Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН
Научно-образовательный центр ТамбГТУ-ИСМАН
«Твердофазные технологии»

# «СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА И ИННОВАЦИОННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ»

*Материалы XI Международной научно-инновационной молодежной конференции*
*30 октября – 01 ноября 2019 г.*

Тамбов 2019

УДК 620.1
ББК 34.4 + 65.291.5

*Сборник подготовлен по материалам, предоставленным авторами в электронном виде, и сохраняет авторскую редакцию. За содержание предоставленных материалов организаторы ответственности не несут.*

**С 56 «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент»:** материалы XI Международной научно-инновационной молодежной конференции: 30 октября – 01 ноября 2019 г. Под общей редакцией оргкомитета. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2019. – 280 с.

ISBN 978-5-905724-93-0

Сборник содержит научные статьи и тезисы докладов студентов, аспирантов и молодых научных работников ВУЗов, НИИ и предприятий Российской Федерации и зарубежных стран, вошедших в программу XI Международной научно-инновационной молодежной конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА И ИННОВАЦИОННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ».

УДК 620.1
ББК 34.4 + 65.291.5

*© Авторы публикаций, 2019*
*© ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019*
*© Оформление Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2019*

ISBN 978-5-905724-93-0

**ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**
**XI Международной научно-инновационной молодежной конференции**
**СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:**
**ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА И ИННОВАЦИОННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

**Сопредседатели:**

| | |
|---|---|
| Бузник Вячеслав Михайлович | - академик РАН, д.х.н., профессор, начальник лаборатории «Материалы для арктического климата» Всероссийского института авиационных материалов РАН, г.Москва, Россия; |
| Краснянский Михаил Николаевич | - профессор РАН, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия. |

**Программный комитет:**

| | |
|---|---|
| Ассовский Игорь Георгиевич | - д.ф.-м.н., зав. лабораторией «Физика горения твердых топлив» Института химической физики им. Н.Н. Семенова, г.Москва, Россия; |
| Баронин Геннадий Сергеевич | - д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ», директор НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», г.Тамбов, Россия - заместитель председателя Программного комитета; |
| Буяновский Илья Александрович | - д.т.н., зав. лабораторией «Методы смазки машин» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г.Москва, Россия; |
| Валитов Венер Анварович | - д.т.н., ведущий научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН, г.Уфа, Республика Башкортостан, Россия; |
| Кербер Михаил Леонидович | - д.х.н., профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г.Москва, Россия; |
| Мищенко Сергей Владимирович | - д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ», заслуженный деятель науки и техники РФ, г.Тамбов, Россия; |
| Муромцев Дмитрий Юрьевич | - д.т.н., профессор, проректор по научно-инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Dimiter Stavrev | - dr. tech. sci., Professor of Engineering, Technical University, Varna, Bulgaria; |

| | |
|---|---|
| Столин Александр Моисеевич | - д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией пластического деформирования материалов Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, руководитель НОЦ ИСМАН, г.Черноголовка, Россия; |
| Стельмах Любовь Семеновна | - д.т.н, вед.н.с. Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, г.Черноголовка, Россия; |
| Ткачев Алексей Григорьевич | - д.т.н., профессор, зав.кафедрой «Техника и технологии производства нанопродуктов» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Туголуков Евгений Николаевич | - д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Устинова Татьяна Петровна | - д.т.н., профессор Энгельсского технологического института СГТУ им. Ю.А. Гагарина, г.Энгельс, Россия; |
| Утяшев Фарид Зайнуллаевич | - д.ф.-м.н., чл.-корр. АН РБ, гл.н.с. Института проблем сверхпластичности металлов РАН, г.Уфа, Россия; |
| Ушаков Николай Владимирович | - ген.директор ООО «Полинит», г.Москва, Россия; |
| Хина Борис Борисович | - д.ф.-м.н., гл.н.с. Физико-технического института НАН Беларуси, г.Минск, Беларусь. |

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

| | |
|---|---|
| Краснянский Михаил Николаевич | - профессор РАН, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Завражин Дмитрий Олегович | - к.т.н., начальник отдела научно-технических программ ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия – зам. Председателя Оргкомитета; |
| Баронин Геннадий Сергеевич | - д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ», директор НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», г.Тамбов, Россия; |
| Молоткова Наталия Вячеславовна | - д.п.н., профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Муромцев Дмитрий Юрьевич | - д.т.н., профессор, проректор по научно-инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Майстренко Александр Владимирович | - к.т.н., доцент, проректор по управлению имущественным комплексом и инфраструктурному развитию ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Столин Александр Моисеевич | - д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией пластического деформирования материалов Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, руководитель НОЦ ИСМАН, г.Черноголовка, Россия; |
| Завражина Кристина Владимировна | - к.э.н., научный сотрудник НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», г.Тамбов, Россия – ученый секретарь Конференции. |

СОДЕРЖАНИЕ

***Пленарные доклады*** 12
*Валитов В.А., Ганеев А.А., Волков А.М.*
Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов типа ЭП741НП после деформации и термической обработки 12
*Ляшенко Я.А., Ляшенко З.Н.*
Учет пространственной неоднородности в синергетической модели формирования поверхностного слоя при внешнем воздействии 17
*Шелохвостов В.П., Баронин Г.С., Воробьев Ю.В., Ассовский И.Г.*
Физические представления формирования структурных состояний водотопливных систем (феноменологический подход) 20
*Сафарзаде А.А., Бахышов Р.А.*
Одноэлектронный прибор на слоистом полупроводниковом кристалле *GaSe* 29
*Баронин Г.С., Бузник В.М., Воробьев Ю.В., Соколов М.В., Ассовский И.Г., Кузнецов Г.П. Дунаев А.В., Дмитриев О.С., Милованов А.В., Воронин Н.В., Пудовкина М.В.*
Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности функционирования транспортно-технологических машин и комплексов при снижении содержания вредных компонент в выхлопных газах 32
*Валитов В.А.*
Влияние химического и фазового состава на режимы подготовки ультрамелкозернистой структуры в никелевых сплавах с упрочняющей фазой $NI_3(AL,TI)$ 40
*Ельчищева Т.Ф., Ерофеев В.Т.*
Влияние параметров внутрипорового вещества на теплофизические свойства строительных материалов 52

***СЕКЦИЯ 1. Материаловедение и твердофазные технологии новых материалов*** 55
*Глазунова Е.В., Король Е.В., Шилкина Л.А., Нагаенко А.В., Вербенко И.А.*
Фазообразование и структура твердых растворов на основе PFN и PFW 55
*Малков И.В.*
Легкие ударопрочные панели баллистического назначения на основе СВМПЭ-пластиков 58
*Чебышев К.А., Пасечник Л.В., Селикова Н.И.*
Изоморфное замещение неодима на свинец в системе $Nd_{5-x}Pb_xMo_{2,86}O_{16+\delta}$ 60
*Балашов Ф.С., Ефимов А.А., Красин М.А., Тишкова А.Г.*
Исследование процесса получения композиционных материалов из смесей термопластов 62
*Хасбулатов С.В., Садыков Х.А., Даудов М.Р., Шилкина Л.А., Алешин В.А., Вербенко И.А., Резниченко Л.А.*
Реверсивная нелинейность твердых растворов бинарной системы $(1-x)BaTiO_3$-$xSrTiO_3$ 65
*Попов О.Н.*
Измерительная система неразрушающего контроля твердофазных переходов в полимерах 68

*Ефимов А.А., Балашов Ф.С., Красин М.А., Тишкова А.Г.*
Утилизация отходов полипропилена ..... 71
*Макарчук М.В., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М.*
Исследование характера разрушения образцов из термопластичного полиэфира при испытаниях на разрывной машине ..... 74
*Алексеева Т.И., Аникин А.Е., Галевский С.Г.*
Синтез и исследование свойств нанокристаллического карбида циркония ..... 76
*Болдырев Н.А., Павленко А.В., Шилкина Л.А., Глазунова Е.А.*
Фазовая диаграмма и электрофизические характеристики керамики тройной системы (1-*x*-*y*)$BiFeO_3$-*x*$PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$-*y*$PbTiO_3$ ..... 79
*Красин М.А., Павлинов В.В., Ефимов А.А., Тишкова А.Г.*
Исследование процесса модификации дорожных битумов серосодержащими материалами ..... 82
*Макарчук М.В., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М.*
Статические испытания образцов из термопластичного полиэфира на разрывной машине ..... 85
*Дмитриев О.С., Баронин Г.С., Худяков В.В.*
Безотходная твердофазная технология производства изделий из фторполимерных нанокомпозитов ..... 88
*Ефанова Д.А., Шахова Е.В., Земсков А.Н., Макеев П.В.*
Получение композиционного материала на основе отходов TETRA PAK и отходов производства ЦСП ..... 90
*Ромашкина Л.В., Ефанова Д.А., Шахова Е.В.*
Исследование свойств композиционных полимерных материалов на основе отходов ЦСП и отходов TETRAPACK ..... 93
*Петренко В.И., Макарчук А.П.*
Исследование прочностных характеристик образцов из полилактида выполненных по аддитивной технологии ..... 96
*Ершов В.А., Лутовинова Т.А.*
Методика определения состава порошкового материала на связке Fe-Cu-Sn химическими методами ..... 98
*Лебедев Д.И.*
Элементное содержание газотермических износостойких покрытий с модификаторами W И Ta ..... 101
*Мордасов М.Д., Харитонов Н.А., Мордасов Д.М.*
Влияние отвердителя на механические свойства эпоксидной смолы ЭД-20 ..... 104
*Леушина Л.И.*
Применение карбонатов и гидрокарбонатов аммония для повышения качества оболочковых форм точного литья ..... 107
*Петренко В.И., Макарчук А.П.*
Исследование физико-механических свойств изделий изготовленных методом послойного наплавления ..... 110
*Ромашкина Л.В., Макеев П.В., Тефанюк М.Н.*
Модификация резиновых смесей с целью улучшения их физико-механических показателей ..... 112

*Саркеева А.А.*
Особенности слоистого титанового материала,
полученного твердофазным соединением ..... 115
*Зайнуллин Р.И., Ганеев А.А., Шахов Р.В., Логунов А.В., Мухтаров Ш.Х.*
Влияние термической обработки на микроструктуру и механические
свойства нового жаропрочного сплава на основе никеля ..... 118
*Шкодич Н.Ф., Вергунова Ю.С., Кусков К.В., Ковалев И.Д.,Трусов Г.В.*
Наноструктурированный градиентный материал
на основе псевдосплава Cu-Cr-W, полученный методами
механоактивации и искрового плазменного спекания ..... 121
*Сударчикова М.А., Насакина Е.О., Севостьянов М.А.,*
*Царева А.М., Новикова Д. А., Колмаков А.Г.*
Формирование тонких покрытий из титана
методом магнетронного напыления ..... 124
*Верескун А.Д., Чебышев К.А., Селикова Н.И., Пасечник Л.В.*
Фазообразование в системе $La_{2-x}Cd_xMoO_{6-x/2}$ ..... 126
*Вергунова Ю.С., Шкодич Н.Ф.*
Структурные особенности высокоэнтропийных сплавов CuCrFeTiNi
и CoCrFeMnNi, полученных методами высокоэнергетической
механической обработки и искрового плазменного спекания ..... 128
*Зинчук Е.А., Макеев П.В.*
Разработка технологического процесса получения нового
композиционного материала на основе отходов ЦСП и полиолефинов ..... 131
*Опарина И.Б.*
Поведение твердых диэлектриков в условиях высокого давления
с напряжением сдвига ..... 134
*Леушин И.О., Марков А.И.*
Применение вакуумирования для изготовления литейных стержней ..... 137
*Ершов В.А., Мордасов Д.М.*
Определение характеристик пористости абразивного порошкового
материла с помощью программного обеспечения IMAGEJ ..... 139
*Леушин И.О., Горохов Д.А.*
Исправление дефектов литья с использованием полимерных и
металлополимерных композиций ..... 142
*Максимович С.В., Белкина И.В.*
Исследование прочностных характеристик и усадочных деформаций
полистиролбетона, армированного полипропиленовой фиброй ..... 145
*Земцова Я.С., Мордасов Д.М.*
Методика экспресс-анализа латуни на начальных стадиях
коррозионного разрушения ..... 148
*Гутник И.В., Дьячкова Т.П., Пасько А.А.*
Применение рентгеноструктурного анализа для изучения свойств
полианилина и композитов на его основе ..... 150
*Верченов В.С., Никитин А.В., Лоскутова А.Д.*
Электрофизические процессы в полупроводниковой пористой структуре,
вызванные когерентным излучением ..... 153

*Лоскутова А.Д., Королева И.Л.*
Исследование точности технологии изготовления твердотельной структуры прибора контроля свойств материалов ..... 156
*Никитин А.В., Верченов В.С., Лоскутова А.Д.*
Объемный заряд в диэлектрике полевой структуры прибора контроля теплофизических свойств материалов ..... 158
*Хасбулатов С.В, Гордиенко Д.И., Шилкина Л.А., Алешин В.А., Вербенко И.А., Резниченко Л.А.*
Феррит висмута, легированный крупноразмерными (La), среднеразмерными (Tb) и мелкоразмерными (Tm) редкоземельными элементами ..... 160
*Лоскутова А.Д., Королев А.П.*
Твердотельная структура для приборов контроля теплофизических свойств материалов ..... 163
*Леушин И.О., Горохов П.А.*
Разработка ресурсосберегающей технологии производства пеноалюминия ..... 166
*Новгородов А.М.*
Методика металлографического исследования стали 03Х17Н11М3 ..... 168
*Макарчук М.В., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М.*
Исследование физико-механических свойств образцов из термопластичного полиэфира ..... 170

***СЕКЦИЯ 2. Технологии наносистем и материалов*** ..... 172
*Неверова М.А., Бесперстова Г.С., Буракова Е.А.*
Способ получения металлоксидного катализатора для синтеза многослойных углеродных нанотрубок ..... 172
*Аврамова А.Ю., Чебышев К.А.*
Синтез наноразмерных пленок молибдата неодима $Nd_5Mo_3O_{16+\delta}$ ..... 175
*Пасько А.А., Кондаков А.И., Чапаксов Н.А., Дьячкова Т.П., Мележик А.В., Смирнова А.И., Усольцева Н.В.*
Свойства углеродных нанотрубок, модифицированных стеариновой кислотой ..... 177
*Чапаксов Н.А., Столяров Р.А., Дьячкова Т.П., Матвеенцев А.В.*
Экранирующие электромагнитное излучение силиконовые покрытия, модифицированные углеродными нанотрубками ..... 180
*Ягубов В.С., Щегольков А.В.*
Перспективы применения углеродных нанотрубок для создания наномодифицированного силикона с эффектом саморегулируемого тепловыделения ..... 183
*Борисова Н.В., Устинова Т.П., Нурмаш Н.К.*
Оценка соответствия габионных конструкций с полимерным покрытием требованиям государственных стандартов ..... 186
*Климин В.С., Прокофьева В.В., Резван А.А.*
Формирование автоэмиссионных структур с использованием методики атомно-слоевого травления ..... 189
*Солоненко А.П.*
Нанокомпозиты карбонатгидроксиапатита, гидросиликата кальция и кальцита ..... 191
*Попова А.А., Алиев Р.Э.*
Проблемы и перспективы использования нанотехнологий в развитии машиностроительной отрасли ..... 194

*Бесперстова Г.С., Буракова Е.А.*
Влияние прокаливания на фазовый состав катализатора ..... 197
*Кузнецова Т.С., Пасько Т.В.*
Гибридные аэрогели для очистки водных сред
от загрязнения нефтепродуктами ..... 199
*Сафина Л.Р., Баимова Ю.А.*
Гидростатическая деформация при повышенных температурах
как способ формирования композита никель-графен ..... 202
*Попова А.А., Шубин И.Н.*
Химическая и термическая активации для увеличения пористости углеродного
сорбирующего материала: эффективность и экологичность процесса ..... 205
*Климин В.С., Резван А.А., Зубова Т.А.*
Современные устройства детекции газа на основе углеродных наносистем
для мониторинга состояния окружающей среды ..... 208

***СЕКЦИЯ 3. Химико-технологические процессы и системы*** ..... 210
*Родионов Д.А., Лазарев С.И., Ромашкина Л.В., Богомолов В.Ю.*
Исследование влияния электромагнитного поля на молочную сыворотку,
с последующим ультрафильтрационным концентрированием ..... 210
*Хохлов П.А., Шестаков К.В., Лазарев Д.С.*
О некоторых особенностях разработки электродиализатора
с охлаждающими трубками ..... 212
*Архипов Р.С., Просветов А.Е., Павлинов В.В., Шашков И.В.*
Изучение процесса девулканизации РТИ на смесительном оборудовании ..... 215
*Михайлин М.И., Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Жирков В.В.*
Кинетические характеристики электронанофильтрационной очистки
сточных вод, содержащих ионы $Zn^{2+}$, $Cu^{2+}$ ..... 218
*Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Луа П., Лазарев С.И.*
Совершенствование конструктивного оформления процессов
электробаромембранного разделения растворов химических и
машиностроительных производств ..... 221
*Павлинов В.В., Просветов А.Е., Архипов Р.С., Шашков И.В.*
Исследование свойств вяжущего модифицированного регенератом
резиновой крошки ..... 224
*Левин А.А., Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Котенев С.И.*
Исследование эффективности мембранной очистки технологических
растворов от хлорида железа и марганца ..... 227
*Шайхутдинова Л.Р., Хайретдинов Э.Ф., Хусаинов Ю.Г.*
Исследование структуры и механических свойств быстрорежущей
инструментальной стали Р6М5 после ИПД и ионного азотирования ..... 230
*Мордасов Д.М., Мордасов М.Д., Лазутин А.В.*
Химический состав трепела Краснослободского месторождения
Тамбовской области ..... 233

***СЕКЦИЯ 4. Механика и математическое моделирование
новых материалов и технологий*** ..... 235
*Полякова П.В., Баимова Ю.А.*
Давление как способ формирования композита Cu-Al:
атомистическое моделирование ..... 235

*Дмитриев О.С., Баронин Г.С., Попов В.А., Худяков В.В.*
Моделирование процесса тепломассопереноса при твердофазном формовании изделий из фторполимерных нанокомпозитов ..... 238
*Истомина Т.А., Рыжкин В.Ю.,Чупрынина С.А., Абрашкин П.А.*
Исследование метода выделения полезного сигнала при регистрации структурных переходов в полимерах ..... 241
*Волкова Е.С., Борисова Н.В., Устинова Т.П.*
Изучение свойств ПАН-волокнистых наполнителей и полиамидного композита на их основе ..... 244
*Ахунова А.Х., Валитов В.А., Галиева Э.В.*
Влияние геометрии вала и диска на напряженно-деформированное состояние в зоне твердофазного соединения при их сварке давлением со сдвигом ..... 247
*Дмитриев О.С., Барсуков А.А., Дмитриев А.О.*
Проектирование оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов ..... 250
*Халиков А.Р., Галиева Э.В., Дмитриев С.В., Валитов В.А.*
Моделирование структуры жаропрочногосплавова ВКНА-25 при 1000 °С методом Монте-Карло в приближении жесткой кристаллической решетки ..... 253
*Ахунова А. Х., Имаев М. Ф., Валеева А. Х.*
Зависимость выходных параметров сварки трением с перемешиванием от формы наконечника инструмента ..... 256
*Липунов В.Н., Маркидонов А.В.*
Моделирование образования дислокационных петель на порах в ГЦК кристалле при внешнем воздействии ..... 259
*Мордасов М.Д., Лазутин А.В., Мордасов Д.М.*
Моделирование процесса растекания полимерной дисперсии ..... 262
*Хачатурова Т.А., Горпенюк Д.В.*
Восстановление параметров барьера проводящих гетероструктур по производным туннельного тока ..... 265
*Чупрынина С.А., Абрашкин П.А., Истомина Т.А., Рыжкин В.Ю.*
Исследование задачи Стефана для полимеров ..... 267

***СЕКЦИЯ 5. Инновационный менеджмент в сфере высоких технологий*** ..... 270
*Калюжная Е.С.*
Методы инновационного менеджмента в сфере высоких технологий ..... 270
*Портнов М.А., Попов А.И.*
Формирование лидерских качеств специалиста инновационной сферы в проектном обучении ..... 273
*Ворожейкин В. С.*
Цифровизация управления предприятием наноиндустрии ..... 275
*Портнов М.А., Тарабрина Е.Ю.*
Обеспечение техносферной безопасности в агропромышленном комплексе ..... 278

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГРАНУЛИРУЕМЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ТИПА ЭП741НП ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ*

**Валитов В.А.[1], Ганеев А.А.[1], Волков А.М.[2]**
*[1]- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Valitov_VA@mail.ru*
*[2]- ФГУП «ВИАМ», ул. Радио, 17, 105005, г. Москва*

## ВВЕДЕНИЕ

Жаропрочные никелевые сплавы нашли широкое применение в различных узлах современных ГТД [1-3]. Одним из наиболее широко применяемых в России является гранулируемый жаропрочный никелевый сплав ЭП741НП, разработанный ОАО «ВИЛС» на базе деформируемого сплава ЭП741, созданного во ФГУП «ВИАМ». Уже в 1986 году впервые в мировой практике диски, изготовленные из гранул сплава ЭП741НП методом «прямого» горячего изостатического прессования (ГИП) без дополнительной пластической деформации компакта, были применены в конструкции пассажирского двигателя ПС-90А [4]. В настоящее время данный сплав используется не только в модификациях семейств серийных двигателей, но и в новых изделиях специального назначения и космической техники.

Сплаву ЭП741НП посвящено огромное множество работ, в том числе и потому, что потенциал данного материала, запас механических свойств относительно норм серийных ТУ и новейшие достижения в области выплавки, ГИП, термической обработки, горячей деформации, а также развитие исследовательских методик, позволяют варьировать его свойства в широком диапазоне значений. Один из успешно реализованных способов увеличения механических свойств гранулируемого сплава – уменьшение размера используемых гранул. В таблице 1 представлены результаты работ специалистов ОАО «ВИЛС» в данном направлении на протяжении около 30 лет [5,6].

Уменьшение размера гранул воздействует на структуру комплексно. Во-первых, снижается средний размер зерна твердого раствора: для гранул фракций (–315+50) зерно составляет около 70 мкм, (–140+50) – уже 50 мкм, (–100+50) – 30 мкм и т.д. Это приводит к повышению прочности в соответствии с соотношением Холла-Петча, а также сопротивления малоцикловой усталости (МЦУ). Кроме того, повышается однородность свойств и структуры по сечению заготовки за счет снижения возможных ликваций химического состава и пористости гранул. Однако снижение размера гранул требует модернизации оборудования для плазменной плавки и центробежного распыления литых вращающихся заготовок. При переходе на мелкие гранулы их стоимость возрастает не только из-за этого факта, но и из-за снижения коэффициента использования металла.

Другой метод повышения свойств – применение к компактированной заготовке дополнительной пластической деформации, как правило, в изотермических условиях. Сплав ЭП741НП является труднодеформируемым как и многие аналогичные высоколегированные жаропрочные никелевые сплавы.

Связано это с большим объемом упрочняющей γ'-фазы, содержащейся в количестве около 60 %. Деформацию необходимо осуществлять в двухфазной области, так как выделение при охлаждении мелких частиц γ'-фазы в матрице, наклепанной после пластической деформации, может привести к растрескиванию заготовки из-за возникающих высоких напряжений [7,8].

В данной работе исследовали влияние деформационно-термической обработки на структуру и механические свойства гранульных сплавов типа ЭП741НП.

Таблица 1.

Уровень механических свойств заготовок дисков из сплава ЭП741НП.

| Год | Используемая фракция гранул | Механические свойства, 20 °С | | | | | Длительная прочность, $\sigma_{100\ ч}$ при 650 °С | МЦУ при 650 °С $\sigma_0$ = 980 МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\sigma_B$ | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCU | | |
| | | МПа | | % | | Дж/см$^2$ | МПа | Число циклов |
| 1981 | –315+50 | 1280 | 835 | 13 | 15 | 40 | 980 | 3500 |
| 1998 | –140+50 | 1420 | 980 | 15 | 15 | 40 | 980 | 5000 |
| 2003 | –100+50 | 1420 | 1000 | 15 | 17 | 40 | 1000 | 10000 |
| 2010 | –70 | 1470 | 1050 | 20 | 20 | 50 | 1030 | 100000 |

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала исследования был использован никелевый сплав ЭП741НП в виде цилиндрических заготовок Ø90×60 мм, которые были получены методом горячего изостатического прессования (ГИП) из гранул (размером менее 100 мкм) в цилиндрическую заготовку Ø90×60 мм. Сплав имел следующий химический состав: Cr – 9.3; Ti – 1.8; Al – 5.2; Mo – 4; Nb – 2.7; Co – 15.7; W – 5.4; Hf – 0.2, C – 0.04, B – 0.014 (вес. %). Кроме того, исследования были проведены на новом экспериментальном гранульном сплаве системы Ni-Co-Cr-W-Al-Mo-Nb-Ti-Ta-Hf-C, который обеспечивает достижение более высокого уровня свойств по сравнению со сплавом ЭП741НП.

Микроструктуру исследовали методами оптической и растровой электронной микроскопии. При изучении микроструктуры также использовали метод анализа картин дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD-анализ). Механические испытания на растяжение, длительную прочность и малоцикловую усталость проводили по стандартным методикам (ГОСТ 1497, ГОСТ 9454, ГОСТ 10145, ГОСТ 25.502).

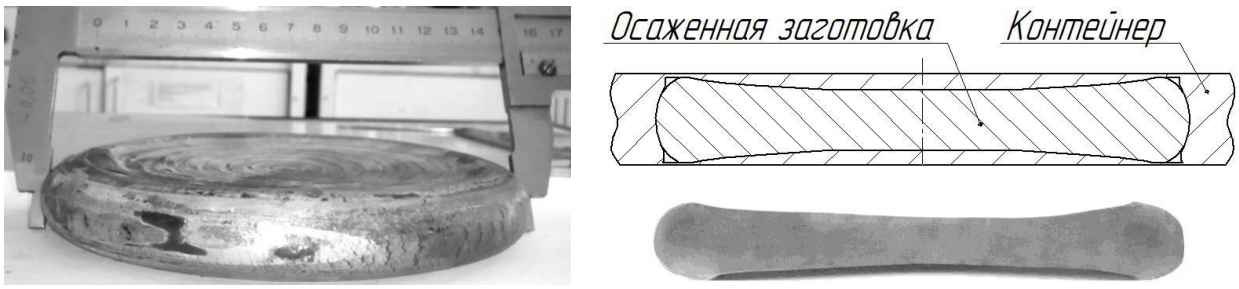
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для формирования мелкозернистой структуры в сплаве ЭП741НП и проведения деформации без разрушения заготовки необходимо было укрупнить исходно мелкие когерентные частицы внутризеренной γ'-фазы. С этой целью проводили гетерогенизирующий отжиг путем нагрева до температуры на 10 °С ниже сольвуса γ'-фазы (Ts). Материал охлаждали со скоростью около 25 °С/час до температуры 900 °С, при которой процесс интенсивного выделения γ'-фазы прекращается. В результате отжига размер внутризеренной когерентной γ'-фазы увеличился с 0,4 до 1,1 мкм.

