. It was found that the low-energy laser irradiation predominant mechanism of formation of the morphology of the surface layer with nano-components and increased energy activity is the transformation of the supramolecular structure and local degradation of macromolecules. For high-energy laser pulse are more affected processes thermal degradation and ablation.

The compositions and technology of composite materials based on PTFE and coatings based on chromium modified components exposed to non-destructive pulsed laser radiation were worked out.

The normative documentation was developed for the designed medical products to treat and prevent of otorhinolaryngological diseases. The estimated economic effect of using a set of detachable nozzles for the hydro-vacuuming device is over 6,400.00 rubles per patient. It was made a pilot batch of 300 pieces.

Recommendations for use and application area: The developed materials are effective for the production of sealing and tribotechnical products, which are used in the construction of shut-off and control valves and technological equipment of chemical and engineering industries (UP «Tsvetlit», OJSC «Grodno Azot», CJSC «SIPR s OP»). Construction implants of ossicular chain and disposable removable nozzle apparatus hydrovacuumaspiration with sterilization laser treatment, were recommended by the Ministry of Health of the Republic of Belarus to use in medical practice.

Научное издание

Сорокин Валерий Геннадьевич

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ С КОМПОНЕНТАМИ,
МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НЕРАЗРУШАЮЩИМ
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
05.16.09 – материаловедение (химическая промышленность)

Ответственный за выпуск В.Г. Сорокин

Подписано в печать 19.05.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 60 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.