На тестовых образцах диаметром 10 мм и высотой 15 мм, изготовленных из гранул фракции (–140+50) мкм, был отработан оптимальный режим деформации. Он включал дробную деформацию при температуре (Ts–10 °С) с промежуточными отжигами. В результате была сформирована ультрамелкозернистая структура с

размером γ-зерен около 5 мкм, окруженных некогерентными частицами γ'-фазы размером 1,5–2 мкм. Данный режим был применен для деформации заготовок диаметром 90 мм и высотой 60 мм. Исходную цилиндрическую заготовку с контейнером нагревали до температуры на 30 °С ниже температуры сольвус γ'-фазы. В результате были получены шайбы диаметром 140–160 мм и толщиной около 10 мм (рисунок 1а). Благодаря использованию оболочки зоны застойной деформации в штамповке практически отсутствовали (рисунок 1б).

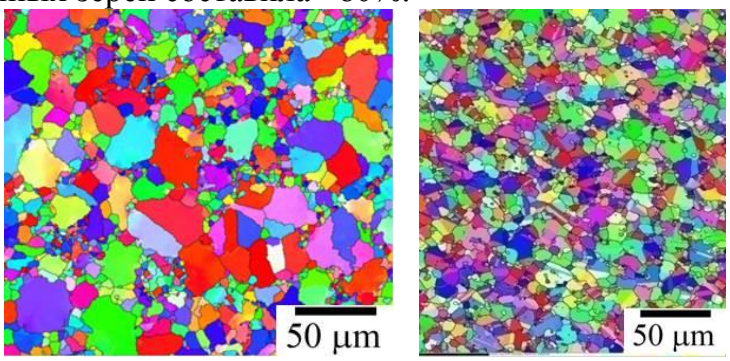
Полученные шайбы подвергали термической обработке, включающей закалку при различных температурах из двухфазной области и ступенчатое старение. Далее изготавливали образцы для механических испытаний. Установлено, что с ростом температуры закалки средний размер зерна увеличивается с 10 мкм при (Ts–30 °С) до 70 мкм при (Ts+30 °С). Оптимальный уровень механических свойств обеспечивается при закалке (Ts–10 °С), при этом формируется зерно размером 20 мкм с однородным выделением когерентных частиц γ' фазы размером около 0,3 мкм. Таким образом, примененная ДТО позволила уменьшить размер зерна в 2,5 раза по сравнению с материалом, изготовленным методом ГИП с последующей стандартной термической обработкой.




а б

Рисунок 1**.** Деформированная заготовка Ø150×10 мм:
а – внешний вид, б – схема размещения в контейнере и макроструктура.

В результате деформации исходная крупнозернистая микроструктура (рисунок 2а) стала ультрамелкозернистой (рисунок 2б). Средний размер рекристаллизованных γ-зерен был равен 5 мкм, размер некогерентных пограничных частиц γ'-фазы составил 2,5 мкм. Объемная доля рекристаллизованных зерен составила ~80%.




(а) (б)

Рисунок 2. EBSD-карта сплава ЭП741НП в исходном состоянии после ГИП и гетерогенизирующего отжига (а) и после дробной деформации квазиизотермических условиях (б).

Следует отметить, что формирование в деформируемом гранульном сплаве мелкозернистой структуры перспективно для создания в деформированной заготовке диска, как показано в работе [9], градиентной структуры, изменяющейся по радиусу диска ГТД: от мелкозернистой в ступице до крупнозернистой в ободе. Это позволит достичь требуемого комплекса градиентных характеристик прочностных и жаропрочных свойств, отвечающих реальным температурным условиям эксплуатации различных зон диска в составе ГТД.

В таблице 2 приведены механические свойства гранульных сплавов типа ЭП741НП, подвергнутых дополнительной деформации, в сопоставлении с материалом после ГИП и стандартной термической обработки, а также в сравнении со сплавом следующего поколения ВВ751П и новым экспериментальным гранульным сплавом. Как видно из представленных результатов, деформационно-термическая обработка позволяет довести уровень сплава ЭП741НП (технология 1995 г.) практически до уровня свойств сплава ВВ751П, относящегося к следующему поколению (2009 г.). В таблице 2 приведены также характеристики нового гранульного сплава как после ГИП, так и после деформации, в результате которой в этом сплаве формируется мелкозернистая структура аналогичная структуре деформированного сплава ЭП741 НП (Рисунок 2). Результаты исследований показали, что новый экспериментальный сплав демонстрирует более высокие характеристики кратковременных механических свойств при комнатной температуре, а также более высокие значения длительной прочности и малоцикловой усталости при температуре 650$^{o}$С.

Таким образом, показано, что дополнительная деформация гранульных сплавов позволяет существенно повысить характеристики прочности и жаропрочности, а также малоцикловой усталости за счет формирования в деформированном и термообработанном материале структуры с требуемыми параметрами размера зерен $\gamma$ фазы и выделений упрочняющей фазы $\gamma'$-фазы.

Таблица 2.

Сравнение уровня механических свойств гранульных сплавов типа ЭП741НП в различных состояниях.

| | Механические свойства, 20 °С | | | | | Длительная прочность, $\sigma_{100\ ч}$ при 650 °С | МЦУ при 650 °С, f=1 Гц, N=$10^4$ циклов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Сплав, Технология | $\sigma_В$ | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ | $\psi$ | KCU | | |
| | МПа | МПа | % | % | Дж/см$^2$ | МПа | МПа |
| ЭП741НП ГИП+ТО [5] | 1420 | 1000 | 20 | 17 | 40 | 1000 | 980 |
| ЭП741НП ГИП+Деф.+ТО | 1580 | 1090 | 23 | 19 | 38 | 1050 | - |
| ВВ751П ГИП+ТО[6] | 1570 | 1180 | 12 | 13 | 25 | 1084 | 1099 |
| Экспер. гран. сплав. ГИП+ТО | 1540 | 1200 | 10 | 11 | 20 | 1118 | 1177 |
| Экспер. гран. сплав. ГИП+ Деф.+ТО | 1600 | 1250 | 12 | 13 | 25 | 1118 | 1225 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установленные в работе закономерности влияния режимов деформации и ТО на структуру и свойства сплава ЭП741НП свидетельствуют об эффективности деформационной обработки как метода повышения прочностных и жаропрочных свойств, а также характеристик малоцикловой усталости гранульных никелевых сплавов типа ЭП741НП. Формирование в деформируемом гранульном сплаве мелкозернистой структуры позволяет в дальнейшем создать в деформированной заготовке для диска ГТД, например, градиентные структуры: мелкозернистую в ступице и относительно крупнозернистую в полотне и ободе. Это позволит достичь требуемого комплекса градиентных характеристик прочностных и жаропрочных свойств, отвечающие реальным условиям эксплуатации диска в составе ГТД.

**Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 18-19-00685.*

Список используемых источников.

1. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (К 100-летию со дня рождения). - М.: Наука, 2006.- 407с.

2. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов./ Пер. с англ. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение,1988. - 320с.

3. Симс Ч., Столофф Т., Хагель В. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. / В 2-х кн. - Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1995. - 568с.

4. Иноземцев А.А., Аношкин Н.Ф., Башкатов И.Г., Гарибов Г.С., Коряковцев А.С. Применение дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов в серийных ГТД авиационной и наземной техники /В кн. Перспективные технологии легких и специальных сплавов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. С. 371–376.

5. Garibov G S, Grits N M, Vostrikov A V, Fedorenko Y A and Volkov A M 2014 Development of advanced P/M Ni-base superalloys for turbine disks EUROSUPERALLOYS 2014 (Giens)

6. Гарибов Г С, Гриц Н М, Востриков А В, Федоренко Е А Эволюция технологии, структуры и механических свойств гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных методом ГИП Технология легких сплавов 2010, № 3, с. 31

7. Ганеев А.А., Валитов В.А., Утяшев Ф.З., Имаев В.М. Влияние температурно-скоростных условий деформации на деформируемость и структуру гранульного сплава ЭП741НП. // Сб. трудов X Межд. научно-инновац. мол. конф.: 24 - 26 октября 2018. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В, 2018. С.129-131.

8. Ганеев А.А, Валитов В.А. Формирование ультрамелкозернистой структуры в никелевом сплаве ЭП741НП при горячей деформации в γ+γ' области// Письма о Материалах. 2015. № 5(2), С. 152-155.

9. Joe Lemsky. Assessment of NASA Dual Microstructure Heat Treatment Method Utilizing Ladish SuperCoolerTM Cooling Technology (http://gltrs.grc.nasa.gov, NASA/CR—2005-213574 1// Ladish Company, Inc. Cudahy, Wisconsin 53110).

# УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Ляшенко Я.А.**[1,2], **Ляшенко З.Н.**[2]
[1]-*Берлинский технический университет, 10623 Берлин, Германия*
[2]-*Сумский государственный университет, 40007 Сумы, Украина*
*i.liashenko@tu-berlin.de*

Под самоорганизацией понимается процесс образования упорядоченных структур без изменения напрямую структурообразующего параметра, т.е. в отсутствие “специфического” внешнего воздействия. Мы сталкиваемся повседневно с процессами самоорганизации в живой и неживой природе. Типичные примеры – это явление сверхпроводимости за счет упорядочения электронов при низких температурах, когерентное излучение в лазере, возникновение упорядоченных потоков-вихрей в подогреваемой жидкости, некоторые химические реакции (например, реакция Белоусова-Жаботинского). В биологических системах это самосогласованное поведение бактерий, образование в океане пиросом, стаевое поведение птиц и рыб, и т.п. Системы, способные к самоорганизации, изучает наука синергетика, основателем которой является Герман Хакен [1,2]. Существует большое количество относительно простых математических моделей, которые описывают процессы самоорганизации в различных физических системах. Это хорошо известная модель хищник-жертва Лотки–Вольтерры, системы дифференциальных уравнений Лоренца и Рёсслера, показывающие хаотические аттракторы, различные уравнения химических реакций, модели нейронных сетей и т.п. Эти модели как правило описываются нелинейными уравнениями, имеющими положительные (причина самоорганизации) и отрицательные (условие стабилизации) обратные связи между динамическими переменными. В предлагаемой статье мы остановимся на широко известной системе Лоренца [3], которой уже более 50 лет, но которая и по сей день активно исследуется, в связи с развитием вычислительной техники и появлением новых возможностей.

Система Лоренца с пространственно неоднородным распределением параметров в простейшем случае имеет вид

$$\dot{u} = D_{(uS)}\nabla^2 u - u + v, \tag{1}$$

$$\sigma\dot{v} = D_{(vS)}\nabla^2 v - v + Su, \tag{2}$$

$$\delta\dot{S} = \nabla^2 S + \left(S_e - S\right) - uv, \tag{3}$$

где $u$ – параметр порядка, $v$ – внутренний параметр, называемый сопряженным полем, а $S$ – параметр, описывающий внешнее воздействие на

систему. Здесь постоянная $S_e$ – это величина внешнего воздействия. Особенность системы (1) – (3) состоит в том, что за счет присутствующих в ней нелинейных связей при изменении внешнего воздействия система может показывать совершенно различные режимы, в том числе и режим детерминистического хаоса. В системе учтены неоднородные распределения всех переменных, представленные градиентными слагаемыми. Константы $D$ перед этими слагаемыми задают уровень неоднородности. Система Лоренца применяется для описания самого различного рода эффектов, в том числе и для моделирования измерения профиля поверхности под внешним воздействием. Представим себе ситуацию, в которой в условиях вакуума происходит осаждение материала на подложку, который за счет неоднородного распределения температуры по поверхности может также и испаряться. В таком случае как параметр порядка $u$ может быть выбрана высота точек поверхности относительно некого среднего значения. В роли $S_e$ в таком случае может выступать интенсивность некоего внешнего воздействия, например, температура испарителя частиц, либо непосредственно плотность их потока. Для точной параметризации системы Лоренца необходимо рассматривать конкретную экспериментальную установку и происходящие в ней процессы, как например в работе [4]. Здесь же мы не будем останавливаться на создании точной математической модели, а будем работать в рамках допущений, что существует некий процесс, в котором за счет внешнего воздействия изменяется форма поверхности (высота поверхности задается параметром $u$), и при этом мы можем изменять уровень внешнего воздействия $S_e$. Причем положительные значения $u$ отвечают конденсации на поверхности вещества извне, а отрицательные – испарению атомов с изначально гладкой поверхности (т.е. ее эрозия).

Для моделирования и численного решения записанных выше уравнений используем явную разностную схему, как ранее в работе [5]. Поскольку при решении уравнений значения на следующем временном слое находятся независимо друг от друга, для ускорения процесса численного счета целесообразно использовать многопоточное программирование. В частности, созданная нами компьютерная программа использует независимо 4 потока, при этом исследуемая область делится на 4 части, и каждая из них рассчитывается независимо. Еще эффективней был бы расчет при использовании технологии параллельного программирования CUDA для проведения неграфических вычислений на видеокартах кампании NVIDIA, что мы планируем осуществить в будущем. Как параметры дискретизации выбирались шаги по времени $\Delta t = 10^{-5}$ и по координате $H = 0.01$. Решение системы находилось на пространственной сетке размером 256×256. Моделирование производим при фиксированных параметрах $S_e = 28$, $\sigma = 10$ и $\delta = 3.75$. Начальные распределения на нулевом временном шаге для всех неоднородных параметров представляют гауссово распределение с дисперсией $\mu = 2\sqrt{5}$. На рисунке показано пространственное распределение

высот поверхности, полученное при численном решении уравнений Лоренца для момента времени $t$ = 1000. На левой панели рисунка показан трехмерный вид поверхности, а на правой панели приведен вид этой поверхности, где черными областями показаны отрицательные высоты (эрозия поверхности), а белыми – положительные (нарастание толщины за счет осаждения атомов извне).

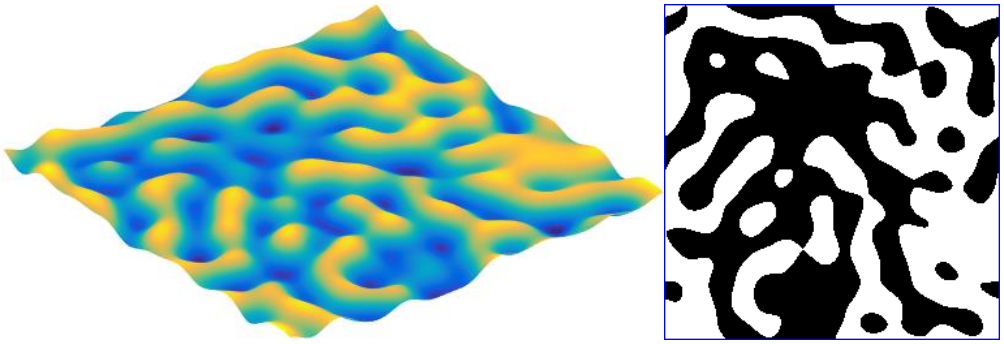


Рисунок 1. Внешний вид поверхности, полученной при численном решении уравнений (1)-(3) при параметрах $D_{(uS)} = D_{(vS)} = 10^{-3}$, отвечающий моменту времени t = 1000.

В нашем случае при выбранных параметрах устанавливается режим, в котором происходят постоянные изменения пространственного распределения высот, и система не стремится при этом к устойчивому равновесному состоянию.

Для анализа полученных поверхностей можно использовать многочисленные методы анализа трехмерных поверхностей. Двумя довольно мощными методиками исследования поверхностей на сегодня являются мультифрактальный флуктуационный анализ [6] и методы, основанные на анализе спектральной плотности мощности [7]. Помимо этого, трехмерные поверхности характеризуются целым спектром численно рассчитываемых параметров [8]. Исследование временной эволюции таких параметров мы планируем провести в следующей работе.

Список используемых источников.


1. Г. Хакен. Синергетика. М, Мир (1980). 406 с.
2. Г. Хакен. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным явлениям. М, Мир (1991). 240 с.
3. E.N. Lorenz. J. Atmos. Sci. **20**, 130 (1963).
4. A.I. Olemskoi, O.V. Yushchenko, T.I. Zhilenko. Phys. Solid State **53**, 845 (2011).
5. Ya.A. Lyashenko. J. Appl. Mech. **57**, 136 (2016).
6. J.W. Kantellhardt, S.A. Zschiegner, Eva Koscielny-Bunde et al. Physica A **316**, 87 (2002).
7. B.N.J. Persson. Tribol. Lett. **54**, 99 (2014).
8. E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman. J. Mater. Process. Technol. **123**, 133 (2002).

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДОТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ (ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД)

**Шелохвостов В.П.[1], Баронин Г.С.[2], Воробьев Ю.В.[3], Ассовский И.Г.[4]**

***[1]- ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», кафедра «Материалы и технология», г. Тамбов, Shelokhvostovvp@yandex.ru***

***[2]- ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», г. Тамбов, Российская Федерация, baronin-gs@yandex.ru***

***[3]- ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация***

***[4]- ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Российская Федерация, assov@chph.ras.ru***

## ВВЕДЕНИЕ

Водотопливные эмульсии (ВТЭ) активно изучаются и применяются со второй половины прошлого века [1-3]. Проведены многочисленные экспериментальные исследования, в ходе которых установлены оптимальные компонентные составы и влияние водной составляющей. Результаты исследований в ведущих НИИ начали внедряться в середине 80х годов после разработки установок УКДГ-85, УКДГ-89 по приготовлению ВТЭ для главных судовых дизелей мощностью до 10 600 э.л.с. Здесь ВТЭ обеспечивали снижение расхода топлива на 12 %, температуру ОГ на 8-10 ºС, значительно - вредных газов в ОГ и теплонапряженность ЦПГ. В установках УКДГ комплект устройств осуществляет многоступенчатое диспергирование, гомогенизацию смеси интенсивным кавитационным воздействием от высокочастотного ультразвука [3].

Установлена зависимость эффективности ВТЭ для дизелей, котлоагрегатов от дисперсности и содержания воды, степени модификации топлив, от способа применения ВТЭ [3]. Поэтому установками УКДГ Одесского «ЦЭТ Гидротопливо» [3] обеспечена эффективная работа дизелей и котлоагрегатов на ВТЭ с водосодержанием 5-30 %. Дисперсность 98 % капель воды 1-5 мкм, максимум их - 20 мкм, а дисперсность капель топлива 3-5 мкм. При этом топливная аппаратура на всех режимах работает без отказов.

Вместе с тем, достигнутые результаты в отношении характеристик ВТЭ мало менялись за последние десятки лет. В первую очередь это относится к стабильности компонентного состава и свойств как непосредственно после приготовления, так и после длительного хранения

Одной из причин такой ситуации является распространенный в этот период подход к исследованиям, который можно назвать классическим: система описывается линейными функциями, которые дают достаточно предсказуемый результат при линейном изменении аргументов. Рассматриваемые же системы в большей степени следует отнести к системам квантовым, поскольку входящие в них компоненты (углеродные ассоциации или кластеры) имеют основные признаки, характерные для квантовых систем. В первую очередь это закономерно построенные и малые по размеру составляющие, которые можно отнести к диапазону 10 – 100 нм. Материальные образования именно этого диапазона

являются объектами исследований области, которую сейчас называют – *нанотехнологии.*

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является развитие физических представлений преобразования компонентного состава дизельных топлив механическими активаторами, предложенными в патентах РФ [4-10]. В основе методов и устройств лежит воздействие на компонентный состав топлива при пропускании его потока через спиральную систему, зону кавитации и стабилизации. Указанные патенты определяют приоритет на устройства, обеспечивающие преобразование тяжелых фракций топлива в более легкие. Вместе с тем, физика процесса такого преобразования не достаточно понятна, хотя безусловно актуальна.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНОАКТИВАЦИИ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Дизельные топлива имеют достаточно сложную структуру с группой легких и тяжелых фракций, причем основной объем следует отнести к более тяжелым. Структура каждого из компонентов представляет собой углеводородные плоские и объемные цепочки (рисунок 1). Центральные части 1 имеют сильные однородные межатомными связи и минимальную дефектность. Поверхностные слои 2 оказываются более дефектными за счет поверхностного натяжения, кроме того они постоянно испытывают внешнее воздействие.

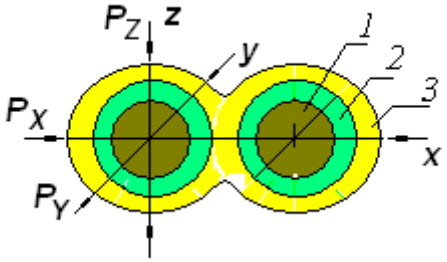



Рисунок 1. Схема структуры (модель) топливного компонента: *1* – компонент; *2* – поверхностный слой; *3* – межкомпонентная прослойка (присадки).

Отдельные компоненты топлива контактируют через слой 3, включающий эмульгаторы и др. примеси. Именно из-за этого слоя большинство компонентов легко перемещаются относительно друг друга, избегают ситуации с неблагоприятными напряженными состояниями. Разделение любого из компонентов в условиях статического воздействия затруднительно в силу ряда причин.

В частности, основное тело 1 компонента и его поверхностный слой испытывают только воздействие всестороннего сжатия.

$$P_X = P_Y = P_Z = \text{Const} \qquad (1)$$

Удельные характеристики в этом случае определяются величиной давления $P_i$ отнесенной к площади $S_i$ тела компонента

$$\sigma_i = P_i / S_i \qquad (2)$$

Соотношение (1) тогда приобретает вид

$$\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = Const\ , \qquad (3)$$

а численно это состояние может описываться средним гидростатическим напряжением $\sigma_n$ по соотношению

$$\sigma_n = (\sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z)/3 \quad (4)$$

Состояние с равенством нормальных напряжений по принятым осям соответствует объемному напряженному состоянию. Полная характеристика напряженного состояния включает дополнительно соотношение для касательных напряжений $\tau_i$, определяемых как

$$\tau_i = \tau_{max} = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2 = 0 \quad (5)$$

и приобретающих максимальные значения в направлениях под $45^0$ между главными нормальными напряжениями.

Выполнение в этом случае условий межмолекулярного разделения в цепочке тела компонента, т.е.

$$-\sigma_X = -\sigma_Y = -\sigma_Z << +\sigma_{отр}, \quad (6)$$

практически оказывается труднодостижимым из-за противоположных знаков и больших значений $\sigma_{отр}$.

Сопротивление отрыву $\sigma_{отр}$ характеризует только величину внутримолекулярных связей, определяется родом материала, мало изменяется от температуры и даже при смене агрегатного состояния, для большинства материалов оно находится в пределах единиц и десятков МН. Межмолекулярные связи зависят существенно от внешних условий (температуры, скорости нагружения и др).

Реализация оптимального процесса разделения компонента возможна в случае создания таких условий его нагружения, при которых обеспечивалось благоприятное напряженное состояние в отношении трансформации поверхностных слоев.

Основными условиями надо поставить неравенство давлений $P_i$ или нормальных напряжений $\sigma_i$ по принятым осям

$$P_X \neq P_Y \neq P_Z; \quad (7)$$

$$\sigma_X \neq \sigma_Y \neq \sigma_Z, \quad (8)$$

а также наличие максимально возможных касательных напряжений $\tau_{max}$ при

$$[\ \sigma_X > \sigma_Y > \sigma_Z] \sim [\ \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3\ ], \quad (9)$$

определяемых как

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 >> 0 \quad (10)$$

Достижение в этих условиях $\tau_{max}$ сопротивления сдвигу $\tau_{сдв}$, будет обеспечивать деформацию поверхностного слоя компонента 2 и создаст условия его смещения в объем среды. Для описания возможных процессов (механизмов) можно привлечь ряд моделей, созданных для объяснения различных типов разрушения (хрупкое-вязкое) твердофазных материалов (преимущественно сталей) [11]. Несколько таких схем показано на рисунке 2.

Наиболее часто используемая схема А.Ф.Иоффе (рисунок 2а) показывает изменение соотношений сопротивления материалов отрыву ($\sigma_{отр}$) и сдвигу ($\tau_{сдв}$) в зависимости от температуры. При неизменной практически величине $\sigma_{отр}$ с уменьшением температуры происходит в большинстве материалов увеличение $\tau_{сдв}$. При условии $\tau_{сдв} << \sigma_{отр}$ происходит практически непрерывное пластическое деформирование, в последний момент заканчивающееся отрывом (вязкое разрушение). В случае $\tau_{сдв} > \sigma_{отр}$ реализуется разрушение отрывом без предварительной деформации (хрупкое разрушение). С этих позиций

применительно к топливным системам для работы с поверхностными слоями (их деформация) компонентов желательны более высокие температуры.

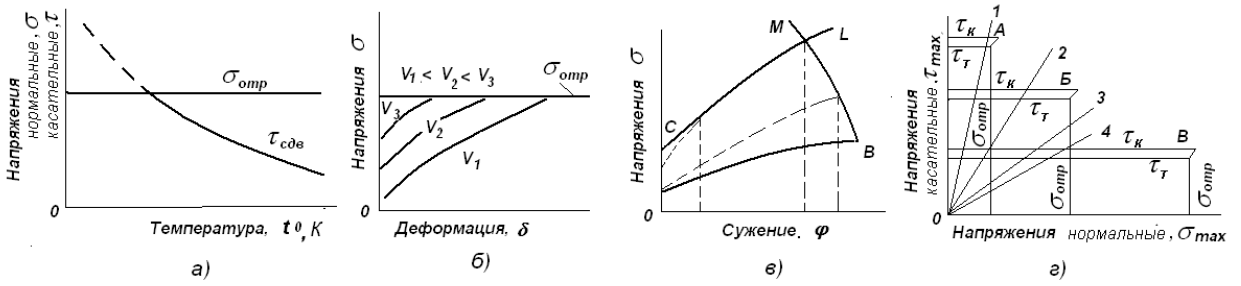



Рисунок 2. Схемы механического состояния твердых тел в зависимости от различных факторов: а) схема А.Ф.Иоффе; б) схема П.Людвика; в) схема Н.Н.Давиденкова; г) схема Я.Б.Фридмана.

Описание кинетических процессов и их влияние на характер поведения системы представляется схемой П.Людвика (рисунок 2б). Отсюда следует, что увеличение скорости нагружения $V_1 < V_2 < V_3$ увеличивает опасность разрушения отрывом. Так что с поверхностными слоями компонентов предпочтительней работать при меньших скоростях нагружения.

В схему Н.Н.Давиденкова (рисунок 2в) введены две различные ветви разрушения, положившие начало разграничению разрушения на хрупкое и вязкое. Кривая *CL* характеризует сопротивление хрупкому разрушению, а кривая *MB* – вязкому. Пользуясь этой схемой можно определиться по параметрам деформации без разрушения компенсационных слоев нанокомпонентов в пространстве «напряжения-деформации» как площади под кривыми *CLMB.*

Попытки создания схем, учитывающих изменение свойств материала, скорости деформации и напряженное состояние, не дали положительного результата. Наиболее продвинутой в этом плане следует считать схему Я.Б.Фридмана (рисунок 2г), в которой учтено напряженное состояние и способ нагружения. Дальнейшего развития это направление не получило.

В отношении топливных систем ни одна из приведенных схем не может быть использована, поскольку эти системы являются еще более сложными. Например, в топливных системах неоднозначно сопротивление сдвигу, величина которого будет на порядки различаться для межмолекулярных и внутримолекулярных объемов топливных компонентов. Однако, наибольшая трудность заключается в создании благоприятного и воспроизводимого напряженного состояния, необходимого для деформации поверхности компонента. Попыток продвинуться в этом направлении не обнаружено.

Одним из выходов в этом случае может быть использование изменяющихся напряженных состояний и различных скоростей нагружения вокруг топливного компонента, что может реализовываться при встрече потока топлива с рассматриваемыми компонентами по сложным лабиринтным каналам или траекториям с меняющимися скоростями движения, препятствиями, в случае кавитационных процессов, при дросселировании и др. Возможно использование статических электромагнитных полей в сочетании с механическими и электромеханическими воздействиями. Первые попытки создания моделей для сред различного назначения приведены в работах [11, 12]

Феноменология трансформации поверхностного слоя топливного компонента приведена на рисунке 3

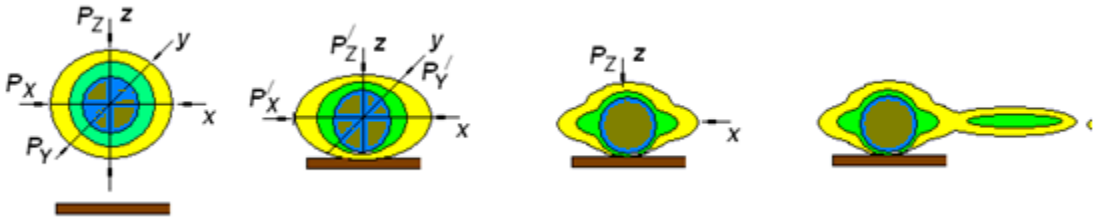



Рисунок 3. Стадии деформирования поверхностного слоя топливного компонента.

Развитие этих представлений о диспергировании межкомпонентных слоев, включая добавки воды, и отделения поверхностного слоя компонента показано рисунком 4.

Даже при чрезвычайно малом уровне касательных напряжений (движение по лабиринтным каналам) происходит отделение и диспергирование водной составляющей. а также деформация поверхностного слоя топливного компонента (рисунок 4а). По-видимому, связь этой водно-эмульсионной прослойки с поверхностью компонентов находится на уровне вандерваальсовых сил. Время жизни и конфигурация этих дисперсных образований определяется окружающими топливными элементами, время жизни в газовой среде оценивается по некоторым данным в диапазоне $10^{-6}$ – $10^{-5}$ секунды (Слесарев и др. ).

Дальнейшая деформация поверхностных слоев связана с формированием плоского напряженного состояния, поскольку

$$P_X = P_Y << P_Z; \quad (11)$$

$$\sigma_X = \sigma_Y << \sigma_Z, \quad (12)$$

При таком соотношении величина касательных напряжений определяется уровнем $\sigma_X = \sigma_Y$ по отношению к $\sigma_Z$ или разницей $\sigma_2 = \sigma_3 << \sigma_1$. Вместе с тем, уровень $\sigma_2 = \sigma_3$ определяется сопротивлением среды в плоскости XY. Величина сопротивления будет зависеть от скорости приложения нагрузки по оси Z. Можно предполагать неоднозначное изменение этого уровня с увеличением скорости. Соответственно, требуется анализ в этом плане.

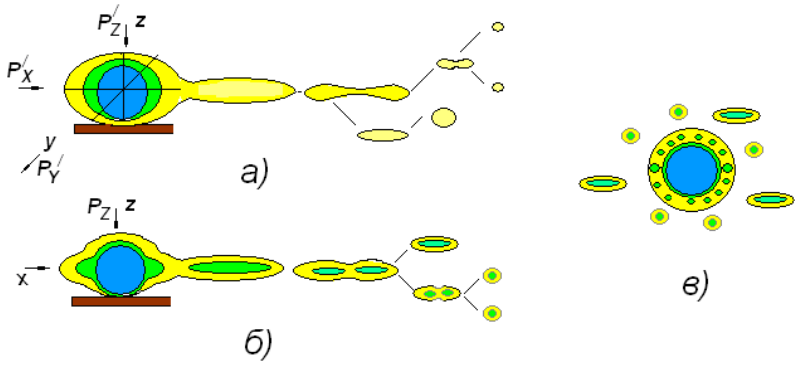



Рисунок 4. Схема формирования топологии дизельного топлива при механической активации: *а* – механизм переноса структурных состояний в объем и формирование кластеров водно-эмульсионных добавок; *б* – механизм создания нового структурного состояния при механической активации топлива; *в* – схема объемной кластерной структуры после активации.

В случае возникновения плоского напряженного состояния происходит существенное увеличение уровня касательных напряжений и создаются условия

одновременного отделения водно-эмульсионной прослойки и части поверхностного слоя компонента (рисунок 4б). При такой деформации происходит уменьшение размера исходного компонента с сохранением исходной малодефектной структуры и увеличение количества вновь созданных деформацией кластеров с искаженной структурой. Следует предполагать, что в структуре водно-топливной системы произойдет увеличение доли легкой фракции и уменьшение доли наиболее тяжелых компонентов. При этом не следует ожидать равномерного распределения всего спектра кластеров по объему, поскольку новые малые кластеры будут тяготеть к исходному компоненту, как показано на рисунке 4в. Но следует ожидать более дисперсное состояние водной составляющей именно вблизи исходных компонентов, именно в облаке малых кластеров. С увеличением объема образовавшейся легкой фракции можно связывать и большую устойчивость ВТЭ. Следует ожидать также еще одну особенность: при удалении из среды крупных (исходных) компонентов создаются условия равномерного распределения малых кластеров в объеме, формирования из них закономерных построений, называемых «сверхрешетки». В такой системе водные нанокластеры будут органически связаны со сверхрешеткой, что придаст системе совершенно новые свойства, по сути, новый вид топлива.

## ПУТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пригодность предложенной схемы диспергирования компонентов в топливе косвенно подтверждается при механической очистке углеродных нанотрубок после пиролитического синтеза (кварцевый реактор, температура $650^0$С, пропан-бутановая смесь, катализатор оксид никеля) путем ультразвукового воздействия и кавитации. Объекты, подготовленные по методике [13] просматривали непосредственно в микроскопе ЭМВ100А при ускоряющем 75 КэВ. Как показано на рисунке 5, поверхность нанотрубок покрыта слоим аморного углерода (левый) и вторичных продуктов с различной величиной связи с поверхностью (включая хемосорбцию), на этом же рисунке показаны наноьтрубки (справа), поверхность которых механически очищена. Существенна разница компонентов до и после очистки.

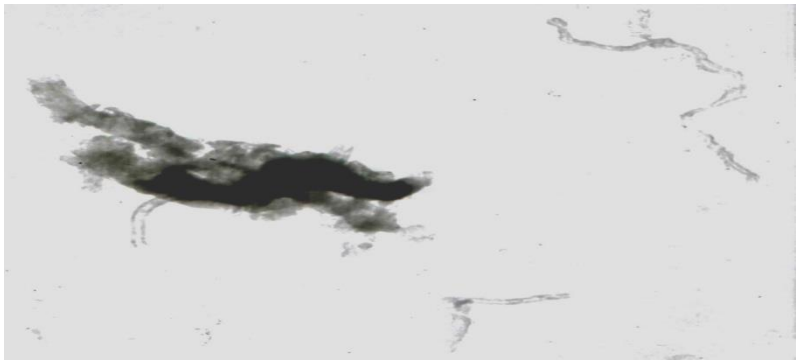


Рисунок 5. Электронные структуры нанотрубок в процессе очистки.

Таким образом, косвенно показана эффективность работы по предложенной методике и возможность объяснения результатов экспериментальных исследований по механоактивации моторных топлив

Исследователи ТамбГТУ совместно с ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН и ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» уже несколько лет

работают над разработкой технологии получения экологически чистого «белого топлива».

Таблица 1.

Результаты хроматографического анализа состава по компонентам для неактивированных и механоактивированных дизельтых топлив и ВТЭ.

| № | Компонент | Концентрация компонентов в веществах, % объемн. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ВТЭ 2018 г. | | Дизтопливо не активированное | | | | ДТ активированное | | |
| | | 1-я | 2-я | ДТ ФГБНУ ВНИИТиН | | ДТ Рос-нефти | ДТ Евро исходное | Евро | ВНИИ-ТиН | через 57 дней |
| 1 | Комп-лекс | 2,0623 | 8,9733 | - | - | - | - | 18,735 | - | 31,2393 |
| 2 | | | | - | - | - | - | - | 12,4643 | 0,1744 |
| 3 | Октан | 2,4137 | 1,4548 | 0,7914 | 0,6165 | 0,4710 | 0,7914 | 0,7627 | 0,5728 | 0,4770 |
| 4 | Нонан | 5,3812 | 3,969 | 1,0773 | 2,0122 | 1,94 | 1,0773 | 0,8636 | 1,9178 | 1,4916 |
| 5 | Декан | 10,686 | 8,2844 | 1,6927 | 4,8365 | 4,17 | 1,6927 | 1,2876 | 4,3327 | 1,6204 |
| 6 | С11 | 14,748 | 11,56 | 3,7948 | 9,5619 | 7,87 | 3,7948 | 2,8221 | 7,0027 | 7,5722 |
| 7 | С12 | 13,630 | 11,10 | 7,9954 | 8,2222 | 8,859 | 7,9954 | 5,2168 | 7,4221 | 5,6975 |
| 8 | С13 | 14,822 | 11,725 | 10,1914 | 9,8051 | 13,05 | 10,1914 | 8,5468 | 8,8126 | 6,7065 |
| 9 | С14 | 13,462 | 10,2075 | 10,9121 | 10,6315 | 13,5569 | 10,9121 | 9,1103 | 9,4767 | 7,6143 |
| 1 | С15 | 9,6852 | 9,318 | 9,2575 | 8,9045 | 10,981 | 9,2575 | 7,9060 | 7,7791 | 6,4032 |
| 1 | С16 | 5,9617 | 6,696 | 9,8080 | 9,1511 | 10,15 | 9,8080 | 7,3523 | 8,2725 | 6,3928 |
| 1 | С17 | 2,5920 | 3,76 | 7,8725 | 6,6586 | 6,627 | 7,8725 | 6,7942 | 5,5632 | 3,2984 |
| 1 | Фитан | 0,9175 | 1,68 | 7,3010 | 3,5902 | 2,764 | 7,3010 | 6,2364 | 3,1828 | 1,3887 |
| 1 | С18 | 1,4101 | 2,629 | 6,0368 | 5,5628 | 5,1 | 6,0368 | 5,1263 | 4,9620 | 3,3817 |
| 1 | Пристан | 0,6511 | 1,463 | 4,0559 | 3,8064 | 3,0861 | 4,0559 | 3,2697 | 3,4556 | 2,5273 |
| 1 | С19 | 0,7803 | 2,139 | 5,1226 | 4,6599 | 4,169 | 5,1226 | 4,4222 | 4,2337 | 3,4803 |
| 1 | С20 | 0,4110 | 1,659 | 4,3236 | 3,8863 | 2,965 | 4,3236 | 3,6375 | 3,2585 | 3,0611 |
| 1 | С21 | 0,1921 | 1,201 | 3,1886 | 2,9188 | 2,000 | 3,1886 | 2,8035 | 2,6214 | 2,3501 |
| 1 | С22 | 0,1042 | 0,95 | 2,3509 | 2,2426 | 1,248 | 2,2509 | 2,1519 | 2,0158 | 2,0816 |
| 2 | С23 | 0,0455 | 0,617 | 1,6067 | 1,4190 | 0,61 | 1,6067 | 1,4078 | 1,3158 | 1,4797 |
| 2 | С24 | 0,0277 | 0,400 | 1,1408 | 0,9670 | 0,273 | 1,1408 | 0,9633 | 0,8627 | 0,9402 |
| 2 | С25 | 0,0141 | 0,214 | 0,7005 | 0,5470 | 0,11 | 0,7005 | 0,5833 | 0,4753 | 0,6216 |
| Сумма | | 100,0000 | | 99,2203 | 100,0000 | | | | | |

В экспериментах использовались высокостабилизированные ВТЭ приведенных ниже составов:

- компонент 1 - анионные ПАВ (алкилсульфаты общей формулы), 0,48 %; неионные ПАВ (сорбитанолеат), 0,15 %;
- компонент 2 - полиолефины (поли-альфа-олефины), 0,64 %;
- компонент 3 – бетаин, 0,22 %;
- компонент 4 - нитрированное масло, 0,44 %;
- моторные масла или их промоторы, 0,072 %;

Компонент 1 вводили и перемешивали в 3,3 л воды, а остальные вводили и перемешивали в 7,5 л дизельного топлива. Полученные композиции воды, топлива сливали в общую емкость, из которой смесь в течение 3 мин прокачивали через активатор по патенту № 2550203.

Полученные параметры:

- состав: воды - 33 %, дизельного топлив Л-0,2 по ГОСТ 305 - 65 %, эмульгаторов, стабилизаторов 2 %;

- свойства: плотность 897 кг/м3, температура вспышки не ниже 67 °С, предельная температура фильтруемости в соответствии с ГОСТ 305 не выше - 5 °С, коррозию на медной пластинке по классу I не проявляет, содержание серы, определяемой по методу ГОСТ 32511-2013, соответствует норме.

Химмотологический и хроматографический анализы исходных образцов и полученных ВТЭ показали параметры, приведенные в таблице 1.

Анализ экспериментальных данных по приведенным в таблице видам топлива показывает, что доля легких углеводородов в ВТЭ (без их учета в комплексе активированного ДТ Евро и ДТ ВНИИТиН) вплоть до С15Н32 больше, чем в активированном ДТ Евро и заметно больше, чем в неактивированном ДТ.

Доля тяжелых углеводородов в ВТЭ начиная с С16Н34 заметно меньше, чем в неактивированном и в активированном ДТ Евро.

Превалирование легких и меньшее содержание тяжелых компонентов в ВТЭ, в активированном дизельном топливе, выдержанном 57 дней, имеет чрезвычайный характер и обусловливает значительное (на 20-27 %) уменьшение расхода топлив, свидетельствует о высоком качестве ВТЭ, что подтверждено стендовыми испытаниями двигателей КамАЗ-740, ЯМЗ-236 и ЗМЗ-406 в ВУНЦ ВВА ВВС МО (г. Воронеж).

Полученную 17.12.2017 г. ВТЭ выдержали до апреля 2018 г. и снова подвергли химмотологическому и хроматографическому контролю, который, как и у активированного дизельного топлива, показал неизменность свойств ВТЭ. А сравнение свойств по спектрограммам ДТ и ВТЭ показывает превосходство ВТЭ перед ДТ по разнообразию фракционного состава. Закончен также определенный этап работ оформлением технических условий «Топливная эмульсия» «ЭКО-ТопЭм стандарт 1Б зимний» ТУ 19.20.20-001-02567780-2017. Экспериментальные исследования о повышении теплотворности активированных моторных топлив подтверждены в НВ НВМТ РАН академиком Р.Ф.Ганиевым.

Таким образом, механохимия в активаторе имеет особенности в том, что под влиянием структурных состояний модифицированных топлив продолжается и за активатором. Это выражается в том, что . ввод доли активированного топлива в неактивированное заметно повышает в смеси долю активированного:

- в исходном топливе после ввода в него 10 % активированного топлива через 15 мин появились новые, более легкие углеводороды (гептан, гексан, 3-н-пентан (комплекс) в количестве 23,8%;

- в исходном топливе после ввода в него 20 % активированного топлива через 15 мин образовалось 12% комплекса вместо 5,6%;

- в исходном топливе после ввода в него 30 % активированного топлива через 15 мин образовалось 39% этого же комплекса;

Кроме того, при механохимическом действии активатора по патенту № 2550203 снижается температура воспламенения топлива, повышается скорость и полнота его сгорания. Это подтверждается более мягкой работой ДВС с меньшими динамическими нагрузками, возможностью их работы с увеличенным углом опережения зажигания, т.к. новые компоненты топлива воспламеняются уже при меньшей температуре.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены новые (феноменологические) представления о формировании топологии топливных элементов ТВЭ в процессе подготовки и активации.

2. Показана возможность разделения тяжелых топливных компонентов в предложенном активаторе

3. Экспериментально показано уменьшение доли тяжелых и увеличения доли легких топливных компонентов после механохимической активации.

4. На основе экспериментальных данных показана адекватность предложенной модели.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Государственных заданий Минобрнауки: для ИХФ РАН 49.23 тема 0082-2018-0004 номер госрегистрации темы - АААА_ А18-118031590088-8, а также для ТГТУ № 9.7746.2017/БЧ на 2017-2019 гг.*

Список используемых источников.

1. Иванов В.М. Топливные эмульсии, М.:, 1962.

2. Корягин В.А. Сжигание водотопливных эмульсий и снижение вредных выбросов. С-Пб:, 1995.

3. Завгородний Б.В. www.energy-saving-technology.com; www.energy-saving-technology.com/page-ru/ship/vmeshing-f2.html.

4. Воробьев Ю.В., Тетерюков В.Б. Патент РФ № 2294448 Способ для получения и подачи топливно-водной эмульсии в ДВС с впрыском топлива.

5. Воробьев Ю.В., Тетерюков В.Б. Патент РФ № 2300658 Способ и система получения и подачи топливно-водной эмульсии в двигатели внутреннего сгорания и удаления из штатной топливной системы неиспользованной топливно-водной эмульсии.

6. Воробьев Ю.В., Тетерюков В.Б. Патент РФ № 2306447 Способ и устройство для дозирования и приготовления топливно-водной эмульсии, подаваемой в карбюраторные ДВС.

7. Ломовских А.Е., Воробьев Ю.В., Дупляк В.П. Патент РФ № 352805 Струйно-кавитационный эжектор для приготовления водотопливной эмульсии.

8. Воробьев Ю.В., Тетерюков В.Б. Патент РФ № 2365618 Водно-топливная эмульсия.

9. Воробьев Ю.В., Тетерюков В.Б. Патент РФ № 2367683 Топливно-водная эмульсия.

10. Воробьев Ю.В., Ломовских А.Е., Басарев М.В, Дунаев А.В. Устройство для механохимической обработки и снижения расхода углеводородного топлива // Тракторы и сельхозмашины, 2015. - №1- С. 21-23.

11. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1 Деформация и разрушение/ М.: Машиностроение, 1974.- 472 с.

12. Шелохвостов, В. П. Методы и системы диагностики наномодифицированных конденсированных сред / В. П. Шелохвостов, В. Н. Чернышов. – М. : Спектр», 2013. –144 с.

13. Шелохвостов, В.П. Методы и системы диагностики наноструктурированных сред и материалов / В. П. Шелохвостов, В. Н. Чернышов. – СПб. : Экспертные решения, 2017. – 208 с.

# ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР НА СЛОИСТОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ КРИСТАЛЛЕ *GaSe*

**Сафарзаде А.А., Бахышов Р.А.**
***Азербайджан, Национальная Академия Авиации, Баку safarzade@yandex.ru***

В последнее время интерес исследователей привлекает возможность создания наноструктурированные элементы на поверхности полупроводниковых материалов. Это обусловлено возможностью варьирования их свойствами в широком диапазоне, путём изменения размеров частиц при постоянстве химического состава [1].

Электропроводность дает непосредственную информацию об электронной системе образца. Выбор нами параметров переноса тока в наноразмерных образцах обусловлен тем, что он в процессе измерения наиболее прост и в то же время является наиболее информативной характеристикой. Особый интерес к изучению электропроводности связан с тем, что большинство этих свойств наноразмерных элементов зависит от характеристик их электронной системы. Одним из привлекательных квантовых эффектов в области электропроводимости является “кулоновская блокада”, которая проявляется дискретной одноэлектронной проводимостью в малоразмерных элементах, таких как отдельные молекулы, кластеры.

Чтобы наблюдать эффект одноэлектронной проводимости, обычно исследуют не туннельные контакты, а мезоскопические островки или гранулы, у которых собственная ёмкость довольно маленькая и которые связаны с массивными металлическими берегами – «туннельными контактами» с сопротивлением, много большим квантового сопротивления.

Для того, чтобы влияние заряда одного электрона было заметным, необходимо, во-первых, чтобы энергетический масштаб был сравнимым с другими, характерными для рассматриваемого образца, масштабами энергий или например, с температурой. И, во-вторых, необходимо, чтобы образец сохранял свой заряд достаточно долго. Для этого образец должен быть хорошо изолирован от окружающей среды. В частности, электрические контакты должны быть подсоединены к такому образцу посредством туннельных контактов с малой прозрачностью [2-5].

Для получения результатов в малоразмерных объектах нами были проведены опыты по сканированию поверхности слоистых полупроводниковых кристаллов GaSe методом “атомно-силовой микроскопии + ток” (АСМ+ток). Причем на зонд подавался отрицательный и положительный потенциал в интервале от -5В до +5В с шагом около ±1В.

Процесс сканирования выбранной площади (2014 × 2014) нм$^2$ производится в режиме «АСМ+ ток» при скорости сканирования 3,70 мкм/сек. Усиление обратной связи равно 3-ём, а рабочая точка при резонансной частоте 9,7 КГц и амплитуде колебаний зонда 4, 63В составляет 0,87. $I - V$ характеристика этой системы имеет ступенчатые особенности на напряжениях,

соответствующих изменению проводимости среднего числа точек на выбранной поверхности. Такие ступенчатые особенности принято называть “кулоновской лестницей” (рис.1).

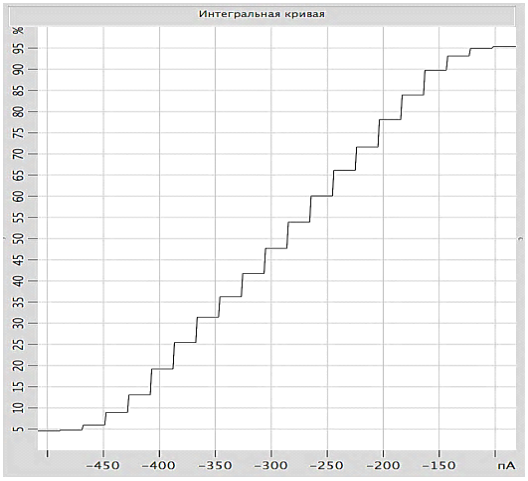
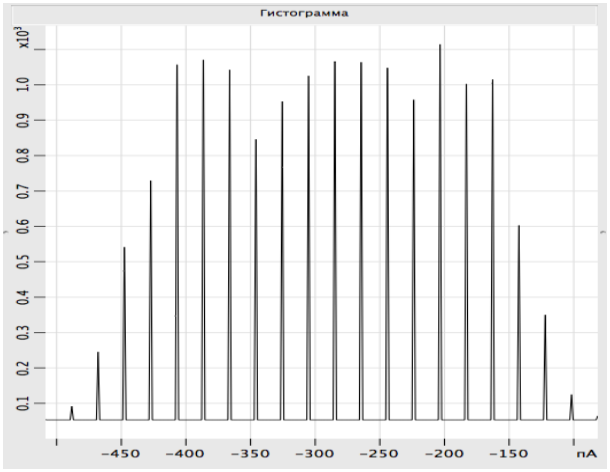
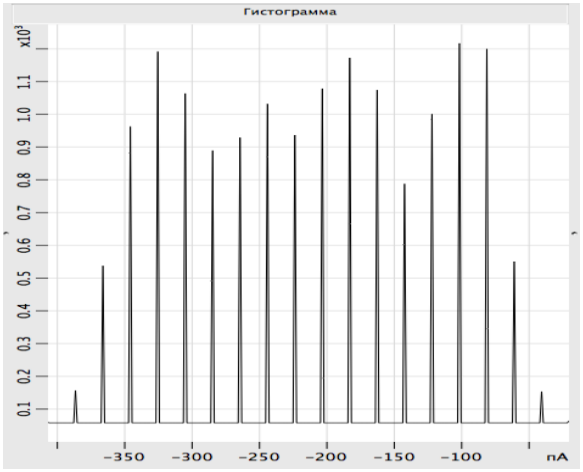



Рисунок 1. Вид “ступенчатой лестницы” интегральной кривой туннельного тока при исследовании поверхности зондовым методом «АСМ+ток».




*а*) $V = -1{,}01$В




*б*) $V = +1{,}01$В

Рисунок 2. Количественная зависимость квантованных значений тока с поверхности слоистого полупроводникового кристалла *GaSe* при постоянных инвертируемых напряжениях *а*) $V = -1{,}01$В и *б*) $V = +1{,}01$В.

Чтобы эффекты, связанные с дискретностью заряда электрона, проявились в проводимости необходимы, во первых, избежать классических тепловых переходов и, во-вторых, достаточно большое сопротивление туннельных контактов, чтобы избежать переходов, обусловленных квантовым туннелированием. Проводимость, определяемая как отношение тока к приложенному напряжению при $V \rightarrow 0$, обусловлена прохождением через образец электронов с энергией Ферми и выше. Для таких электронов вероятность туннелирования будет максимальной в том случае, когда уровень Ферми будет совпадать с одним из квантовых уровней электронов. Это соответствует условию резонансного туннелирования.

Расстояние между пиками определяется расстояниями между энергетическими уровнями энергии в образце [5, 6]. Т. о. изучение резонансного туннелирования позволяет исследовать квантованные уровни энергии электронов на поверхности.

**Выводы:** Проведены работы по исследованию приповерхностного слоя слоистого полупроводникового кристалла GaSe методом “атомно-силовая микроскопия + ток” с подачей напряжения от – 5В до + 5В. Выявлены количественные зависимости квантованных значений тока с поверхности слоистого полупроводникового кристалла *GaSe* при постоянных инвертируемых напряжениях в выше указанных интервалах.

Можно предположить, что “ступенчатая лестница” интегральной кривой туннельного тока при исследовании поверхности зондовым методом «АСМ+ток» определяет одноэлектронную проводимость при прохождении тока с зонда на приповерхностную область кристалла *GaSe*. Наличие квантованного спектра туннельного тока и совпадение ее определенных пиков, как при прямом, так и при обратном смещении, дают основания предполагать о возможности использования данной методики в исследовании квантованных энергетических взаимодействий в выбранной точке поверхности слоистого полупроводникового кристалла *GaSe* [6] в качестве одноэлектронного прибора.

Список используемых источников.

1. Обухов И. А. О возможности применения СТМ-АСМ литографии для создания новых типов квантовых приборов / Микросистемная техника. 2003, №6, с. 34-37.

2. А.П. Бахтинов, В.Н. Водопьянов, З.Д. Ковалюк, В.В. Нетяга, О. С. Литвин Электрические свойства гибридных структур (ферромагнитный металл) – (слоистый полупроводник) Ni/p-GaSe Физика и техника полупроводников, 2010, том 44, вып. 2, 180-193.

3. Пашаев А. М., Тагиев Б. Г., Мехтиев Р. Ф., Ибрагимов Р. А., Сафарзаде А. А. “Механизм модификации Ван-дер-Ваальсовой поверхности слоистых полупроводниковых кристаллов силовой зондовой микроскопией” “Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühüt və yüksək enerjilər fizikası”. IX respublika elmi-praktik konfrans. BDU, Fizika Problemləri İnstitutu, 25-26 dekabr 2015.

4. Pashayev A. M., Tagiyev B. G., Ibragimov R. A., Safarzade A. A. “Atomic-force microscopy of Van-der Waals surface of layered crystals by GaSe and GaSe<impurity>types.” Azerbaijan Journal of Physics (“Fizika”), April 2013, vol. XIX, number 1, Section: En p.p. 3-6.

5. М. В. Москалец. “Основы мезоскопической физики” Министерство образования и науки Украины. Национальный технический университет. ХПИ 2010.

6. А.М. Пашаев, Б.Г. Тагиев, Р.А.Ибрагимов, А.А. Сафарзаде. “Туннельная микроскопия слоистых кристаллов GaSe, GaS и InSe”

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И КОМПЛЕКСОВ ПРИ СНИЖЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ ВРЕДНЫХ КОМПОНЕНТ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ*

**Баронин Г.С.[1], Бузник В.М.[2], Воробьев Ю.В.[1], Соколов М.В.[1], Ассовский И.Г.[3], Кузнецов Г.П.[3] Дунаев А.В.[4], Дмитриев О.С.[1], Милованов А.В.[1], Воронин Н.В.[1], Пудовкина М.В.[5]**

***[1]-ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация, baronin-gs@yandex.ru***

***[2]-ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва, Российская Федерация, bouznik@ngs.ru***

***[3]-ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Российская Федерация, assov@chph.ras.ru***

***[4]-ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Российская Федерация, dunaev135@mail.ru***

***[5]-Главное управление МЧС России по Тамбовской области***

Потребность в повышении экономичности топливно-энергетических установок, рост цен на топливо обусловливают инновации в эксплуатации автомобильной и стационарной техники с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Из законов термодинамики следует, что для повышения энергетической эффективности двигателя внутреннего сгорания необходимо повышать максимальные температуры и давления углеводородного моторного топлива. Отсюда следует главное противоречие между термодинамической эффективностью и экологической безопасностью ДВС, т.к. повышение максимальной температуры УМТ увеличивает содержание в продуктах сгорания окислов азота, а повышение максимального давления стимулирует сажеобразование. Поэтому решение проблемы повышения энергоэффективности ДВС сводится к поиску разумного компромисса между требованиями термодинамики и экологии.

Целью настоящей работы является решение главного противоречия между термодинамической эффективностью и экологической безопасностью ДВС. В качестве такого компромисса в работе предлагается в качестве углеводородного топлива (УВТ) использовать водные композиции углеводородных топлив или механоактивированные, стабилизированные, устойчивые к расслоению воднотопливные эмульсии (ВТЭ).

Использованный нами для получения стабильной от расслоения ВТЭ и механоактивации дизельного топлива смеситель-активатор (рис. 1) содержит три последовательно установленные секции.

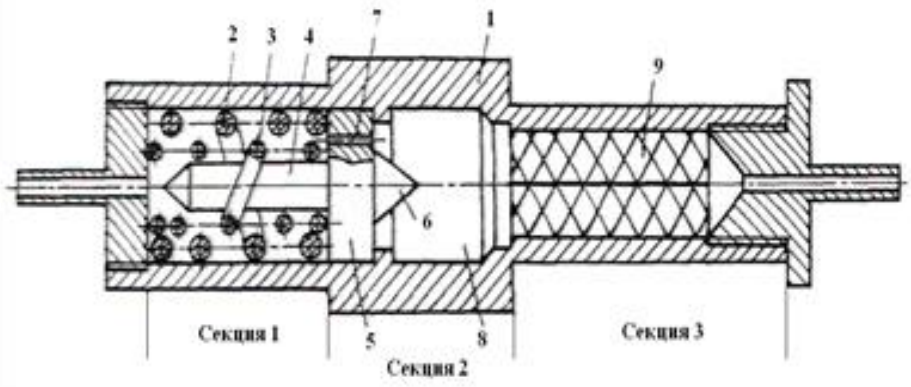



Рисунок 1. Схема активатора по патентам РФ № 2411074 и № 2550203: 1 – корпус, 2 и 3 – витые элементы, 4 – стержень, 5 – диск с микроканалами, 6 – конус стержня, 7 – микро-каналы, 8 – промежуточная камера, 9 – смеситель из перекрещивающихся решеток [1].

В первой секции осуществляется вихреобразование, во второй – кавитационное воздействие, в третьей общий поток жидкой среды разделяется на малые пересекающиеся струи и выравнивается по скорости течения на выходе из активатора.

Воднотопливная эмульсия (ВТЭ) или топливная эмульсия (ТЭ), так называемое «белое топливо», является экологически чистым моторным топливом для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), как дизельных, так и бензиновых. Наличие воды в составе ТЭ (до 30%) создает термодинамические условия горения ТЭ такими, что в выхлопных газах содержатся в большей степени $CO_2$ и $NO_2$, а не CO и NO, т.е. состав выхлопных газов при использовании ТЭ менее токсичен.

Исследователи ТамбГТУ совместно с ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН и ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» уже несколько лет работают над разработкой технологии получения экологически чистого «белого топлива».

Нами использовались высокостабилизированные ВТЭ приведенных ниже составов:

- компонент 1 - анионные ПАВ (алкилсульфаты общей формулы), 0,48 %; неионные ПАВ (сорбитанолеат), 0,15 %;
- компонент 2 - полиолефины (поли-альфа-олефины), 0,64 %;
- компонент 3 – бетаин, 0,22 %;
- компонент 4 - нитрированное масло, 0,44 %;
- моторные масла или их промоторы, 0,072 %;

Компонент 1 вводили и перемешивали в 3,3 л воды, а остальные вводили и перемешивали в 7,5 л дизельного топлива. Полученные композиции воды, топлива сливали в общую емкость, из которой смесь в течение 3 мин прокачивали через активатор по патенту № 2550203. Химмотологический и хроматографический анализы полученной ВТЭ показали такие её параметры:

- состав: воды - 33 %, дизельного топлив Л-0,2 по ГОСТ 305 - 65 %, эмульгаторов, стабилизаторов 2 %;
- свойства: плотность 897 кг/м3, температура вспышки не ниже 67 °С, предельная температура фильтруемости в соответствии с ГОСТ 305 не выше - 5 °С, коррозию на медной пластинке по классу I не проявляет, содержание серы, определяемой по методу ГОСТ 32511-2013, соответствует норме.

Сравнение составов ВТЭ и дизельных топлив, выявленных на хроматографе «Кристаллюкс 4000» в сертифицированной Тамбовской лаборатории судебно-медицинской экспертизы, показало следующее [2-3].

Таблица 1.

Сравнение содержания компонентов в ВТЭ, полученной в ТГТУ, и в дизельных топливах

| № | Компонент | Концентрация компонентов в веществах, % объемн. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ВТЭ 2018 г. | | ДТ не активированное | | | | ДТ активированное | | |
| | | 1-я | 2-я | ДТ ФГБНУ ВНИИТиН | | ДТ Рос-нефти | ДТ Евро исходное | Евро | ВНИИТиН | Через 57 дней |
| 1 | Комп-лекс | 2,0623 | 8,9733 | - | - | - | - | 18,735 | - | 31,2393 |
| 2 | | | | - | - | - | - | - | 12,4643 | 0,1744 |
| 3 | Октан | 2,4137 | 1,4548 | 0,7914 | 0,6165 | 0,4710 | 0,7914 | 0,7627 | 0,5728 | 0,4770 |
| 4 | Нонан | 5,3812 | 3,969 | 1,0773 | 2,0122 | 1,94 | 1,0773 | 0,8636 | 1,9178 | 1,4916 |
| 5 | Декан | 10,686 | 8,2844 | 1,6927 | 4,8365 | 4,17 | 1,6927 | 1,2876 | 4,3327 | 1,6204 |
| 6 | С11 | 14,748 | 11,56 | 3,7948 | 9,5619 | 7,87 | 3,7948 | 2,8221 | 7,0027 | 7,5722 |
| 7 | С12 | 13,630 | 11,10 | 7,9954 | 8,2222 | 8,859 | 7,9954 | 5,2168 | 7,4221 | 5,6975 |
| 8 | С13 | 14,828 | 11,725 | 10,191 | 9,8051 | 13,05 | 10,191 | 8,5468 | 8,8126 | 6,7065 |
| 9 | С14 | 13,462 | 10,207 | 10,912 | 10,631 | 13,556 | 10,912 | 9,1103 | 9,4767 | 7,6143 |
| 10 | С15 | 9,6852 | 9,318 | 9,2575 | 8,9045 | 10,981 | 9,2575 | 7,9060 | 7,7791 | 6,4032 |
| 11 | С16 | 5,9617 | 6,696 | 9,8080 | 9,1511 | 10,15 | 9,8080 | 7,3523 | 8,2725 | 6,3928 |
| 12 | С17 | 2,5920 | 3,76 | 7,8725 | 6,6586 | 6,627 | 7,8725 | 6,7942 | 5,5632 | 3,2984 |
| 13 | Фитан | 0,9175 | 1,68 | 7,3010 | 3,5902 | 2,764 | 7,3010 | 6,2364 | 3,1828 | 1,3887 |
| 14 | С18 | 1,4101 | 2,629 | 6,0368 | 5,5628 | 5,1 | 6,0368 | 5,1263 | 4,9620 | 3,3817 |
| 15 | Прис-тан | 0,6511 | 1,463 | 4,0559 | 3,8064 | 3,0861 | 4,0559 | 3,2697 | 3,4556 | 2,5273 |
| 16 | С19 | 0,7803 | 2,139 | 5,1226 | 4,6599 | 4,169 | 5,1226 | 4,4222 | 4,2337 | 3,4803 |
| 17 | С20 | 0,4110 | 1,659 | 4,3236 | 3,8863 | 2,965 | 4,3236 | 3,6375 | 3,2585 | 3,0611 |
| 18 | С21 | 0,1921 | 1,201 | 3,1886 | 2,9188 | 2,000 | 3,1886 | 2,8035 | 2,6214 | 2,3501 |
| 19 | С22 | 0,1042 | 0,95 | 2,3509 | 2,2426 | 1248 | 2,2509 | 2,1519 | 2,0158 | 2,0816 |
| 20 | С22 | 0,1042 | 0,95 | 2,3509 | 2,2426 | 1,248 | 2,2509 | 2,1519 | 2,0158 | 2,0816 |
| 21 | С23 | 0,0455 | 0,617 | 1,6067 | 1,4190 | 0,61 | 1,6067 | 1,4078 | 1,3158 | 1,4797 |
| 22 | С24 | 0,0277 | 0,400 | 1,1408 | 0,9670 | 0,273 | 1,1408 | 0,9633 | 90,8627 | 0,9402 |
| 23 | С25 | 0,0141 | 0,214 | 0,7005 | 0,5470 | 0,11 | 0,7005 | 0,5833 | 0,4753 | 0,6216 |
| Сумма | | 100,0000 | | 99,220 | 100,0000 | | | | | |

Из таблицы следует:

1. Доля легких углеводородов в ВТЭ (без их учета в комплексе активированного ДТ Евро и ДТ ВНИИТиН) вплоть до $C_{15}H_{32}$ больше, чем в активированном ДТ Евро и заметно больше, чем в неактивированном ДТ.

2. Доля тяжелых углеводородов в ВТЭ начиная с $C_{16}H_{34}$ заметно меньше, чем в неактивированном и в активированном ДТ Евро.

Превалирование легких и меньшее содержание тяжелых компонентов в ВТЭ, в активированном дизельном топливе, выдержанном 57 дней, имеет чрезвычайный характер и обусловливает значительное (на 20-27 %) уменьшение расхода топлив, свидетельствует о высоком качестве ВТЭ, что подтверждено стендовыми

испытаниями двигателей КамАЗ-740, ЯМЗ-236 и ЗМЗ-406 в ВУНЦ ВВА ВВС МО (г. Воронеж).

Полученную 17.12.2017 г. ВТЭ выдержали до апреля 2018 г. и снова подвергли химмотологическому и хроматографическому контролю, который, как и у активированного дизельного топлива, показал неизменность свойств ВТЭ. А сравнение свойств по спектрограммам ДТ и ВТЭ показывает превосходство ВТЭ перед ДТ по разнообразию фракционного состава [4].

В декабре 2017 г. Закончен определенный этап работ оформлением технических условий «Топливная эмульсия» «ЭКО-ТопЭм стандарт 1Б зимний» ТУ 19.20.20-001-02567780-2017 [5].

Превалирование легких и меньшее содержание тяжелых компонентов в активированном дизельном топливе и в ВТЭ и значительное уменьшение расхода топлив, прошедших активатор по патенту РФ №2550203, имеет чрезвычайный и принципиальный характер в понимании физического механизма механоактивации топлива в процессах механо-химического воздействия. Главным подтверждением механизма активации является экспериментальное определение повышения теплотворности активированного моторного топлива и ВТЭ.

Примем во внимание, что для сжигания топливо должно быть подогрето, избавлено от негорючих примесей и испарено до молекул. Далее, при подогреве должно пройти дробление углеродной цепи молекул, отделение атомов водорода, полное разделение между атомами углерода. Параллельно должна идти диссоциация молекул кислорода. Эти процессы, по-видимому, значительно облегчены в активаторе.

В итоге, если диссоциацию молекул топлива и кислорода проводить заранее, то теплота горения не будет затрачиваться на подготовку топлива и его теплотворная способность будет больше, чем определяемая для исходного неактивированного УВТ.

Наши экспериментальные исследования о повышении теплотворности активированных моторных топлив подтверждены в НВ НВМТ РАН академиком Р.Ф. Ганиевым [6-7].

Таким образом, механохимия в активаторе имеет особенности в том, что по-видимому, под влиянием долгоживущих радикалов модификация топлив продолжается и за активатором. А ввод доли активированного топлива в неактивированное заметно повышает в смеси долю активированного [2-3]:

- в исходном топливе после ввода в него 10 % активированного топлива через 15 мин появились новые, более легкие углеводороды (гептан, гексан, 3-н-пентан (комплекс) в количестве 23,8%;
- в исходном топливе после ввода в него 20 % активированного топлива через 15 мин образовалось 12% комплекса вместо 5,6%;
- в исходном топливе после ввода в него 30 % активированного топлива через 15 мин образовалось 39% этого же комплекса;

Вывод: взаимодействие активных радикалов со средой зависит не только от собственных свойств самих радикалов, но и от состояния возбужденного объекта их воздействия.

Образование активных свободных радикалов при механохимическом действии активатора по патенту № 2550203 снижает температуру воспламенения топлива, повышает скорость и полноту его сгорания. Это подтверждается более мягкой работой ДВС с меньшими динамическими нагрузками, возможностью их

работы с увеличенным углом опережения зажигания, т.к. новые компоненты топлива воспламеняются уже при меньшей температуре [3].

Таким образом, механо-химическое диспергирование с образованием радикалов уменьшает расход тепла сгорания на разрушение углеводородов. И чем длиннее их цепи, тем ощутимее может быть высвобождение энергии их связей. А в работах проф. Канарева Ф.М. отмечено [8-9], что чем больше актов воздействия механохимии, тем глубже модификация вещества.

Однако механизм существенного повышения теплоты сгорания активированных топлив по физхимии проф. Канарева Ф.М. [8] иной. Им показано, что для разрушения связей между валентными электронами атомов в цепи достаточно затратить 2,56 eV механической энергии, а для термического разрыва энергии требуется в два раза больше - 5,13 eV, т.к. каждый обособившийся электрон для своей стабильности должен получить по тепловому фотону энергией 2,56 eV.

Поэтому после механического разделения валентные электроны вместо тепловых поглощают по эфирному фотону из физического вакуума общей энергией в 5,13 eV. Поглотив по эфирному фотону, валентные электроны становятся полноценными, активными, могут восстановить свою разорванную связь и соединить части разорванных молекул. Но, соединяясь, электроны излучают поглощенные из эфира фотоны и энергонасыщают вещество той же энергией 5,13 eV.

Таким образом, затратив в механо-химии 2,56 eV, при воссоединении электронами их связей насыщают вещество энергией двух тепловых фотонов 5,13 eV или 248 кДж/моль. Выигрыш 2,56 eV или 124 кДж/моль. При разрыве же связей между несколькими атомами углеводородной цепи выигрыш может быть больше.

Из изложенного следует, что дробление механохимией углеводородов на обрывки молекул с обратимым действием валентных электронов и может быть причиной повышения теплотворной способности и уменьшения расхода топлива в ДВС.

Таблица 2.

Показатели энергии связи между атомами углерода в молекулах углеводородов

| № | Вещество | Теплота сгорания | | $Q_{c1}$, кДж/моль | $Q_1+Q_{c1}$, кДж/моль | $Q_{0c1}$, кДж/моль | $Q_{c1}-Q_{0c1}$ кДж/моль |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Q_1$, кДж/моль | кДж/г | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Графит | 393,680 | 394,1 | - | - | - | - |
| 2 | Водород | 286,020 | 123,01 | - | - | - | - |
| 3 | Метан | 890,930 | 55,73 | - | - | - | - |
| 4 | Этан | 15,60 | 51,92 | 220,98 | 1781,86 | 220,98 | - |
| 5 | Пропан | 2220,30 | 50,37 | 452,49 | 2672,79 | 441,96 | 10,53 |
| 6 | Бутан | 2880,26 | 49,61 | 683,46 | 3563,72 | 662,94 | 20,52 |
| 7 | Пентан | 3511,50 | 48,73 | 943,15 | 4454,65 | 883,72 | 59,43 |
| 8 | Гексан | 4165,82 | 48,40 | 1179,76 | 5345,58 | 1104,9 | 74,85 |
| 9 | Гептан | 4820,39 | 48,19 | 1416,12 | 6236,51 | 1325,88 | 90,24 |
| 10 | Октан | 5474,41 | 47,97 | 1653,03 | 7127,44 | 1546,86 | 106,17 |
| 11 | Декан | 6783,16 | 47,72 | 2126,14 | 8909,30 | 1988,82 | 137,34 |

В таблице обозначены:

$Q_1$ – стандартная теплотворная способность топлив по справочным данным, кДж/моль,

$Q_{c1}$ – энергия связи атомов углерода в углеводородной цепи [11], кДж/моль,

$Q_{oc1}$ - энергия связи только двух одиночных атомов углерода [11], кДж/моль.

Из таблицы видно, что с удлинением углеводородных цепей энергия связей в них увеличивается, а отсюда массовая теплотворность топлив уменьшается.

Возможно, что описанные процессы могут происходить и при разрыве кластеров молекул, связей между атомами водорода и углерода.

Все эффекты, связанные с повышением давления сгорания топлив в закрытых камерах сгорания ДВС формируются не газами, а фотонами. А объёмы световых фотонов, излучаемых электронами в реакциях предварительно диссоциированных молекул, в 100 000 раз больше объёмов их источников - электронов, а попутно излучаемые невидимые инфракрасные фотоны в 10, 20.... 100 раз больше объема световых фотонов [8]. Отсюда следует, что уменьшение расхода моторных топлив обусловлено как их преобразованиями в активаторе, так и процессами в камерах сгорания ДВС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрена проблема повышения энергетической эффективности функционирования стационарного и автомобильного транспорта с двигателями внутреннего сгорания при снижении содержания вредных компонент в выхлопных газах. Показано, что решение этой проблемы возможно с помощью применения водных композиций углеводородных топлив (воднотопливных эмульсий) ВТЭ.

2. Апробирована усовершенствованная технология приготовления высокостабильных ВТЭ на основе дизельного топлива, использующая комбинированный универсальный статический смеситель-активатор (патент РФ №2550203), а также малые добавки стабилизаторов-эмульгаторов.

3. Экспериментально установлено, что получаемые ВТЭ сохраняют свою структуру и физико-химические свойства в течение достаточно продолжительного периода времени хранения (свыше 3-х месяцев).

4. Экспериментально установлен механизм существенного повышения теплоты сгорания, уменьшения расхода активированного топлива и ВТЭ, снижения температуры воспламенения топлива, повышение скорости и полноты его сгорания, подтверждается более мягкой работой с меньшими динамическими нагрузками ДВС.

5. Механохимические процессы в активаторе имеют особенности в том, что под влиянием долгоживущих радикалов модификация топлив продолжается и за активатором. А ввод доли активированного топлива в неактивированное заметно повышает в смеси долю активированного.

6. Выполнен сравнительный теоретический анализ физико-химических и др. аналитических подходов изучения механизма повышения теплотворной способности и уменьшения расхода активированных топлив и ВТЭ по результатам исследования ведущих отечественных специалистов в данной области – академика Р.Ф. Ганиева, профессора Канарева Ф.М., профессора Ю.В. Воробьева, профессора В.Т. Грумондза и др.

7. Основной вывод. Механохимическое диспергирование УВТ в активаторе с образованием активных радикалов повышает теплотворную способность и уменьшает расход топлива в ДВС. Под влиянием долгоживущих радикалов модификация топлива продолжается и после выхода из активатора. Все указанные эффекты обусловлены как их преобразованием в активаторе, так и процессами в камерах сгорания ДВС.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Государственных заданий Минобрнауки:*

*для ИХФ РАН 49.23 тема 0082-2018-0004 номер госрегистрации темы - АААА_ А18-118031590088-8, а также для ТГТУ № 9.7746.2017/БЧ на 2017-2019 гг.*

Список используемых источников.

1. Воробьев Ю.В., Воробьев Ю.Ю. Патент РФ № 2550203. Комбинированный универсальный статический смеситель-активатор.

2. Воробьёв Ю.В., Кузьмин А.П. Химические процессы в органических жидкостях, инициируемые гидродинамическим активатором. Вестник ТГТУ, 2012. Т. 18. № 4. С. 905-911.

3. Vorobyov Yu. V., Baronin G. S., Dunaev A. V., Stavrev, D., Dimitrov, D., Dimitrov R., Voronin N.V., Vorobyov Yu. Yu., Kuznetsov G. P., Assovskiy I. G. // Unique in composition, stable water-fuel emulsion. // Advanced Materials & Technologies, №2, Tambov, 2019, ppg. 32-40.

4. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 13 с.

5. Топливная эмульсия. Технические условия «ЭКО-ТопЭм стандарт 1Б зимний» ТУ 19.20.20-001-02567780-2017.

6. Ганиев Р.Ф. Разработка научных основ приготовления устойчивых водотопливных эмульсий и их эффективного сжигания в топках котлов на принципах нелинейной волновой механики. Отчет о НИР № 02.516.11.6072 от 25.06.2007 (Министерство образования и науки РФ). Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 2. С. 215-218.

7. Ганиев Р.Ф., Шмырков О.В., Рудаков В.П. Образование и устойчивость существования зон эмульгации жидкости в восходящем закрученном потоке газа в проточном вихревом газодинамическом генераторе. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 85-92.

8. Канарев Ф.М. Начала физхимии микромира. Восьмое издание. - Краснодар, КубГАУ, 2007. - 753 с. (www.micro-world.su/index.php/2012-03).

9. Канарев Ф.М. Теоретические основы физ. химии нанотехнологий. 2-е издание. - Краснодар: 2008.- 675 с (www.micro-world.su/index.php/2012-03).

10. Грумондз В.Т. Нанотехнологии обработки углеводородных жидкостей, основанные на использовании физико-химических явлений, происходящих на границах фаз и при фазовых переходах в условиях пузырьковой кавитации В кн. Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (5), с. 2120-2122.

11. Воробьёв Ю.В. Основы теории механоактивации жидких сред. Вестник Тамбовского государственного технического университета.- Тамбов.- Изд-во Тамбовского государственного технического университета. - 2013. - Т. 19. - № 3. - С. 608-613.

12. Воробьев Ю.В., Килимник А.Б., Дунаев А.В. Снижение расхода топлива автотракторными ДВС приемами механохимии. // Автомобильная Промышленность. - 2015. - № 10.- С. 21-22.

13. Днепровский К.С. Механохимические превращения углеводородов нефти.: Автореф. дис. к.х.н: 02.00.13. Томск.: ИХН СО РАН, 2003.- 24 с.

14. Твердофазная технология переработки СВМПЭ-нанокомпозитов в изделия и механохимические процессы в углеводородном топливе с использованием гидродинамического механоактиватора. / Г.С. Баронин, В.М. Бузник, А.М. Столин, Ю.В. Воробьев, Н.В. Ушаков, С.В. Мищенко, В.М. Дмитриев, О.С. Дмитриев, М.В Сычев, Н.В. Воронин // Труды XV Всероссийской с международным участием школы-семинара по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова, Черноголовка, 2017. – С.26-31.

15. Формирование структурно-механических свойств материалов и изделий из СВМПЭ-нанокомпозитов функционального и конструкционного назначения в условиях твердофазной технологии. / Г.С. Баронин, Ю.В. Воробьев, Н.В. Ушаков, М.Б. Корнев, С.К. Цветаев, В.Б. Голубчиков, В.В. Худяков, М.В. Сычев, Н.В. Воронин // Материалы 8-й Международной конференции SPACE-2017 «Космический вызов XXI века. Перспективные материалы, технологии и приборы для космических экспедиций», Адлер 2017 – С. 49-53.

# ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА РЕЖИМЫ ПОДГОТОВКИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ С УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗОЙ $NI_3(AL,TI)$*

**Валитов В.А.**
***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки***
***Институт проблем сверхпластичности металлов РАН***
***г. Уфа, Valitov_VA@mail.ru***

**Аннотация**

На большом круге сплавов на никелевой основе проведены систематические исследования, которые позволили выявить оптимальные условия осуществления горячей и теплой пластической деформации, обеспечивающие трансформацию исходной крупнозернистой структуры в ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру дуплексного типа с заданными параметрам. Показано, что температурная область развития динамической рекристаллизации, в ходе которой формируется УМЗ структура типа микродуплекс, с увеличением содержания γ′- фазы возрастает и коррелирует с изменением температуры полного растворения γ′- фазы.

**Введение**

Для изготовления различных деталей авиадвигателей и наземных энергетических установок широко используются жаропрочные сплавы на основе никеля, где их весовая доля превышает 50%. [1,2]. Традиционно проблема повышения жаропрочных характеристик решалась главным образом путем разработки более сложных композиций никелевых сплавов, производство которых осуществлялось преимущественно с использованием новых методов, таких как порошковая металлургия, а также путем усовершенствования существующих технологических процессов [3,4]. Однако внедрение новых более высокожаропрочных сплавов привело к резкому снижению технологической пластичности и увеличению трудоемкости их обработки [5]. По этой причине в наступившем 21 веке одной из наиболее актуальных для современного авиакосмического двигателестроения и энергетического машиностроения остается проблема разработки и внедрения новых ресурсосберегающих технологий производства деталей из никелевых сплавов с заданными свойствами, предназначенными для их использования при повышенных температурах эксплуатации.В значительной степени проблема повышения технологической пластичности может быть решена за счет разработки и широкого внедрения новых технологических процессов, основанных на использовании эффекта структурной СП, что позволяет существенно повысить коэффициент использования металла и снизить себестоимость изготовления деталей сложной формы, особенно крупногабаритных [5,6]. «Геторайзинг-процесс» [6], созданный в 1970г. в США, стал одним из наиболее значимых этапов на пути промышленного внедрения эффекта СП в технологические процессы обработки труднодеформируемых сплавов на основе никеля, изготовленных как по традиционной технологии, так и методом порошковой металлургии. В нашей стране также были достигнуты значительные успехи в разработке процессов получения крупногабаритных СП полуфабрикатов из деформируемых сплавов [1,6]. Однако, применительно к порошковым сплавам типа ЭП741 НП, производимым только с использованием метода горячего изостатического прессования , до сих пор не нашла практического

применения обработка в СП состоянии, которая могла бы существенно повысить качество деталей и обеспечить достижение в них повышенного уровня технологических и эксплуатационных свойств [7÷11]. Высокие гомологические температуры СП деформации промышленных никелевых сплавов, большая трудоемкость получения в горячепрессованных прутках УМЗ структуры, а также необходимость в применении дорогостоящей штамповой оснастки из молибденовых сплавов, для эксплуатации которых необходима защитная атмосфера или вакуум, являлись сдерживающими факторами для промышленного внедрения ресурсосберегающих технологий, основанных на использовании эффекта СП [5,6].

Сложный химический и фазовый состав современных никелевых сплавов в значительной степени затрудняют изучение закономерностей процессов структурообразования, происходящих во время пластической деформации в широком температурно-скоростном интервале, поскольку процессы выделения основной упрочняющей фазы и рекристаллизации оказывают взаимное влияние [1,2,5,12-17]. К моменту постановки работы в научной литературе недостаточно было систематических исследований о закономерностях структурообразования в никелевых сплавах с различным фазовым составом при горячей деформации в двухфазной области. Из-за ограниченности объема статьи не представляется возможным проведение детального анализа известных механизмов фомирования дуплексной структуры при горячей деформации.

Цель работы - установление общих закономерностей влияния режимов деформационно-термической обработки и количества упрочняющей γ′-фазы на формирование УМЗ структуры типа микродуплекс в дисперсионно-твердеющих никелевых сплавах.

**Материалы и методики исследований**

Для установления общих закономерностей формирования при горячей деформации регламентированных структур, в частности, типа микродуплекс, в течение длительного периода (более 30лет) проводились систематические исследования широкой гаммы никелевых сплавов (табл.1.), существенно различающихся по химическому и фазовому составу, а также отличающихся по способу из производства:

- ✓ низколегированные (14% γ′-фазы) ЭИ437БУ;
- ✓ среднелегированные (25-35% γ′-фазы) ЭИ698-ИД и ЭП742-ИД и их зарубежные аналоги - Waspaloy и Rene88 (литой).
- ✓ высоколегированные (45-55%) ЭП962, ЭП975,
- ✓ гранульные ЭП741НП и Astroloy, изготовленные методом порошковой металлургии.

Перед деформацией образцы из исследуемых материалов, вырезанных из горячепрессованного прутка, подвергали высокотемпературному нагреву до однофазной области и последующему охлаждению с печью со скоростью 20÷30° С/ч до температуры старения сплавов, далее на воздухе. Образцы диаметром 8÷10 мм и высотой 12÷15 мм осаживали на установке 1231У-10 в изотермических условиях при l000÷1200° С со степенями от 5 до 75% и скоростями деформации $10^{-5}$ - $10^{-1}$ $с^{-1}$. Выдержка образцов при температуре испытаний перед деформацией составляла 20÷30 мин. Микроструктуру деформированных образцов изучали методами оптической, растровой и просвечивающей и электронной микроскопии.

Таблица 1.

Химический состав жаропрочных никелевых сплавов

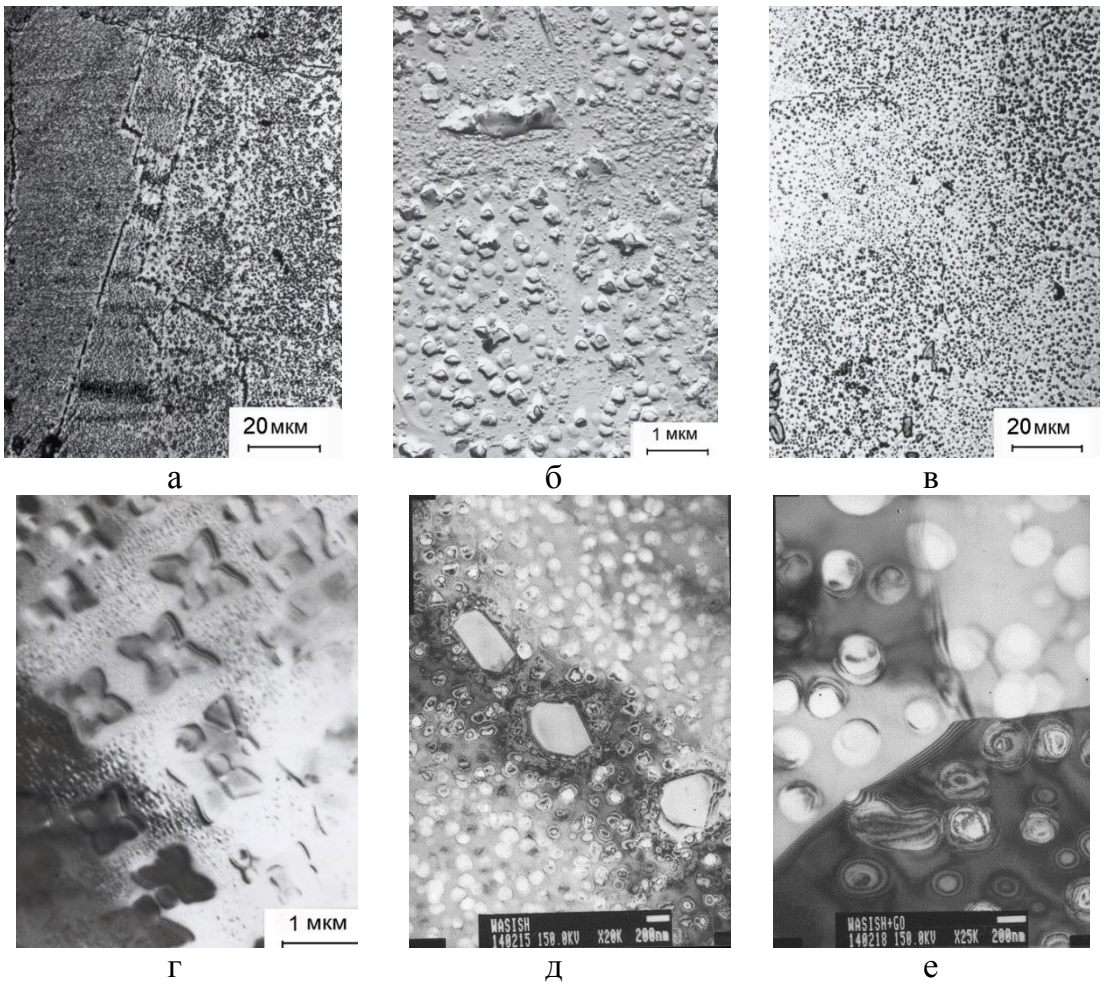
| | Содержание элементов, % вес. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| СПЛАВ | C | Cr | Co | W | Mo | Al | Ti | Nb | Ni |
| ЭИ437 | 0.06 | 19.8 | - | - | - | 0.8 | 2.8 | | основа |
| ЭИ698 | 0.06 | 14.4 | - | 0.1 | 3.0 | 1.5 | 2.5 | 2.1 | основа |
| Waspaloy | 0.06 | 19 | 13 | - | 4.2 | 1.3 | 2.9 | - | основа |
| ЭП742 | 0.04 | 14.1 | 10.1 | - | 5.0 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | основа |
| Rene88 | 0.03 | 15.1 | 13.5 | 5.2 | 5.0 | 2.2 | 3.7 | 1.3 | основа |
| ЭП962 | 0.1 | 13.1 | 10.7 | 2.8 | 4.6 | 3.2 | 2.6 | 3.4 | основа |
| Rene95 | 0.08 | 13.3 | 8.7 | 4.3 | 3.9 | 3.3 | 2.4 | 3.9 | основа |
| Astroloy | 0.06 | 15 | 17 | - | 5.3 | 4.0 | 3.5 | - | основа |
| ЭП741НП | 0.04 | 9.3 | 15.7 | 5.4 | 4 | 5.2 | 1.8 | 2.7 | основа |
| ЭП975 | 0.08 | 8.4 | 15.8 | 10.3 | 1.0 | 4.7 | 2.2 | 1.6 | основа |

**Результаты исследования и их обсуждение**

На предварительной стадии интенсивной деформационно-термической обработки (ДТО), как было показано ранее в работе [18] на примере никелевого сплава ЭП962, проведение предварительного гетерогенизирующего отжига (ГО) способствует созданию наиболее благоприятных условий для последующей рекристаллизации с формированием структуры микродуплексного типа. В этой связи представляло интерес исследование влияния химического состава и, прежде всего, содержания основных γ′–образующих элементов Al и Ti на параметры γ′–фазы, ее морфологию и распределение после ГО, проводимого посредством нагрева до однофазной γ–области и последующего замедленного охлаждения с печью со скоростью 25-30$^{o}$/час. до температуры начала растворения $t_{pr}$ исследуемых никелевых сплавов [12].

Анализ исходных микроструктур изученных сплавов после ГО показал, что в крупнозернистой матрице сплавов выделилась скоагулированная γ′-фаза в количестве, близком к максимальному (Рис. 1.и 2). При этом установлено, что с увеличением количества γ′ -фазы в никелевых сплавах, которое зависит от суммарного содержания основных γ′-образующих элементов Al и Ti, размер выделяемых в процессе ГО частиц γ′-фазы возрастает, а межчастичное расстояние уменьшается (Рис. 3). Следует отметить, что морфология частиц γ′-фазы в низколегированных сплавах типа Waspaloy имеет преимущественно сферическую форму. В то же время для более легированных сплавов типа ЭП742 и ЭП975 форма частиц γ′-фазы преимущественно кубоидная.

По результатам исследования влияния ГО на микроструктуру никелевых сплавов можно заключить, что средний размер и объемная доля γ′-фазы, выделившихся в процессе замедленного охлаждения с одной и той же скоростью 20-30°/час. пропорциональны количеству в сплавах γ′-фазы и в частности содержанию основных γ′-образующих элементов Al и Ti . Причем малый размер выделений γ′-фазы в низколегированных сплавах ЭИ437 и ЭИ696 (0,2÷0,31 мкм), по-видимому, связан не только с незначительным содержанием Al и Ti, но и малой величиной их соотношения, поскольку атомы титана с большим атомным радиусом, чем у алюминия обладают меньшей диффузионной подвижностью и тем самым замедляют процесс выделения и коагуляции частиц γ′-фазы [12].




а б в

г д е

Рисунок 1. Микроструктура никелевых сплавов после предварительного ГО: а, б -ЭИ437; в, г - ЭИ698; д, е – Waspaloy (д – исходное состояние; е –после ГО).

Формирование в средне и высоколегированных сплавах ЭП742, ЭП962 и ЭП975 более крупных частиц γ′-фазы объясняется большей степенью пересыщенности матрицы, увеличением отношения Al и Ti и объемной доли γ′-фазы, которые способствуют возрастанию скорости роста и выделения частиц γ′-фазы, начало выделения которых происходит при более высоких гомологических температурах. При нагреве под горячую деформацию в сплавах протекают процессы растворения γ′-фазы и уменьшения ее объемной доли до равновесной для заданной температуры, растворения мелких и коагуляция более крупных частиц γ′-фазы. В целом в сплавах преобладают микроструктурные изменения, аналогичные, описанным в работе [18].

Существенные отличия в микроструктуре сплавов после ГО отжига предопределили значительные различия в сопротивлении деформации и характере формируемой УМЗ структуры. Зависимости сопротивления деформации $\sigma_{40}$ (напряжение течения σ при деформации на 40%) при изотермической осадке в широком температурно-скоростном интервале представлены на рис. 4 и 5. Как видно на рис. 4 с повышением гетерогенности структуры (увеличением количества γ′−фазы) возрастает сопротивление деформации. С ростом температуры деформации в γ′+γ−области напряжение течения сплавов монотонно уменьшается, а при дальнейшем увеличении температуры выше $t_{s\gamma'}$ разница в уровне напряжения течения сплавов с различным химическим составом уменьшается и при

температуре 1200°С уровень напряжения течения становится практически одинаковым для всех сплавов.

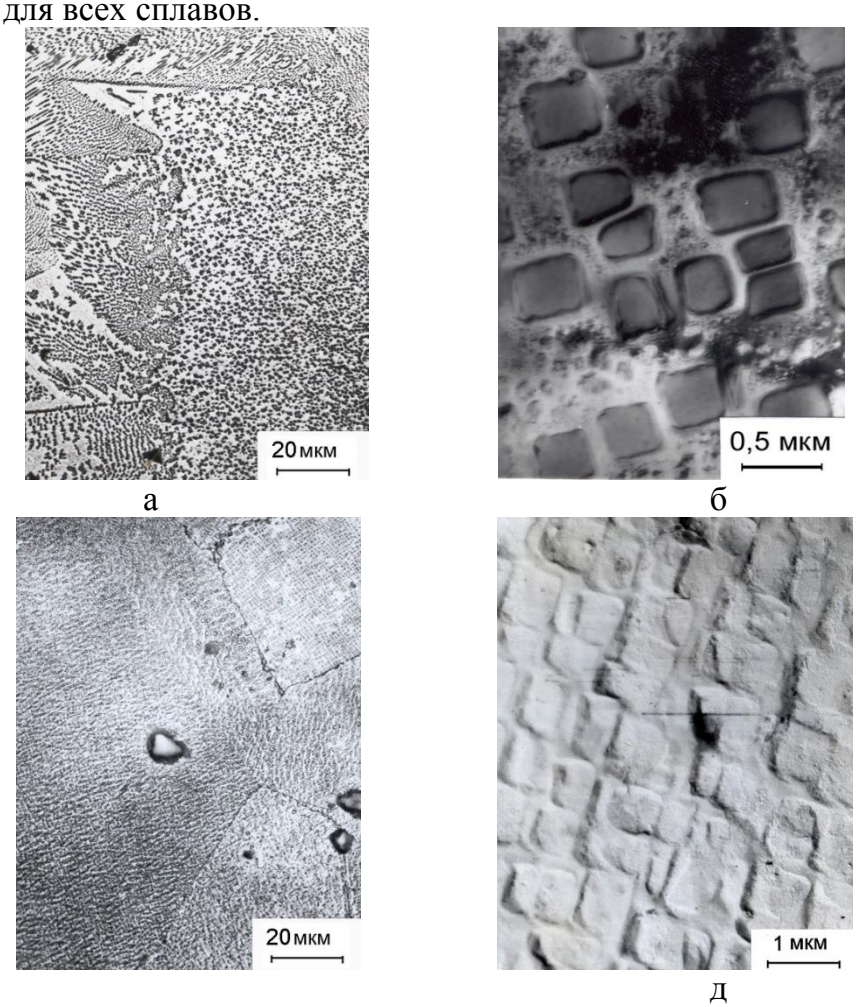



Рисунок 2. Микроструктура никелевых сплавов после предварительного ГО: а, б - ЭП742; в, г - ЭП975.

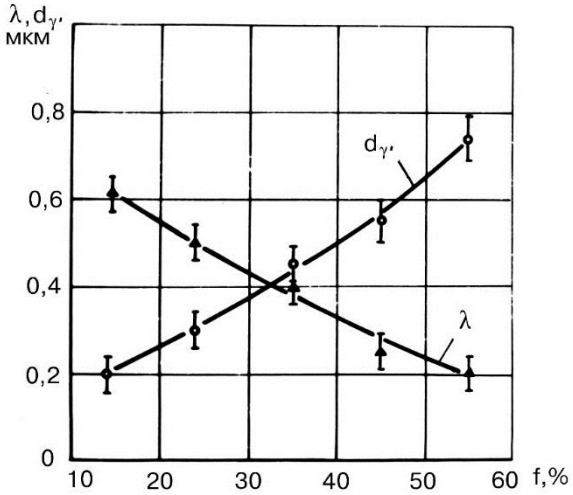
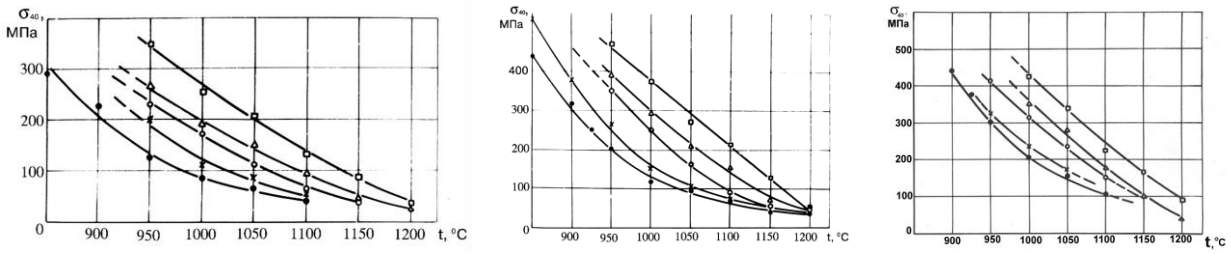
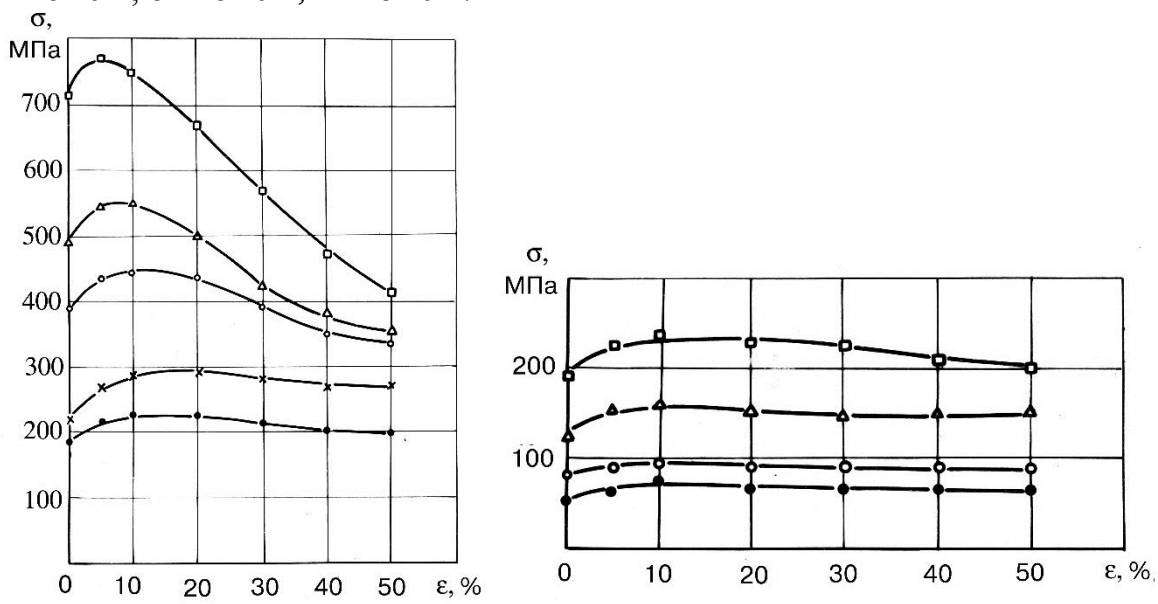



Рисунок 3. Зависимости изменения размера частиц γ′-фазы ($d_{\gamma'}$) и межчастичного расстояния (λ) от максимального количества γ′-фазы, выделяемой в никелевых сплавах.




а б в

Рисунок 4. Зависимости напряжения течения $\sigma_{40}$ от температуры и скорости деформации никелевых сплавов с крупнозернистой структурой: а - $10^{-3}$ с $^{-1}$; б - $10^{-2}$ с $^{-1}$; в - $10^{-1}$ с $^{-1}$.




а б

Рисунок 5. Зависимости напряжения течения никелевых сплавов от температуры и степени деформации: а - 950$^{o}$С; а,б - $\varepsilon=10^{-2}$ с $^{-1}$; б – 1100 $^{o}$С ,

• - ЭИ437, x- ЭИ698, o - ЭП742 , Δ - ЭП962 , □ - ЭП975

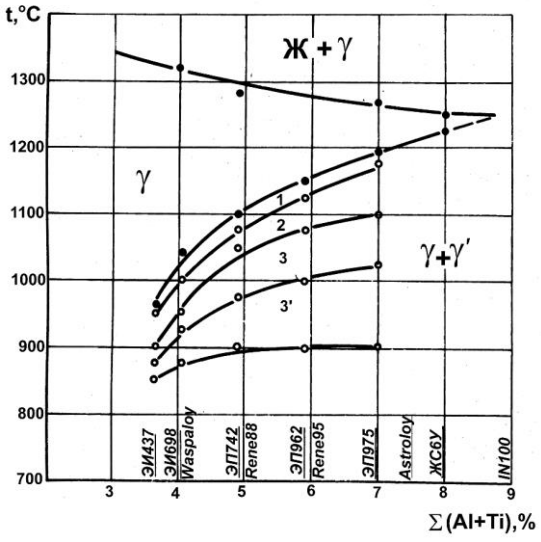
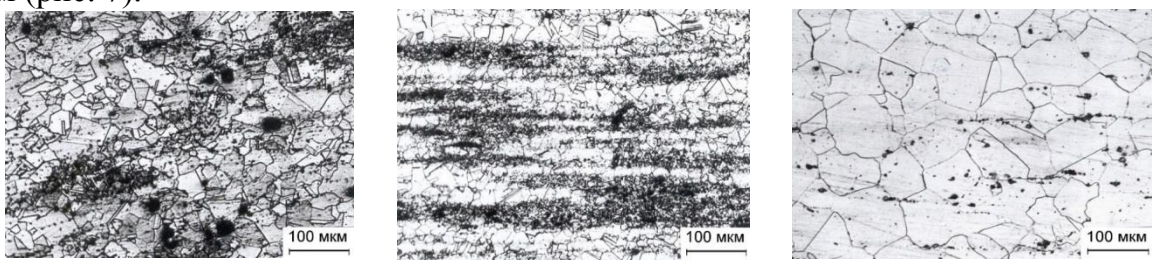



Рисунок 6. Температурные области формирования УМЗ микроструктур в жаропрочных никелевых сплавах в зависимости от содержания Al и Ti: 1 - микроструктура матричного типа, 2,3,3′ - микроструктура микродуплексного типа.

Следует отметить, что с увеличением степени легированности и содержания γ′−фазы в сплавах при одних и тех же температурно-скоростных условиях деформации значения деформационного упрочнения и уровень напряжения течения возрастают. В то же время достижение одинакового уровня напряжения течения в γ′+γ−области, например, $\sigma_{40}$ =250 МПа при $\dot{\varepsilon}=10^{-2}c^{-1}$ при повышении содержания в сплавах γ′−фазы обеспечивается при более высоких температурах. При этом отношение температуры деформации к $t_{s\gamma'}$ сплавов заметно уменьшается.

Изучение микроструктурных изменений после деформации сплавов с крупнозернистой структурой, а также анализ результатов ранее проведенных исследований [12,18,19] свидетельствует, что для них характерны общие закономерности формирования УМЗ структур. В зависимости от температурно-скоростных условий деформации могут быть получены различные микроструктурные состояния, температурные области формирования которых в исследуемых сплавах приведены на рис. 6.

При температурах деформации, равных или превышающих $t_{s\gamma'}$ в сплавах образуется динамически рекристаллизованная микроструктура матричного типа с размером зерен γ−фазы обычно не менее 20÷30 мкм. Более мелкозернистая матричная микроструктура с размером зерен γ−фазы менее 15 мкм может быть получена в области 1, однако она неустойчива и даже при кратковременной задержке более 1 мин**.** в горячей зоне деформации укрупняется до размера 20÷40 мкм (рис. 7).




а б в

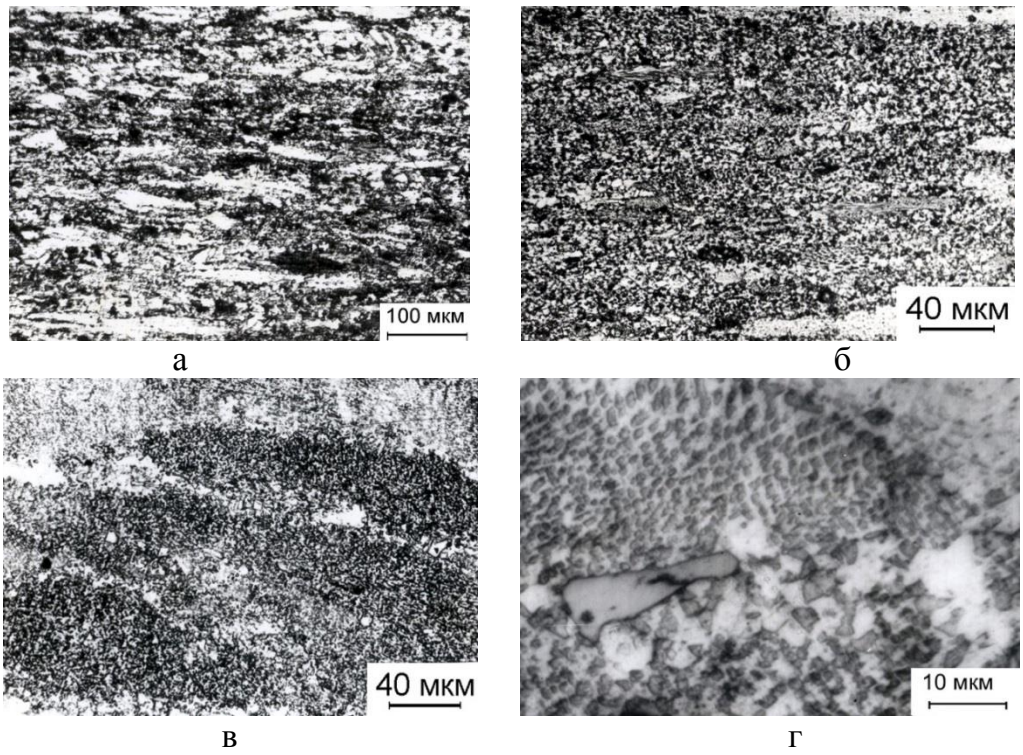
Рисунок 7. Микроструктура никелевых сплавов после деформации в области 1: $\varepsilon=10^{-2}$ с $^{-1}$, ε=70÷75%, а - ЭИ437, 1000°С; б - ЭП742, 1100°С; в - ЭП962, 1150°С.

УМЗ структура типа микродуплекс образуется в результате динамической рекристаллизации в области 2, причем доля рекристаллизованного объема (микродуплексной составляющей) после деформации на 65÷75% составляет не менее 25÷40% (рис. 8). С повышением степени легированности сплавов наблюдается тенденция к расширению данной области. В то же время при средних значениях температур в области 2 относительные значения отношения объемной γ′−фазы к среднему размеру частиц γ′−фазы после ГО отжига для всех сплавов приблизительно одинаковы и составляют 0,33.

В области 3 после разовой деформации на 75% динамическая рекристаллизация развивалась лишь по границам исходных зерен, а внутри зерен формировалась динамически полигонизованная микроструктура (рис. 9). Доля микродуплексной составляющей не превышала 10÷20%. Существенное увеличение рекристаллизованного объема до 50% и более в этой области достигалось в случае примения дробной деформации за 2-перехода с последеформационными отжигами.

Длительность отжига зависела от температуры и возрастала с уменьшением последней. В частности, для сплава ЭП742 она составляла 4 и 16 час. при температурах 1050 и 1000°С соответственно. Между тем в сплаве ЭИ698 время

отжига при 950÷900°С составляло 8÷16 час. Выдержка свыше 24 час. существенного прироста рекристаллизованного объема не дает и невыгодна с технологической и экономической точек зрения. В результате отжига при температурах на 50÷25° ниже $t_{s\gamma'}$ доля рекристаллизованного объема в образцах составляла не более 80-95%, а при более низких температурах на 100÷150°С ниже $t_{s\gamma'}$ менее 70÷75%.




а б в г

Рисунок 8. Микроструктура никелевых сплавов после деформации в области 2: $\varepsilon=10^{-2}$ с $^{-1}$, $\varepsilon$=60...75%; а - ЭИ437, 925°С; б - ЭП742, 1050°С ; в, г - ЭП975, 1150 °С.

Параметры получаемой микроструктуры типа микродуплекс существенным образом зависят от природы сплава. С усложнением химического состава сплавов и увеличением содержания в них Al и Ti возрастает в сплавах объемная доля γ′–фазы, при этом значительно изменяется соотношение размеров γ′и γ′–фаз (рис. 3). Если в сплаве ЭИ437 соотношение средних размеров γ′и γ′–фаз составляет 8, то в сплаве ЭП975 разница уменьшается до 1,5÷3 , т.е. зерна γ′и γ′–фаз становятся соизмеримыми по размерам. Вместе с тем объемное соотношение γ′и γ′–фаз в сплаве ЭИ437 составило 10:1, в то время как в сплаве ЭП975 оно близко к 1:1.

Важно отметить, что длительный последеформационный отжиг в течение 50÷100 час. приводит к существенным изменениям микроструктуры, которые могут оказать неблагоприятное влияние на СП свойства материала. Было выявлено, что длительный отжиг при 1100°С в течение 100 час. сплава ЭП962 с микродуплексной структурой приводит к укрупнению зерен γ–фазы до 10÷20 мкм и образованию скоплений γ′–фазы из крупных (размером до 5÷10 мкм ) частиц-зерен.

Итак, обнаружено, что с усложнением химического состава и увеличением γ′-фазы повышается степень гетерогенности структуры, которая вызывает значительное увеличение сопротивления деформации и снижение пластичности. Вследствие этого повышается температура обработки для получения УМЗ

структуры. Показано, что температурная область развития динамической рекристаллизации, в ходе которой формируется УМЗ структура типа микродуплекс, с увеличением содержания γ′- фазы возрастает и коррелирует с изменением температуры полного растворения γ′- фазы. Например, для малолегированных сплавов, содержащих менее 25% γ′- фазы, температурный интервал получения УМЗ структуры микродуплексного типа составляет $0,65 \div 0,71 T_{пл}$ , а для средне (35%) и высоколегированных (55%) повышается до $0,8 \div 0,85 T_{пл}$. На основании приведенных выше результатов при участии автора был разработаны способы [20,21] подготовки УМЗ структуры типа микродуплекс, сущность которых заключалась в дробной деформации с поэтапным снижением температуры деформации и последующих отжигов. При этом предварительное измельчение микроструктуры осуществляли за счет обработки во 2 или 3 области, в результате которой формировалась микродуплексная структура с достаточно крупным размером зерен γ и γ′ -фаз и долей рекристаллизованного объема не менее 30%. Последующая деформация в области 3 и длительный отжиг в течение 8÷16 час. позволили получить практически во всем объеме материала микродуплексную микроструктуру с более мелким размером зерен γ -фазы, чем в областях 2. и 3 (Рис. 10). Величина допустимой степени деформации до образования на поверхности образцов первой трещины существенно зависит от температурных условий обработки. В температурной области 1 (рис. 7) в исследуемых сплавах наблюдается наибольшая пластичность. Допустимая степень деформации при этих температурах осадки в интервале скоростей $10^{-3}$- $10^{-1}$ $с^{-1}$ достигает 80÷90%. В области *2* первые трещины на поверхности образцов начинают образовываться при деформации на степень 60÷80%. В области 3 разовая степень деформации не превышает 40÷55%, а в области 3 она менее 35%. Уменьшение скорости деформации до $10^{-5}$ - $10^{-4}$ $с^{-1}$ способствует повышению допустимой степени деформации на 10÷20% по сравнению со скоростью $10^{-3}$ $с^{-1}$ , а увеличение скорости до $10^{-2} \div 10^{-1}$ $с^{-1}$, наоборот, снижению на 20÷30% .

Эффективность данного способа наглядно иллюстрируется на примере жаропрочного сплава ЭП962, в котором благодаря поэтапному снижению температуры деформации и отжигов с 1100°С (область 2) до 1050°С (область 3 ) и далее до 975°С (область 3 ) удалось не только существенно измельчить размер зерен γ и γ′ -фаз соответственно с 5,5 и 2,5 мкм (область 2 ) до 2,5 и 1,3 мкм (область 3) но и значительно снизить уровень напряжения течения исходного крупнозернистого материала, деформированного непосредственно в области 3.

Анализ приведенных в данном разделе результатов свидетельствует, что усложнение химического состава сплавов и соответственно увеличение количества γ′-фазы для одних и тех же температурно-скоростных условий обработки способствует повышению сопротивления деформации и снижению пластичности. Вследствие этого необходим рост температур обработки для получения УМЗ структуры типа микродуплекс. Если в сплавах ЭИ437 и ЭИ698, содержащих менее 25% γ′ -фазы, температурный интервал для получения микродуплексной структуры соответствует $0,71 \div 0,77$ $T_{п.р.\gamma'}$, а в сплаве ЭП742,содержащем 35% γ′-фазы, он соответствует $0,83 \div 0.85$ $T_{п.р.\gamma'}$ , то для сплавов ЭП962 и ЭП975 подготовку УМЗ структуры необходимо вести при $0,87 \div 0,92$ $T_{п.р.\gamma'}$ .

Как видно на рис. 7 ÷ 9 при одних и тех же температурно-скоростных условиях деформации в сплавах с разным содержанием γ′ -фазы протекают различные рекристаллизационные процессы, которые приводят к формированию соответствующих микроструктурных состояний. Например, в результате деформации на 75% при температуре 1050°С (рис. 7 ÷ 9) в сплавах ЭИ437 и ЭП742

протекают динамическая рекристаллизация с формированием микроструктуры соответственно матричного и микродуплексного типа. В то же время в сплаве ЭП962 микродуплексная структура образуется преимущественно в приграничных областях, а в более легированном сплаве ЭП975 при данной температуре рекристаллизация не наблюдается, а внутри теплодеформированных зерен формируется субзеренная структура.

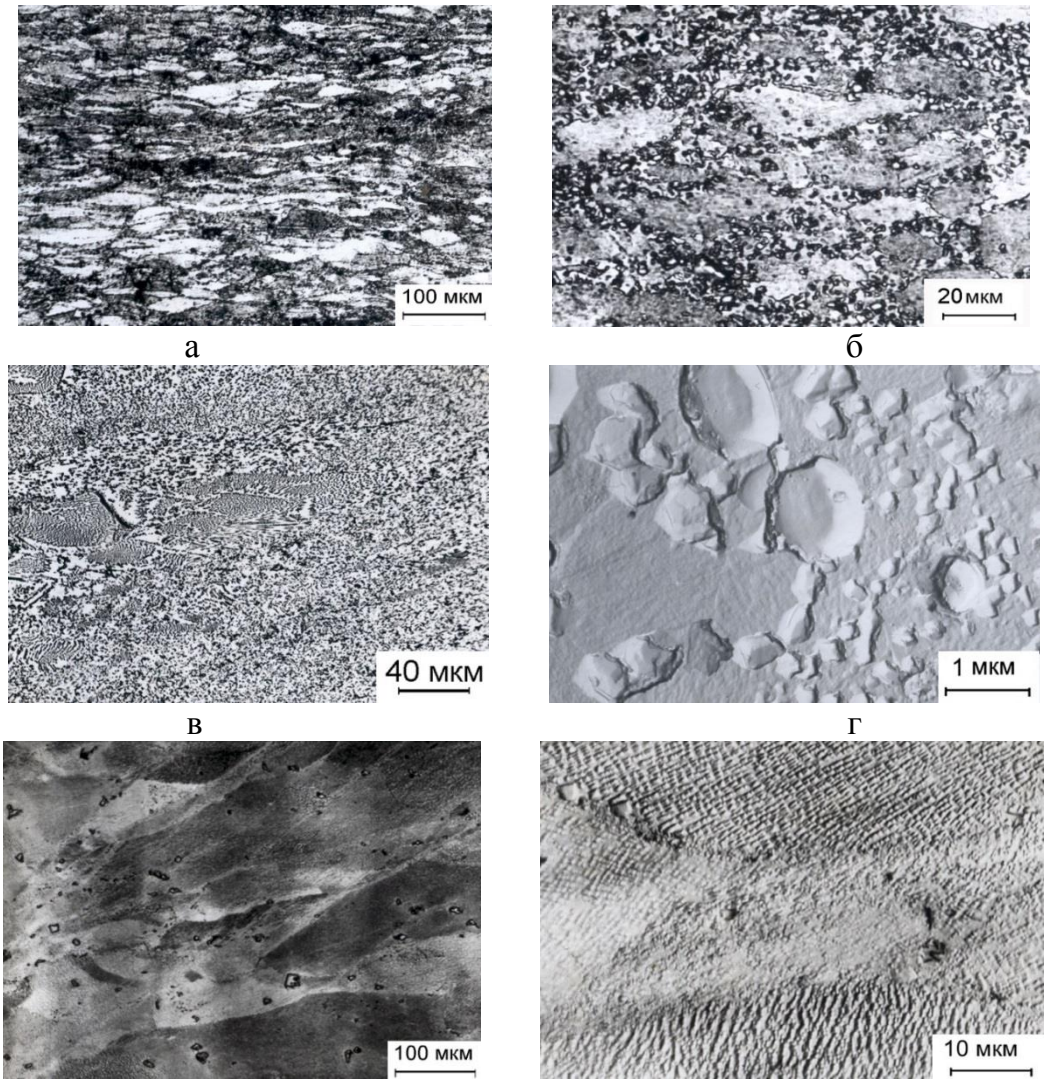


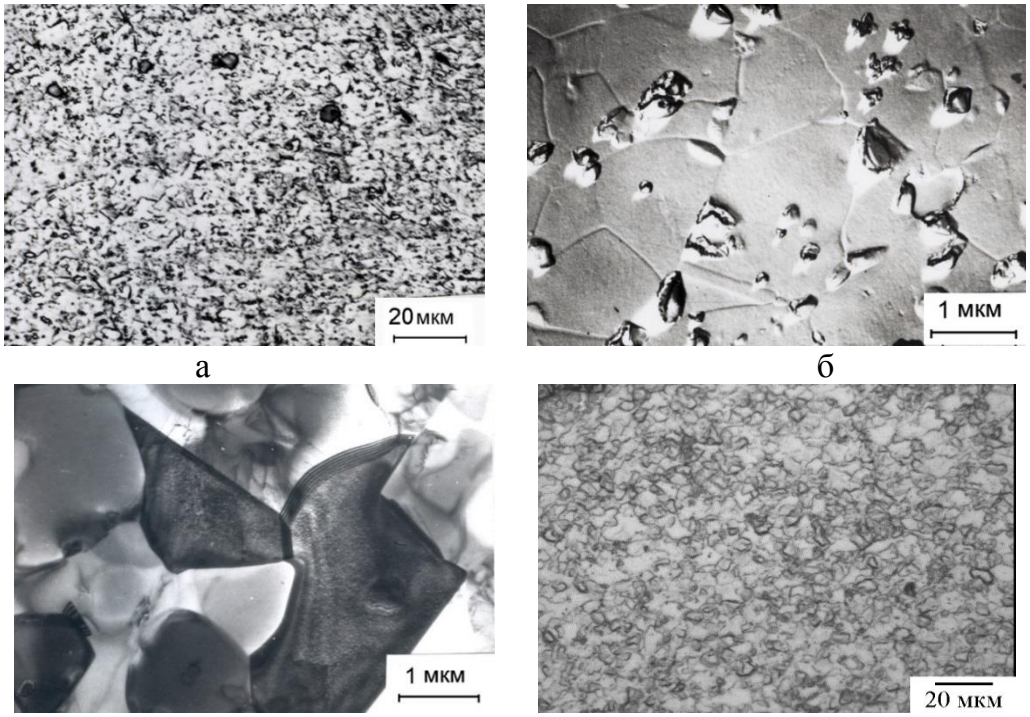

Рисунок 9. Микроструктура никелевых сплавов после деформации в области 3: $\varepsilon=10^{-2}$ с $^{-1}$, $\varepsilon$=60-75%; а - ЭИ437, 900°С; б, г - ЭИ698 , 950°С ; в - ЭП742, 1000°С; д, е - ЭП975, 1050°С.

**Заключение**

Усложнение химического состава сплавов и увеличение количества γ′-фазы способствует росту сопротивления деформации и смещению температурного интервала обработки в сторону более высоких гомологических температур. Наряду с этим изменяются параметры получаемой структуры типа микродуплекс: возрастают средний размер и объемная доля γ′-фазы.

Показано, что температурная область развития динамической рекристаллизации, в ходе которой формируется УМЗ структура типа микродуплекс, с увеличением содержания γ′- фазы возрастает и коррелирует с изменением температуры полного растворения γ′- фазы. Например, для

малолегированных сплавов, содержащих менее 25% γ′- фазы, температурный интервал получения УМЗ структуры микродуплексного типа составляет $0,65 \div 0,71 T_{пл}$ , а для средне (35%) и высоколегированных (55%) повышается до $0,8 \div 0,85 T_{пл}$.




а б в г

Рисунок 10. Микроструктуры никелевых сплавов после дробной деформации в температурных областях 2 и 3: а, - ЭИ437, 875-925°С; б - ЭИ698, 950-925°С; в - ЭП742, 1050-1025°С; г - ЭП975, 1050-1100°С.

**Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ* № 18-19-00685*) и в рамках государственного задания Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (№* АААА-А17-117041310215-4*). Экспериментальные исследования были выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ИПСМ РАН.*

Список используемых источников

1. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (К 100-летию со дня рождения). //М.: Наука, 2006.- 407с.

2. Симс Ч.Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Симса Ч.Т., Столлоффа Н.С., Хагеля У.К. Пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1и 2 / Под ред. Шалина Р.Е. М Металлургия 1995. 384 с.

3. Белов А.Ф., Аношкин Н.Ф., Фаткуллин О.Х. Структура и свойства гранулируемых никелевых сплавов.// М.: Металлургия, 1984.- 128с.

4. Деформация и свойства материалов для авиационной и космической техники. Труды международной конференции. //Пер. с англ. Под ред. Л.М. Бернштейна, А.П. Мотевосяна, В.П. Сандлера. М.: Металлургия, 1982.- 376с.

5. Кайбышев О.А. Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М:. Наука, 2002.- 438с.

6. Патент США № 3519503, июль 1970. - кл. 148 - 11.5 " Moore J.B., Tequesta J. Athey R.L. Fabrication Method for the High Temperature Alloys".

7. Кононов С.А., Перевозов А.С., Колачев Б.А. Структура и механические свойства гранулиро-ванного сплава ЭП741НП, полученного по технологии, включающей горячее изостати-ческое прессование и обработку давлением // Металлы. 2007. №5. С. 86-89.

8. Гарибов Г.С. Металлургия гранул – основа создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2007. №1. С. 66-78.

9. Ножницкий Ю.А. Проблемы применения гранулируемых сплавов в перспективных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. №4. С. 13-20.

10. Скляренко В.Г., Бубнов М.В., Пономаренко Д.А. и др. Изготовление заготовок дисков из сплава ЭП741НП методом ГИП с последующим деформированием // Металлургия машино-строения. 2008. №5. С. 41-44.

11. Береснеев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов получаемых методом металлургии гра-нул // Вестник МАИ. 2008. Т. 15. №13. С. 83-89.

12. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З., Валитов В.А., Влияние содержания γ′-фазы на режимы подготовки структуры и сверхпластичность жаропрочных никелевых сплавов// "Металловедение и термическая обработка металлов", 1989, - № 7, - С.40-44.

13. Петрова С.Н., Маханек Г.В., Клещев А.С. и др. Особенности микроструктуры сложнолегированных сплавов на никелевой основе после высокотемпературной деформации. С. 154 -160./ /В кн. Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе. М.: Наука, 1984.- 244с.

14. Хорнбоген Е., Кестер И. Рекристаллизация двухфазных сплавов // Рекристал-лизация металлических материалов. - М.: Металлургия, 1982. - С. 165 - 202.

15. Бахтеева Н.Д., Виноградова Н.И., Петрова С.Н.. Рекристаллизация в никелевых суперсплавах. I. Рекристаллизация в поликристаллических материалах.// Физика металлов и металловедение, том 95, № 2, с. 66-71.

16. Портной В.К., Алалыкин А.А., Новиков И.И. Формирование ультрамелко-зернистой структуры в жаропрочных никелевых сплавах при горячей деформации. С. 98-110 // В кн. Металловедение и обработка цветных сплавов. - М.: Наука, 1992. -230с.

17. Алешин Г.Н. Поведение границ зерен и фаз при рекристаллизации и сверхпластической деформации никелевого сплава ЖС6КП: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07-Уфа: 1987. 161 с.

18. Кайбышев О.А., Валитов В.А., Салищев Г.А. Влияние состояния γ′-фазы и условий горячей деформации на формирование структуры микродуплекс в жаропрочном никелевом сплаве // Физика металлов и металловедение, 1993, том 75, №. 4, с. 110-117.

19. Валитов В.А., Салищев Г.А., Мухтаров Ш.Х., Сверхпластичность жаропрочного никелевого сплава с субмикрокристаллической структурой. //Известия РАН, "Металлы", - 1994г., - №3, - С. 127 – 131.

20. Кайбышев О.А., Валитов В.А., Салищев Г.А. Способ обработки дисперсионно-твердеющих сплавов на основе никеля // Патент РФ №2041284.

21. Утяшев Ф.З., Кайбышев О.А., Валитов В.А. Способ изготовления осесимметричных деталей и способы изготовления заготовок из многофазных сплавов для его осуществления (варианты) // Патент РФ. - №2119842 .

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИПОРОВОГО ВЕЩЕСТВА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Ельчищева Т.Ф.[1], Ерофеев В.Т.[2]**
*[1]- Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,*
*elschevat@mail.ru*
*[2]- Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск,*
*fac-build@adm.mrsu.ru*

Основные характеристики строительных материалов, в частности, их теплофизические свойства, в основном зависят от технологии и режимных параметров их производства, а также показателей качества, свойств и соотношения ингредиентов в материале. Однако при пористой структуре материала большое значение имеют также параметры компонентов его внутрипорового вещества – влагосодержание и наличие примесей, в частности, гигроскопических неорганических солей [1].

Для экспериментального исследования влияния солей на коэффициент теплопроводности стеновых материалов был использован пеносиликат автоклавный плотностью 650 кг/м$^3$, изготовленный по ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия» в г. Липецке на ООО «Липецкий завод изделий домостроения» (ЛЗИД). При производстве ячеистых блоков в качестве порообразователя используется «устойчивая пена». Вспучивание раствора сырьевой массы, состоящей из вяжущего и наполнителей с образованием воздушных ячеек происходит за счет механического перемешивания пены и раствора в смесителе. Раствор распределяется по поверхностям пленок – стенок воздушных пузырьков, образованные пеной. При гидратации и застывании вяжущего формируются замкнутые воздушные ячейки. Пеносиликат является удобным для исследования материалом, т.к. его структура позволяет растворам солей, вводимым в процессе эксперимента в образец, равномерно распределяться по всему объему, что повышает точность и воспроизводимость экспериментальных данных.

Для экспериментов использовались образцы-кубы размером 80×80×80 мм. Засоление выполнялось путем введения в образцы разбавленного раствора соли, объем которого складывался из требуемого объема насыщенного раствора $V_1$ и объема дистиллированной воды $V_2$ для равномерного распределения солей и обеспечения требуемого влагосодержания. В качестве исходного раствора был использован насыщенный раствор хлорида натрия NaCl по ГОСТ 4233-77 «Реактивы. Натрий хлористый. Технические условия (с Изменениями № 1, 2)» с содержанием соли 26,416 % по массе (мас. %) и плотностью 1,196 г/см$^3$. Плотность и теплопроводность кристаллов соли составляла, соответственно, 2,165 г/см$^3$ и 9,98 Вт/(м·$^o$С); растворимость – 35,9 г на 100 г воды; кристаллизация соли из растворов при н.у. происходит в безводной форме без образования кристаллогидратов.

Засоление пеносиликата проводилось при влагосодержании (ω) от 0 до 18 мас. % и содержании соли ($c$) от 0 до 6 мас. %. Промежуточные уровни солесодержания составляли 2 и 4 мас. %. Максимальное значение уровня

«влагосодержание» назначалось равным 18 мас. % – с учетом предельно допустимого приращения расчетного массового отношения влаги в материале к концу периода влагонакопления $\Delta\omega_{ср}$, % для условий эксплуатации наружных ограждающих конструкций «Б» в соответствии с СП 50.13330-2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003». Промежуточные уровни ω составляли 6 и 12 мас. %.

ГОСТ 25485-89 рекомендует при определении теплопроводности ячеистых бетонов пользоваться методикой, приведенной в ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Однако стационарный тепловой режим предполагает сушку образцов в течение достаточно длительного времени (несколько часов) для установления стационарного теплового режима. Такой способ измерения теплопроводности вносит существенные погрешности при определении характеристик увлажненных строительных материалов. Поэтому определение коэффициента теплопроводности (λ) проводилось на разработанной установке [2] методом теплового импульса. Данная установка позволяет определять теплофизические характеристики твердых строительных материалов.

Величина λ измерялась три раза для каждого из трех образцов-дублеров для назначенных уровней влаго- и солесодержания. Полученные значения были использованы для проведения статистического анализа с целью оценки воспроизводимости результатов экспериментов (однородности дисперсий отдельных опытов). Для этого было проведено сравнение значений λ солесодержащего пеносиликата при различных значениях ω и *c* по среднему значению трех испытаний для каждого из трех образцов. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1.

| ω, мас. % | *c*, мас. % | № образца | | | $\overline{x_{\bullet j}}$ | $S_j^2 \cdot 10^4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 2 | 0,1973 | 0,2097 | 0,2238 | 0,2103 | 1,7580 |
| | 4 | 0,2250 | 0,2310 | 0,2580 | 0,2380 | 3,0900 |
| | 6 | 0,2500 | 0,2601 | 0,2429 | 0,2510 | 0,7471 |
| 6 | 2 | 0,2590 | 0,2615 | 0,2655 | 0,2620 | 0,1075 |
| | 4 | 0,2790 | 0,2820 | 0,2820 | 0,2810 | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| | 6 | 0,3045 | 0,2944 | 0,3041 | 0,3010 | 0,3271 |
| 12 | 2 | 0,3595 | 0,3620 | 0,3585 | 0,3600 | $3{,}25 \cdot 10^{-2}$ |
| | 4 | 0,3390 | 0,3500 | 0,3460 | 0,3450 | 0,3100 |
| | 6 | 0,3589 | 0,3600 | 0,3761 | 0,3650 | 0,9271 |
| 18 | 2 | 0,3750 | 0,3890 | 0,3760 | 0,3800 | 0,6100 |
| | 4 | 0,3700 | 0,3810 | 0,3848 | 0,3786 | 0,5908 |
| | 6 | 0,3659 | 0,3800 | 0,3671 | 0,3710 | 0,6111 |

Предварительный статистический анализ показал, что имеется разброс значений коэффициента теплопроводности по результатам испытаний отдельных образцов. Были вычислены средние значения ($\overline{x_{\bullet j}}$) отдельных опытов и их дисперсии ($S_i^2$) для каждого уровня влагосодержания, а также среднее квадратичное отклонение (*S*). Нулевая гипотеза об однородности дисперсий отдельных групп нормально распределенных совокупностей была проверена с использованием критерия Кохрена: при числе выборочных

дисперсий $N$=12 и числе степеней свободы каждой дисперсии $f$=2. Наблюдаемое значение критерия $G_{набл}$ оказалось равным 0,3380. При уровне значимости $\alpha$=0,05, $f$=2 и $N$=12 критическая точка соответствовала $G_{кр}=G_{(0,05;\ 2;\ 12)}$ = 0,3924. Так как $G_{набл} < G_{кр}$, то исследуемые дисперсии можно считать однородными.

Для увлажненного незасоленного пеносиликата вычисленные значения составляли – $N$=4; $f$=2; $G_{набл}$=0,4354. При уровне значимости $\alpha$=0,05, $f$=2 и $N$=4 критическая точка соответствовала $G_{кр}=G_{(0,05;\ 2;\ 4)}$ = 0,7679. Таким образом, $G_{набл}$ также оказалось меньше, чем $G_{кр}$.

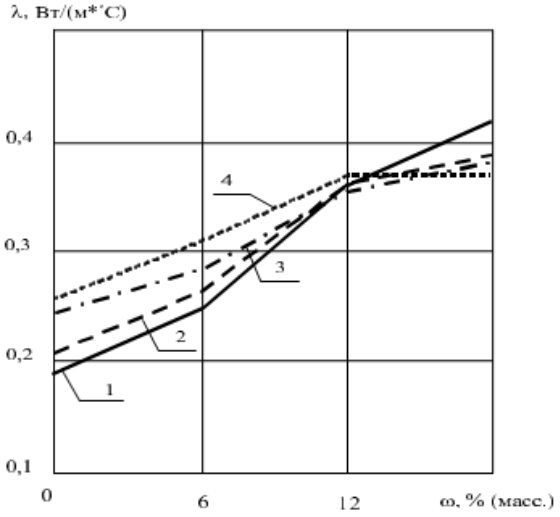



Рисунок 1. Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С) пеносиликата в зависимости от влажности ω, мас. %, при солесодержании $c$, мас. %:
1 – $c$=0; 2 – $c$=2; 3 – $c$=4; 4 – $c$=6 мас. %.

Установлено влияние параметров составляющих внутрипорового вещества на теплофизические свойства строительных материалов. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что коэффициент теплопроводности пеносиликата повышается при наличии в поровом пространстве строительного материала кристаллов солей. Увеличение содержания кристаллической соли приводит к дальнейшему повышению коэффициента теплопроводности материала.

Рост влагосодержания засоленного материала приводит к уменьшению количества кристаллической соли вследствие ее растворения в поровой влаге и образования растворов различной концентрации. Это, в свою очередь, вызывает снижение коэффициента теплопроводности засоленного пеносиликата по сравнению с теплопроводностью незасоленного материала вследствие наличия в порах материала растворов солей с коэффициентом теплопроводности более низким, чем теплопроводность поровой влаги, не содержащей соли.

Список используемых источников

1. Ельчищева Т.Ф., Ельчищев М.М. Анализ состава внутрипорового вещества засоленного стенового материала при изменении температуры // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. – Т. 2, №3. – М., МГСУ. – 2011. – С. 199-204.

2. Пат. 137738 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/00 (2006.01). Установка для определения теплофизических характеристик засоленных стеновых материалов нестационарным импульсным методом с использованием линейного источника тепла / Ельчищева Т.Ф., Ельчищев М.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ТГТУ. – № 2013134818; заявл. 23.07.2013; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – 3 с.: ил.

# ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СТРУКТУРА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ PFN И PFW

**Глазунова Е.В., Король Е.В.,**
**Шилкина Л.А., Нагаенко А.В., Вербенко И.А.**
***Научно-исследовательский институт физики ЮФУ, Ростов-на-Дону,***
***kate93g@mail.ru***

Твердофазная технология получения керамики уже на протяжении многих лет была и остается одним из наиболее востребованных методов в промышленности, благодаря своей простоте и легкости перехода к массовому производству. При этом, именно керамические магнитоэлектрические материалы, со структурой типа AB'B'' $O_3$ (где A = Pb) [1,2], типичные представителями мультиферроидных материалов, наиболее перспективны для разработки и синтеза новых многофункциональных композиций [3], благодаря возможности их применения в устройствах магнитной памяти, спин- и стрейнтроники, микроэлектроники и др. [4].

В связи с этим, целью данной работы стало установление закономерностей формирования фаз, структурных и микроструктурных характеристик в системе твердых растворов на основе ферониобата и ферровольфрамата свинца.

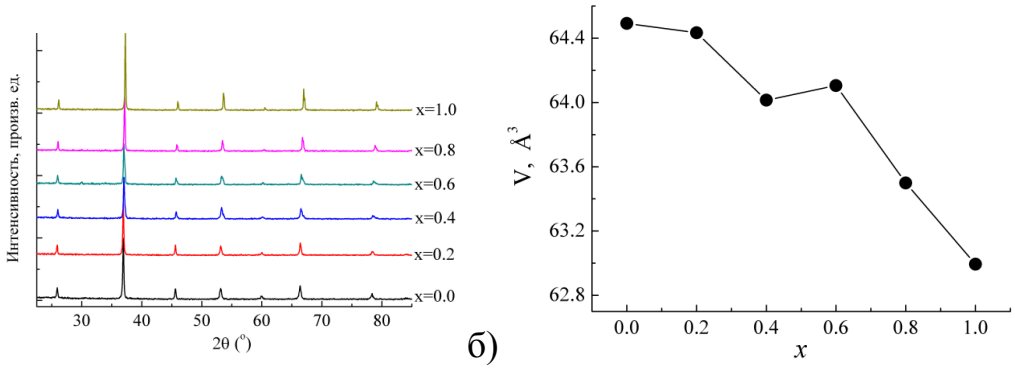
## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Объектами исследования являлись ТР системы $(1-x)Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$—$xPb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$, где $0.0 \le x \le 1.0$, $\Delta x=0.2$. В качестве исходных компонентов для синтеза использовались следующие реагенты: PbO(ч.), $Fe_2O_3$(ч.д.а.), $WO_3$(х.ч.), $Nb_2O_5$(ч.). Образцы были изготовлены путём двухстадийного твердофазного синтеза. В ходе оптимизации условий приготовления ТР были выбраны следующие режимы: $T_1$=800ºС, $\tau_1$=4, 10 ч, $T_2$=(850÷900)ºС, $\tau_2$=4, 10 ч, с последующим спеканием по обычной керамической технологии $T_{сп.}$=(870÷1100)ºС, $\tau_1$=2ч.

Рентгенографические исследования проводились с использованием дифрактометра ДРОН-3 (отфильтрованное $Co_{K_\alpha}$-излучение, схема фокусировки по Брэггу-Брентано). Содержание примесных фаз оценивалось по относительной интенсивности их сильной линии $I/I_1 \cdot 100$, где I-интенсивность сильной линии примесной фазы, $I_1$-интенсивность сильной линии перовскитной фазы.

Исследование микроструктуры сколов образцов осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM–6390L .

На рис.1а приведены рентгенограммы всех ТР системы после спекания. Из рис. 1 видно, что все ТР системы кристаллизуются в структуре типа перовскита и не содержат примесных фаз.




а) б)

Рисунок 1. Рентгенограммы ТР системы (1-x)Pb($Fe_{1/2}Nb_{1/2}$)$O_3$—xPb($Fe_{2/3}W_{1/3}$)$O_3$ после спекания(а); зависимость объема ячейки от концентрации *x* (б).

Видно, что в интервале 0.2<x<0.8 профили пиков ($200_к$) искажаются, что может быть следствием понижения симметрии ячейки или диффузного рассеяния. На рис. 1 б представлена зависимость объема ячейки ТР от *x*. Хорошо заметно, что объем изменяется немонотонно, существует две области его постоянства 0.0≤x≤0.2 и 0.4≤x≤0.6. В ТР с x=0.6, вероятно, присутствует смесь нескольких перовскитовых фаз с различной симметрией или параметрами ячейки, что приводит к резкому снижению плотности керамик данного состава.

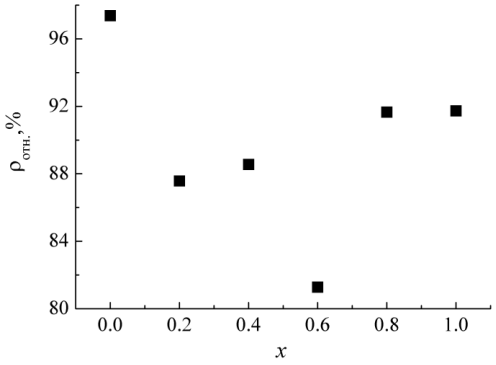



Рисунок 2 Зависимость относительной плотности керамик ТР системы (1-x)Pb($Fe_{1/2}Nb_{1/2}$)$O_3$—xPb($Fe_{2/3}W_{1/3}$)$O_3$ от *x*.

На рис. 3 представлены микрофотографии фрагментов зеренной структуры. Их анализ показывает, что чистый феррониобата свинца обладает плотной структурой с трудно различимыми границами зерен. Это подтверждается расположением скола керамики, который проходит не по границе зерен, а сквозь их объем. С увеличением концентрации ферровольфрамата свинца размер зерен увеличивается до ≈ 20мкм, а микроструктура исследуемых образцов постепенно разрыхляется (x=0.6).

При x > 0.6 наблюдается усиление неоднородности микроструктуры, которое проявляется в наличии двух видов зерен – крупных кристаллитов (7-

10 мкм) в форме неправильных многогранников и небольших (до 1-2 мкм) зерен, локализующихся небольшими группами преимущественно рядом с порами. В чистом ферровольфрамате свинца наблюдается плотная, практически беспористая микроструктура, с зернами не более 5мкм плотно прилегающих друг к другу.

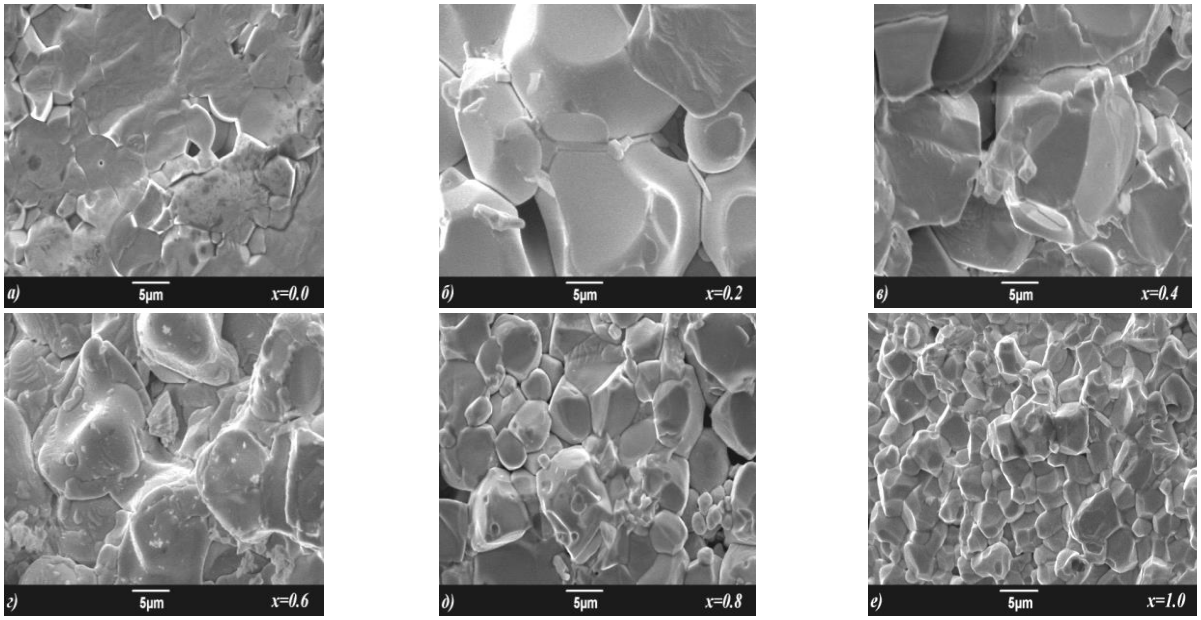



Рисунок 3. Фрагменты микроструктуры ТР системы $(1-x)Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$—$xPb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$.

В ходе работы установлены корреляции между динамикой кристаллической решетки, плотностью полученных спеков и зеренным строением твердых растворов. В дальнейшей работе будут проведены исследования электрофизических и магнитных свойств ТР и сделана оценка возможности их применения в магнитоэлектрических устройствах.

**Работа выполняется в рамках тем № 3.6439.2017/8.9, № 3.6371.2017/8.9, гранта РФФИ № 19-32-90099\19 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики.*

Список используемых источников

1. Toledano J.C. Ferroelasticity // Ann. Telecommun. 1974. № 29. PP. 249–273.

2. X. Tan, R. Wongmaneerung, R. W. McCallum. Ferroelectric and magnetic properties of $Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$-based multiferroic compounds with cation order // Journal of Applied Physics. 2007. V. 102. 104114.

3. Brzezińska D., Skulski R., Bochenek D., Niemiec P. The properties of (1-x)(0.5PZT-0.5PFW)-xPFN ceramics // Integrated Ferroelectrics. 2016. № 173(1). P. 104–112.

4. Pyatakov A.P., Zvezdin A.K. Magnetoelectric and multiferroic media // Phys. Usp. 2012. № 55. P.557–581.

# ЛЕГКИЕ УДАРОПРОЧНЫЕ ПАНЕЛИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВМПЭ-ПЛАСТИКОВ

**Малков И.В.**
***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, i.v.malkov@mail.ru***

Опасения по поводу возможных угроз безопасности инфраструктуры способствуют росту новых рынков и возникновению областей применения для брони и других материалов баллистического назначения. В попытке максимально увеличить эксплуатационные характеристики с одновременным снижением стоимости, поставщики и изготовители этой продукции все чаще обращаются к конструкциям, которые объединяют не только самые разнообразные материалы, такие как керамика, сталь и композитные ламинаты в рамках единого решения по материалу брони, но также используют несколько форм армирований в композитах путем объединения углеродных, арамидных, стекло- и других волокон в заготовках и препрегах [1-3]. Эти гибридные композиты основаны на уникальных преимуществах, предлагаемых каждым видом материала.

В последние годы создаются высокоэнергоемкие композиционные материалы (КМ) по энергосберегающим технологиям на основе самых легких высокопрочных высокомодульных волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) отечественного производства с целью создания производства изделий спецназначения, сочетающих повышенные маскировочные и баллистические характеристики с регламентированными физико-механическими показателями.

За рубежом на основе СВМПЭ-волокон голландского, американского, японского и китайского производства уже разработаны десятки видов изделий и конструкций специального назначения, что рассматривается как одно из условий обеспечения национальной безопасности.

В последнее время одним из основных направлений в развитии прикладной науки о композитах является создание и замена тканых армирующих материалов на материалы с однонаправленно или би- и три-аксиально ориентированными структурами (UD-структуры). Создаются UD-композиты из волокон СВМПЭ, которые демонстрируют лучшие характеристики в классе мягких, гибких материалов, предназначенных для баллистической защиты. В особенности его использование актуально для создания индивидуальных средств бронезащиты (шлемов, жилетов, вставок), поскольку за счет незначительного веса, максимальной степени защиты, он позволяет создавать лёгкие и эффективные бронежилеты. С его применением можно создавать бронежилеты с минимальным уровнем деформации с обратной стороны. Кроме этого, его можно использовать в сочетании с противотравматическими подкладками для защиты от колющих видов

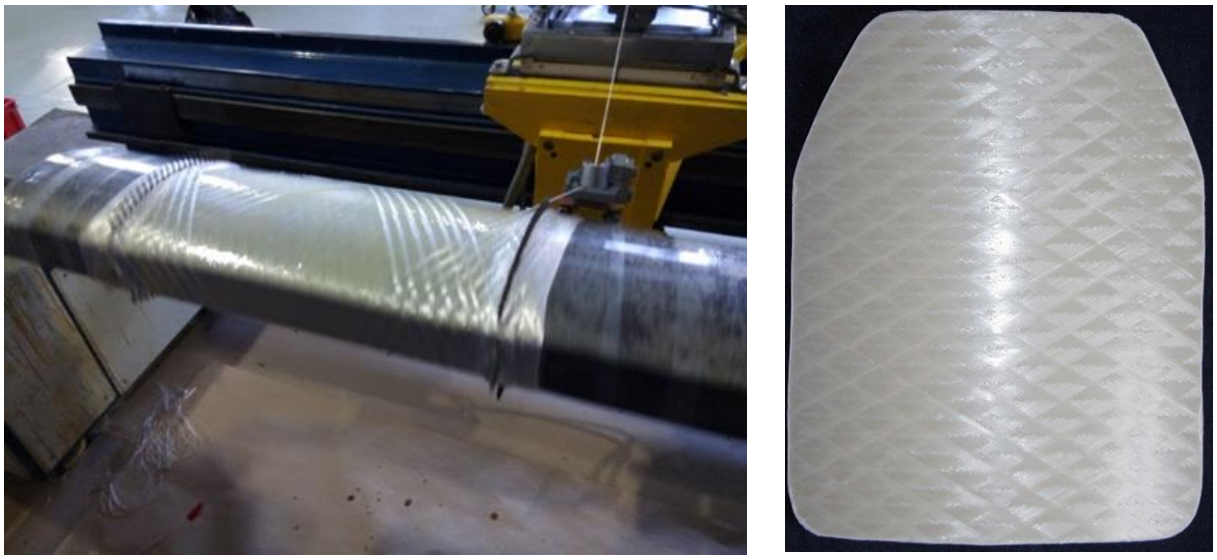
оружия, а также для создания бронежилетов срытого и тактического ношения.

Однако, для создания мультиаксиальных структур необходимо дорогостоящее импортное оборудование. Альтернативным решением для создания малогабаритных тонкостенных конструкций для баллистической защиты может быть технология автоматизированной намотки. Она позволяет получать одновременно и однонаправленный материал, и необходимую конструкцию. Кроме того, бронепанели минуют стадию рулонного материала и связанные с его переработкой технологические операции, что снижает их себестоимость.

Нами разработана технология формообразования намоткой бронепанелей на основе волокон СВМПЭ и термопластичного связующего с поверхностной плотностью одного слоя от 83 до 153 г/м$^2$при доле связующего в материале от 11-20% (рис.1).

Установленная результатами стандартных испытаний противоосколочная стойкость панелей составила более 530 м/с, что превосходит по этому показателю композиты на основе арамидного волокна и приближена к зарубежным аналогам.

Сравнительный анализ результатов испытаний показал, что противоосколочная стойкость бронепанелей с намоточной структурой на 9,5-15% превышает этот показатель бронепанелей на основе тканей.



*а* *б*

Рисунок 1. Процесс намотки (*а*) и грудная панель (*б*) на основе волокон СВМПЭ и термопластичного связующего.

Принимая во внимание меньшую прочность используемых в экспериментах СВМПЭ нитей марки ПЭ-1 по сравнению с лучшими зарубежными, применение перспективных нитей ПЭ-2 с прочностью не уступающей нитям Dyneema позволит создать рекордно эффективный бронекомпозит для средств индивидуальной защиты.

Список используемых источников

1. Сироткин О.С., Боголюбов В.С., Малков И.В., Сыровой Г.В. Формообразование намоткой корпусных конструкций ЛА сложной формы из композиционных материалов // Авиационная промышленность. 2016. № 4. С. 29-35.

2. Дмитриев О.С., Малков И.В. Выбор энергоэффективного режима термообработки углепластиковых трубчатых элементов // Энергосбережение и эффективность в технических системах Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбовский государственный технический университет. 2017. С. 104-105.

3. Дмитриев О.С., Малков И.В., Сыровой Г.В. Моделирование процесса и расчет режима термообработки намотанных трубчатых элементов из углепластика // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент Материалы VIII Международной научно-инновационной молодёжной конференции. 2016. С. 335-337.

# ИЗОМОРФНОЕ ЗАМЕЩЕНИЕ НЕОДИМА НА СВИНЕЦ В СИСТЕМЕ $Nd_{5-x}Pb_xMo_{2,86}O_{16+\delta}$

**Чебышев К.А., Пасечник Л.В., Селикова Н.И.**
***Донецкий национальный университет, Донецк, Украина,***
***Chebyshev.konst@mail.ru***

Ионные проводники по кислороду на основе молибдатов редкоземельных элементов являются важным классом функциональных материалов ввиду возможности их применения в качестве твердых электролитов и анодных материалов в среднетемпературных твердооксидных топливных элементах. Эти материалы могут применяться в газовых сенсорах, кислородных насосах. Например, недавно обнаружена высокая ионная проводимость у молибдата лантана $La_2Mo_2O_9$. Значение проводимости этого соединения сопоставимо с проводимостью стабилизированного оксида циркония $ZrO_2$ – наиболее широко используемого оксидного электролита.

В последние годы в системах $Ln_2O_3$ – $MoO_3$ найдены электронно-ионные кислородные проводники с высокой проводимостью при средних температурах (200 - 900$^o$C). Это соединения со структурой флюорита $Ln_2MoO_{6-\delta}$. При этом для их получения было проведено восстановление $Mo^{+6}$ в более низкие степени окисления (+3, +4, +5), что повлекло за собой значительное увеличение электронной составляющей проводимости.

Соединения $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$ имеют флюоритоподобную структуру и кристаллизуются в пространственной группе Pn-3n. Исходная структура флюорита искажена в результате наличия катионов значительно

отличающихся как размером (например, $r(Nd^{+3})$ =1,109 Å, $r(Mo^{+6})$ =0,41 Å), так и зарядом. Это ведет к смещению ионов кислорода из позиций идеального флюорита и образованию тетраэдров $MoO_4$. Кроме этого, полностью окисленные составы имеют сверхстехиометрический кислород по отношению к флюориту (отношение количества катионов к анионам во флюорите 4:8, в данных молибдатах РЗЭ – 8:16,5), что обеспечивает высокую ионную электропроводность.

Для модифицирования исходных соединений $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$ с искаженной структурой флюорита возможно использовать не только восстановление молибдена, но и гетеровалентное замещение на двухзарядный металл по схеме: $2Ln^{+3} + 2O^{-2} = 2Me^{+2} + \square$, что дает возможность получить подобный материал без электронной составляющей проводимости и вакансиями в кислородной подрешетке.

Однако для молибдатов различных редкоземельных элементов стабилизация флюоритной структуры происходит, по-видимому, в составах с несколько различным соотношением редкоземельного элемента и молибдена, что не дает однозначного пути выбора составов для синтеза. Кроме того, отсутствуют систематические данные по фазообразованию в подобных системах.

Поэтому нами в данной работе исследована система $Nd_{5-x}Pb_xMo_{2,86}O_{16+\delta}$ входящая в область гомогенности соединения $Nd_5Mo_3O_{16+\delta}$, но отличающаяся более низким содержанием молибдена. Первоначально образцы подвергали термической обработке в течение 4 ч при температуре 500$^o$C. После отжига их измельчали для разрушения спека и повышения скорости диффузии и снова прокаливали в течении 8 ч при температуре 600 °С. Конечная температура синтеза составила 1000 $^o$C

Для получения керамических таблеток полученные порошки прессовали с использованием 5 % раствора поливинилового спирта, как связующего компонента. Спрессованные таблетки сушили при температурах 75-120°С, потом, для выжигания поливинилового спирта прокаливали в течение 2 ч при температуре 300°С и 2 ч при 500°С. Далее таблетки прокаливали в течение 20 ч при температуре 950°С и в течение 60 ч при температуре 850 °С. После каждого обжига образцы исследовали методом РФА. Определены параметры элементарной ячейки в зависимости от концентрации добавки свинца. По изменению параметров ячеек и методом «исчезающей фазы» установлена область существования кубической фазы молибдата неодима-свинца.

Полученные образцы изучены методами рентгенофазового анализа (в том числе по алгоритму Ритвельда). Распределение элементов на поверхности, размер и форму зерен определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Измерения удельного сопротивления проводили при нагревании образцов от 300 до 700°С со скоростью 2°/мин при фиксированных частотах 100 Гц, 1, 10 и 100 кГц и на постоянном токе. Рассчитаны энергии активации проводимости различных составов твердых растворов.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ СМЕСЕЙ ТЕРМОПЛАСТОВ

**Балашов Ф.С., Ефимов А.А., Красин М.А., Тишкова А.Г.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***

Возможности полимерных композиционных материалов чрезвычайно широки благодаря неисчерпаемой вариабельности их составов, многообразию полимеров и наполнителей, способам их модификации и взаимораспределения. Способы получения полимерных композитов определяются как типом наполнителя, так и агрегатным состоянием полимера [1-5]. В настоящее время насущной проблемой является утилизация отходов как полимерных материалов в виде использованной упаковки, так и отходов строительного производства [6-9].

Целью данной работы является исследование возможности получения композиционных материалов из смеси отходов распространенных в упаковочной индустрии полимеров: полиэтилена высокого давления (ПВД), изотактического полипропилена (ИПП) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с наполнителями в виде отходов производства строительных материалов.

Смешение отходов термопластов осуществлялось в одношнековом экструдере [3,5,10]. Перед проведением смешения компонентов композиционного материала проводилась их сушка в печи при температуре 105 $^{o}$C, что особенно важно для полиэтилентерефталата, который активно сорбирует влагу. Полученный в результате экструзии материал виде штренгов подвергался дроблению для смешения с цементно-древесными отходами производства цементно-стружечных плит (ЦСП). Последние проходили классификацию с выделением фракции до 200 мкм на вибросите.

Основным компонентом получаемого композиционного материала являются предварительно измельченные отходы полиэтилентерефталата, используемые для смешения с обработанными таким же образом отходами полиэтилена высокого давления или полипропилена в соотношении 50/50 %.

На следующем этапе для дальнейшего смешения в соотношениях 50/50 и 25/75 % делаются навески каждого ранее полученного материала и наполнителя, представляющего собой отходы из цементно-стружечных плит [11]. Смешение осуществляется через микросмеситель Брабендера. Подготовленные материалы с выбранным соотношением компонентов загружались в камеру смесителя одновременно, где вращающиеся на малых оборотах рабочие органы под действием сдвиговых напряжений и сил адгезии затягивают их. Далее закрывалось загрузочное отверстие камеры затвором и устанавливалась заданная частота вращения рабочих органов 30 мин$^{-1}$ [12]. Смешение осуществляли в течение 15 мин.

После остановки рабочих органов производилась выгрузка полученной смеси, которая помещалась в предварительно нагретую в муфельной печи пресс-форму, после чего пресс-форма с композитом устанавливалась в гидравлический пресс. Прессование производилось при температуре 180 °С при давлении 100 кгс/см$^2$ в течение 15 мин. Полученные прессованием пластины распиливались на образцы для проведения испытаний физико-механических характеристик: твердость и ударную вязкость.

Для определения твердости использовалась пластико-динамическая методика, при проведении испытаний которой индентор, чаще всего шарик, воздействует на испытываемый образец в условиях ударно действующей нагрузки, поэтому на поверхности материала остается отпечаток. При использовании молотка Баумана,

схематически представленного на рисунке 1, шарик неоднократно прижимается к образцу в различных точках под действием пружины, а величина твердости определяется средним арифметическим значением величины силы, применяемой при получении отпечатка [3] (таблица 1).

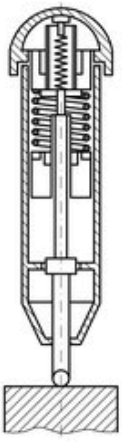


Рисунок 1. Молоток Баумана.

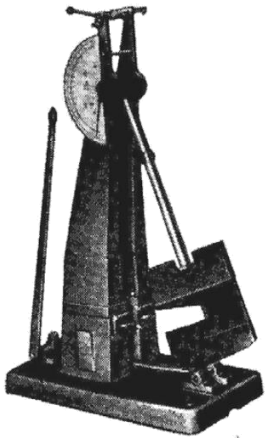


Рисунок 2. Маятниковый копер.

Таблица 1.

Результаты испытаний образцов на твердость.

| Композиционный материал | Соотношение материалов, % | Математическое ожидание величины применяемой силы для испытываемых образцов, Н |
|---|---|---|
| (ПЭТФ+ИПП)/ЦСП | 50/50 | 63 |
| | 25/75 | 73,5 |
| (ПЭТФ+ПВД)/ЦСП | 50/50 | 57,5 |
| | 25/75 | 66,5 |

Испытание на ударную вязкость проводилось по методике Шарпи для определения их сопротивления хрупкому разрушению под действием удара маятникового копра, представленного на рисунке 2. При проведении испытаний испытываемый образец прогибается или разрушается, насколько позволяют возможности испытательного устройства. При этом образец располагается на двух опорах таким образом, чтобы удар молота копра приходился на середину образца [6]. Укрепленный на стержне молот, имеющий на своей ударной стороне фигурный вырез, описывает после высвобождения дугу и в самой нижней точке траектории движения передает часть своей кинетической энергии образцу [6]. После определения значения поглощенной образцом кинетической энергии проводится расчет ударной вязкости (таблица 2).

Таблица 2.

Результаты испытаний образцов на ударную вязкость.

| Композиционный материал | Соотношение материалов, % | Математическое ожидание величины ударной вязкости испытываемых образцов $\times 10^{-3}$, Дж/м$^2$ |
|---|---|---|
| (ПЭТФ+ИПП)/ЦСП | 50/50 | 15,1 |
| | 25/75 | 13,3 |
| (ПЭТФ+ ПВД)/ЦСП | 50/50 | 16,6 |
| | 25/75 | 15,5 |

Были проведены испытания образцов полученных композитов на водопоглощение и объемное разбухания, которое осуществлялось погружением испытываемых образцов в вертикальном положении в сосуд с водой. При этом образцы не должны соприкасаться друг с другом, а также с дном и боковыми стенками сосуда. Образцы должны находиться на расстоянии 20±2 мм ниже уровня

поверхности воды [6]. Предварительно образцы после кондиционирования взвешивались с погрешностью не более 0,1 г и определяется их толщина. Затем образцы выдерживались при температуре воды 20±1 °С в течение 24±0,25 ч. После выдержки образцы извлекались из воды и складывались в стопы в горизонтальном положении, прокладывая их листами фильтровальной бумаги для удаления избытка влаги, затем взвешивались и определяется их толщина [6].

В результате испытаний выявлено, что водопоглощением и разбуханием образцов композитов при равном соотношении смеси термопластов и наполнителя можно пренебречь. При снижения содержания термопластов до 25 % водопоглощение испытываемых образцов порядка 9 %, а разбухание по толщине не превышает 5…6 %

Список используемых источников.

1. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов. М.: Машиностроение-1, 2005. – 320 с.

2. Plewa A., Belyaev P.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Frolov V.A. The effect of modifying additives on the consistency and properties of bitumen binders // Advanced Materials and Technologies. 2016. № 4. С. 35-40.

3. Беляев П.С., Забавников М.В., Маликов О.Г. К вопросу получения резино-битумного концентрата для асфальтобетонных дорожных покрытий из изношенных автомобильных шин // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2008. Т. 14. № 2. С. 346-352.

4. Соколов М.В., Клинков А.С., Беляев П.С., и др. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества. М.: Машиностроение, 2009. – 352 с.

5. Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов. – Тамбов: Из-во ТГТУ, 2015. - 188 с.

6. Макеев П.В., Клинков А.С., Полушкин Д.Л., Беляев П.С. Методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 18. № 1. С. 166-172.

7. Беляев П.С., Маликов О.Г., Забавников М.В., Соколов А.Р. Повышение качества нефтяных битумов путем модификации продуктами переработки изношенных автомобильных шин // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2003. Т. 9. № 1. С. 63-69.

8. Шашков И.В., Клинков А.С., Беляев П.С., Соколов М. В. Валковое оборудование и технология непрерывной переработки отходов пленочных термопластов: Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. — 136 с.

9. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 22. № 2. С. 264-271.

10. Беляев В.П., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Фролов В.А. Повышение энергоэффективности процесса модификация битума регенератом резиновой крошки // Components of Scientific and Technological Progress. 2013. № 1 (16). С. 75-77.

11. Беляев П.С., Примеров О.С., Савин А.В. Разработка технологии получения композита на основе отходов термопласта и ЦСП // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018. Т. 24. № 2. С. 367-373.

12. Клинков А.С., Соколов М.В., Полушкин Д.Л., Шашков И.В., Беляев П.С., Туляков Д.В. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2008. Т. 14. № 4. С. 870-881.

# РЕВЕРСИВНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ БИНАРНОЙ СИСТЕМЫ (1-x)$BaTiO_3$-x$SrTiO_3$*

**Хасбулатов С.В.[1,2], Садыков Х.А.[1,2], Даудов М.Р.[1], Шилкина Л.А.[1], Алешин В.А.[1], Вербенко И.А.[1], Резниченко Л.А.[1]**

*[1]-Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону,*

said_vahaevich@mail.ru

*[2]-Физико-математический факультет Чеченского государственного университета, г. Грозный*

Установлены закономерности влияния смещающих полей на диэлектрический отклик твердых растворов бинарной системы (1-x)$BaTiO_3$-x$SrTiO_3$ ($0{,}0 \le x \le 1{,}0$).

## ВВЕДЕНИЕ

Для многих практических применений необходимо знание поведения сегнетоэлектриков в сильных смещающих полях. Особенно это необходимо в случае объектов, обладающих высокой восприимчивостью к различного рода внешним воздействиям, к которым могут быть отнесены твердые растворы (ТР) бинарной системы (1-x)$BaTiO_3$-x$SrTiO_3$ (BST).

Последние, несмотря на более чем семидесятилетнюю историю их использования в технике (фазовращатели, линии задержки, резонаторы, фильтры) [1], остаются востребованными в реальном секторе мировых экономик и, прежде всего, в ускорительной технике [2]. В связи этим актуальным представляются предлагаемые исследования.

## ОБЪЕКТЫ, МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

В качестве объектов исследования выступили ТР составов: $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$, x-0.00…1.00; Δx= 0.025…0.10. Образцы ТР всех составов получены двухстадийным твердофазным синтезом из оксидов высокой степени чистоты (чда, осч) с последующим спеканием по обычной керамической технологии.

Рентгенографические исследования проводили методом порошковой дифракции с использованием дифрактометра ДРОН-3 (отфильтрованное $Co_{k\alpha}$-излучение, схема фокусировки по Брэггу - Брентано).

Измерения реверсивной диэлектрической проницаемости объектов осуществлялось на сконструированной в НИИ физики ЮФУ установке, включающей высоковольтный выпрямитель (источник постоянного напряжения) для плавной подачи на исследуемый образец постоянного напряжения (от 0 до 4 кВ), измеритель емкости и проводимости (мост переменного тока Е-8-2, частота 1 кГц),

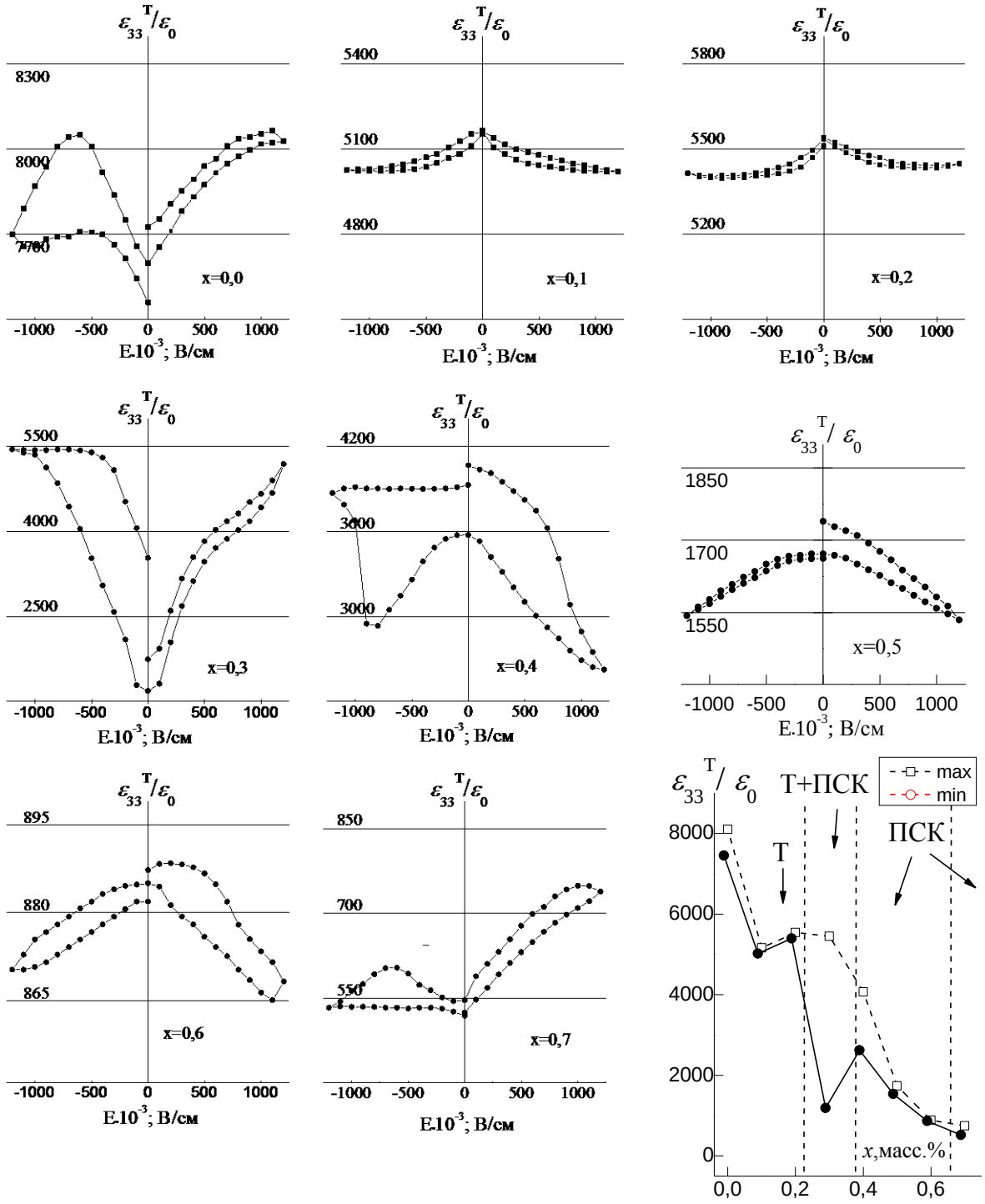



Рисунок 1. Зависимости относительной диэлектрической проницаемости, $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, поляризованных образцов изученных ТР от напряженности электричесого поля.

Рисунок 2. Зависимости максимума и минимума $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ от *x* (Штриховыми линиями показаны границы фаз в системе: *T*-тетрагональная, ПСК-псевдокубическая, К-кубическая).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1,2 показаны зависимости относительной диэлектрической проницаемости, $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$, поляризованных образцов изученных ТР от напряженности электричесого поля, а также зависимости максимумов и минимумов $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$ от *x*. Выделяются две группы ТР: с x=0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6 – колоколообразные, практически безгистерезисные (x=0,1;0,2) или с разной степенью размытости диэлектрического отклика; с x=0,0; 0,3; 0,7 – с плохо оформленными, несимметричными петлями –″бабочками″.

Для объяснения полученных зависимостей принято во внимание следующее.

Диэлектрическая нелинейность является следствием компромисса между несколькими, зачастую одновременно происходящими явлениями: доменно-ориентационными и доменного ”зажатия-освобождения”; фазовыми превращениями (возникновением новых и исчезновением существующих фаз) и движениями межфазных границ; индуцированием полярного состояния в микрообластях; влиянием дефектов, как генерируемых всеми этими процессами, так и собственных, присущих данным объектам; насыщением индуцированной поляризации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании анализируемых материалов в устройствах, предусматривающих вариацию смещающих электрических полей в широком диапазоне значений их напряженности, необходимо учитывать полученные результаты.

**Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России: проекты №№ 3.6371.2017/8.9, 3.6439.2017/8.9, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.*

Список используемых источников

1. Мухортов В. М., Юзюк Ю. И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. — 222 с.

2. Дедык А. И., Канарейкин А. Д., Ненашева Е. А., Павлова Ю. В., Карманенко С. Ф. Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики керамических материалов на основе титаната бария–стронция // ЖТФ. 2006. Т. 76(9). С. 59—64.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДОФАЗНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ

**Попов О.Н.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***

Во многих технических процессах возникает необходимость определения температурного состояния объектов из полимерных материалов (ПМ) при наличии твердофазных превращений, процессов плавления, кристаллизации и других.

В современных методах неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) [1 – 4] наметилась тенденция использования в расчетах большого числа точек температурной кривой, что позволяет повысить достоверность получаемых результатов. Достаточно полные исследования таких методов и адекватности математических моделей, описывающих их, реальным тепловым процессам представлены в работах [1, 2, 4]. Однако, применение данных методов для НК структурных превращений в ПМ затруднительно, так как математические модели, реализующие их, не учитывают возможность проявления в материалах релаксационных и фазовых переходов.

Современные методы НК, позволяющие определять ТФС и температурные характеристики структурных переходов в ПМ, наиболее эффективно реализуются измерительными системами (ИС), позволяющими автоматизировать проведение измерений, адаптивно изменять режимные параметры, обеспечивать оперативность и точность измерений при сохранении целостности и эксплуатационных характеристик объектов исследования [1].

Структурная схема ИС, состоящая из персонального компьютера (ПК), измерительно-управляющей платы PCI 1202H, измерительного зонда (ИЗ), блока управления питанием (БУП), представлена на рис. 1.

При измерениях ИЗ устанавливают контактной стороной на поверхность исследуемого изделия. Измерительный зонд обеспечивает создание теплового воздействия на исследуемое изделие с помощью нагревателей (Н1, Н2) и фиксирование температуры в заданных точках контроля. Термоэлектрические преобразователи располагаются на центральных линиях каждого нагревателя и ИЗ. Холодные спаи ТП выведены в блок холодных спаев (БХС) через специальные отверстия в подложке ИЗ, где распаяны на коммутационную плату. Блок холодных спаев предназначен для обеспечения одинаковой температуры холодных спаев ТП, которая фиксируется датчиком температуры TC1047AVMBTR (ДТ). Сигналы с ТП поступают на вход измерительно-управляющей платы PCI 1202H.

Мощность и длительность теплового воздействия встроенных в подложку ИЗ нагревателей Н1, Н2 задаются программно. Регулирующий сигнал поступает на вход операционного усилителя БУП. Сигнал с выхода операционного усилителя подается на базу силового транзистора. Операционный усилитель поддерживает напряжение на выходе БУП, равное напряжению регулирующего сигнала.

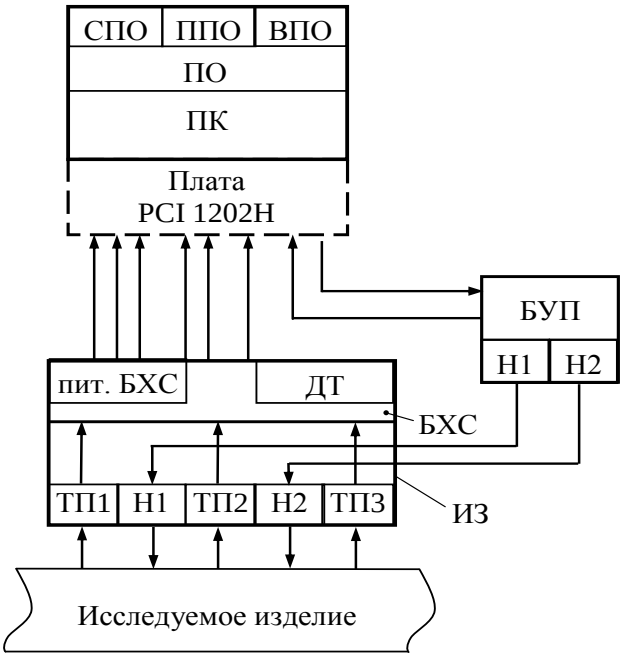



Рисунок 1. Структурная схема ИС

Для реализации алгоритмов контроля температурно-временных характеристик структурных переходов в ПМ и управления режимами эксперимента разработан комплекс программного обеспечения (ПО) для ПК, составляющий прикладное программное обеспечение (ППО) ИС. Вспомогательное ПО (ВПО) состоит из программ тестирования, организации обработки и хранения измерительной информации на ПК.

В результате проведения эксперимента были зафиксированы зависимости разности значений температуры в точках расположенных на поверхности исследуемого объекта (между центральной осью ИЗ и центральными осями нагревателей), от времени и температуры. Эксперимент проводился при следующих условиях: подложка ИЗ выполнена из политетрафторэтилена (теплопроводность $\lambda = 0{,}25$ Вт/(м·К); теплоемкость $c = 1005$ Дж/(кг·К); плотность $\rho = 2200$ кг/м$^3$); объект исследования – полиамид ПА – 6 ($\lambda = 0{,}3$ Вт/(м·К), $c = 1750$ Вт/(м·К), $\rho = 1550$ кг/м$^3$). Режимные характеристики: начальная температура 21 °С; тепловая мощность на каждом из нагревателе 0,68 Вт; частота дискретизации $\Delta\tau = 1$ с.

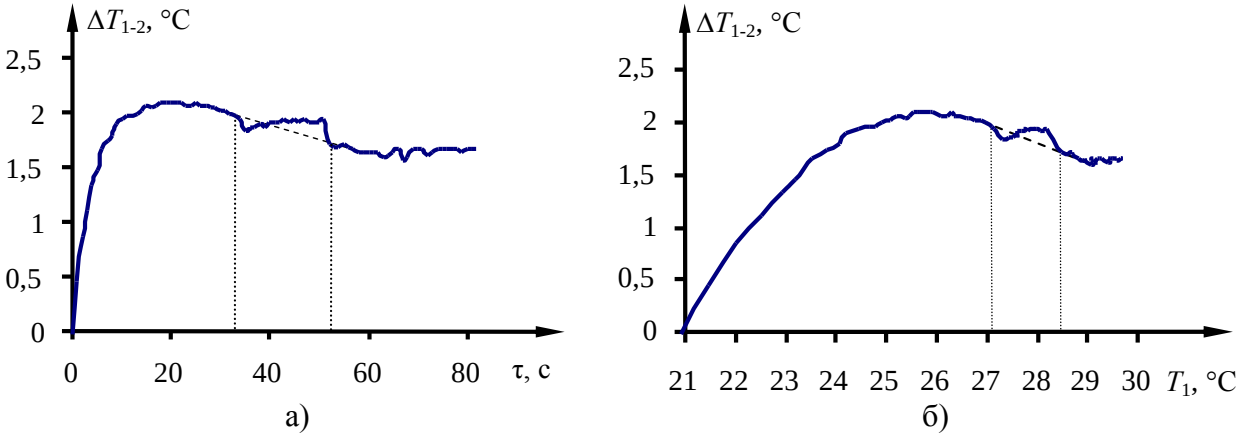



Рисунок 2. Экспериментальные зависимости: а) $\Delta T_{1\text{-}2} = f(\tau)$; б) $\Delta T_{1\text{-}2} = f(T_1)$.

На рис. 2 (а) твердофазное структурное превращение явно проявилось при достижении температуры структурного перехода (по мере нагревания в соответствующее время). Из представленных на рисунке 2 зависимостей $\Delta T_{1\text{-}2} = f(\tau)$ и $\Delta T_{1\text{-}2} = f(T_1)$ видно, что твердофазное превращение в ПА – 6, сопровождающееся поглощением тепла, проявилось в узком интервале значений температуры от 27,1 до 28,4 °С. Характер проявления твердофазного структурного перехода на экспериментальных зависимостях согласуется с данными имитационного исследования.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что структурные превращения в полимерных материалах, сопровождающиеся тепловыми эффектами, могут быть зафиксированы по изменениям разности значений температуры разработанным методом.

Помимо представленного выше метода ИС также реализует регистрацию структурных превращений по аномалиям ТФС в узких температурном и временном интервалах с изменением интенсивного параметра (температуры или времени) [5].

Список используемых источников

1. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов: учебное пособие / С.В. Мищенко, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, О.Н. Попов; под ред. С.В. Мищенко. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 112 с.

2. Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах: монография / Н.Ф. Майникова, С.В. Мищенко, Н.П. Жуков, И.В. Рогов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 320 с.

3. Многомодельные методы и средства для определения теплофизических свойств материалов / А.О. Антонов, Н.Ю. Полунина, Е.В. Пудовкина, О.Н. Попов, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012. – Специальный выпуск (43) – С. 41 – 46.

4. Теоретическое обоснование метода неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, О.Н. Попов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 296 – 302.

5. Неразрушающий теплофизический контроль структурных переходов в полимерных материалах / С.В. Мищенко, Н.Ф. Майникова, О.Н. Попов, Д.О. Завражин // Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях. – 2018. – С. 269 – 273.

# УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ПОЛИПРОПИЛЕНА

**Ефимов А.А., Балашов Ф.С., Красин М.А., Тишкова А.Г.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***

Одним из наиболее осязаемых результатов антропогенной деятельности является образование отходов, среди которых отходы пластмасс занимают особое место в силу своих уникальных свойств [1]. Отходы пластиков можно выбросить, но после попадания в мусоросжигательные печи материал распадается на компоненты, вредные для природы и человека [2-3]. Но можно направить ненужные изделия из полипропилена на переработку. Это позволит не допустить загрязнения среды, а также получить композиционные материалы, которые могут быть использованы в различных отраслях промышленности [4-6]. Прием отходов полипропилена выполняют частные компании, которые занимаются их переработкой.

Учитывая специфические свойства полимерных материалов – они не подвергаются гниению, коррозии, проблема их утилизации носит, прежде всего, экологический характер. Основной путь использования отходов пластмасс – это их утилизация. Положительной стороной утилизации является то, что получается дополнительное количество полезных продуктов для различных отраслей народного хозяйства и не происходит повторного загрязнения окружающей среды. По этим причинам утилизация является не только экономически целесообразным, но и экологически предпочтительным решением проблемы использования пластмассовых отходов [6-8].

Для превращения отходов термопластов в сырьё, пригодное для последующей переработки в изделия, необходима его предварительная обработка. Предварительная сортировка предусматривает грубое разделение отходов по различным признакам: цвету, габаритам, форме и, если это нужно и возможно, по видам пластмасс. Предварительную сортировку производят, как правило, вручную на столах или ленточных конвейерах; при сортировке одновременно удаляют из отходов различные посторонние предметы и включения. Разделение пластмасс производится при добавлении в воду поверхностно-активных веществ, которые избирательно изменяют их гидрофильные свойства. В некоторых случаях эффективным способом разделения полимеров может оказаться растворение их в общем растворителе или в смеси растворителей. Обрабатывая раствор паром, выделяют ПВХ, ПС и смесь полиолефинов; чистота продуктов – не менее 96%. Методы флотации и разделения в тяжёлых средах являются наиболее эффективными и экономически целесообразными из всех перечисленных выше.

Подсчитано, что из ежегодно образующихся полимерных отходов утилизации подвергается только незначительная часть. Причиной этого являются трудности, связанные с предварительной подготовкой (сбор, сортировка, разделение, очистка и т.д.) отходов, отсутствием специального

оборудования для переработки и т.д. Газообразные продукты термического разложения пластмасс могут использоваться в качестве топлива для получения рабочего водяного пара. Жидкие продукты используются для получения теплоносителей.

В настоящее время наиболее приемлемым для России является вторичная переработка отходов полимерных материалов механическим рециклингом, так как этот способ переработки не требует дорогого специального оборудования и может быть реализован в любом месте накопления отходов [8].

Из отходов ПП целесообразно изготавливать гранулы, которые затем можно вновь использовать на предприятиях для изготовления предметов из пластика. Вторичный полипропилен более дешев, чем «первичный», но практически не уступает ему по самым важным свойствам. Это делает его выгодным для производства, и в итоге в современной промышленности редко встречаются изделия, которые полностью изготовлены только из первичного или только из вторичного сырья. Перспективным направлением переработки ПП является совмещение процессов вальцевания и экструзии в одном агрегате. Это обеспечивает снижение потребляемой энергии процесса получения вторичных гранул из ПП [9].

Для исследования процесса переработки отходов полипропилена использовалась экспериментальная установка (рисунок 1) [9].

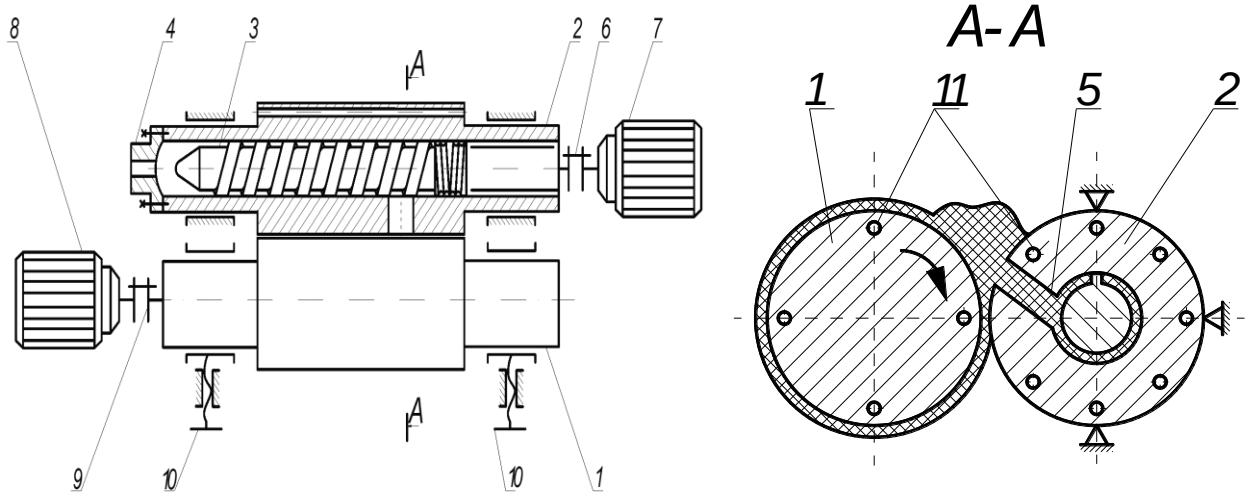



Рисунок 1. Установка для переработки отходов полипроприлена: 1, 2-передний и задний валки; 3-шнек; 4-формующая головка; 5- загрузочное отверстие; 6,9- муфта; 7,8-мотор-редуктор; 10- регулирующее устройство; 11- электронагреватели.

Экспериментальная установка представляет собой горизонтально расположенные полые валки 4, 8 диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм. При этом передний валок 1 является подвижным (число оборотов валка от 0 до 30 об/мин), а задний валок 2 неподвижным. В заднем валке имеется загрузочное отверстие 5, расположенное в зоне максимального давления вальцуемого полимера под углом, равным углу подъема винтовой нарезки шнека. Внутри неподвижного валка установлен шнек 3, привод которого

осуществляется от электродвигателя 8. Шнек 3 осуществляет захват материала, дополнительную гомогенезацию, транспортировку и создание давления перед формующей головкой.

В результате из полученного гранулята получали упаковку для товаров бытовой химии и использовали в качестве гидро- и теплоизоляционного материала.

Список используемых источников.

1. Клинков А.С., Соколов М.В., Кочетов В.И., Беляев П.С., Однолько В.Г. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов. – М.: "Машиностроение-1", 2005. – 320 с.

2. P.S. Belyaev, S.V. Mishchenko, V.P. Belyaev, O.A. Belousov, V.A. Frolov. Investigation of the Bitumen Modification Process Regime Parameters Influence on Polymer-Bitumen Bonding Qualitative Indicators//IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 998 (2018) 012005.

3. Belyaev P.S., Mishchenko S.V., Belyaev V.P. and Frolov V.A. Monitoring of the changes in the characteristics of petroleum bitumen in its interaction with the polymer // AIP Conference Proceedings, 2017. Vol. 1876, Issue 1, 020096.

4. Plewa A., Belyaev P.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Frolov V.A. The effect of modifying additives on the consistency and properties of bitumen binders// Advanced Materials and Technologies. 2016. № 4. С. 35-40.

5. Беляев П.С., Забавников М.В., Маликов О.Г., Волков Д.С. Исследование влияния резиновой крошки на физико-механические показатели нефтяного битума в процессе его модификации // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2005. Т. 11. № 4. С. 923-930.

6. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 22. № 2. С. 264-271.

7. Беляев П.С., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Полушкин Д.Л., Фролов В.А. Решение проблемы утилизации полимерных отходов путем их использования в процессе модификации дорожного вяжущего// Строительные материалы. 2013.- № 10, С. 38-41.

8. Клинков А.С., Соколов М.В., Однолько В.Г., Беляев П.С. Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов. М.: Спектр, 2012. 196 с.

9. Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015 – 188 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИЭФИРА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЕ

**Макарчук М.В., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,***
***energ-lab@yandex.ru***

Одним из этапов создания какого-либо технологического продукта является прототипирование. Данный этап позволяет быстро и с наименьшими усилиями создать работающий продукт. Актуальным является исследование механических свойств материалов, из которых изготавливаются прототипы [1, 2].

В работе в данном случае исследовался характер разрушения термопластичного полиэфира, который является основным из материалов, применяемых при 3D-печати.

Проводились исследования предела прочности при растяжении образцов из термопластичного полиэфира на разрывной машине МР-0,5-1. Образцы изготавливались на 3D-принтерах PICASO 3D Designer PRO 250 и MakerBot Replicator Z18. Геометрические размеры образцов выполнялись согласно ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) «Пластмассы. Образцы для испытания».

Образцы выполнены с отверстиями в них разной формы и сплошные. После испытаний были получены образцы с разным характером разрушения, представленным на рисунке 1.

Наилучшие прочностные характеристики показали образцы, напечатанные без отверстий. Зависимость прочностных характеристик образцов от типа принтера (алгоритма печати) не обнаружена.

Как видно из рисунка 1, разрушение образцов происходило ближе к их краям. Все образцы с круглыми отверстиями разрушились по схожему механизму – в наиболее тонком месте.

Образцы с квадратными отверстиями разрушились сразу в нескольких местах – ближе к краю, а также к центру образца, как правило, с выпадением отдельных фрагментов из общего сечения образца. В каком из этих мест разрушение было первичным – не выявлено, но, по-видимому, первичное место разрушения у каждого образца с квадратным отверстием было индивидуально. Механизм разрушения данных образцов, очевидно, связан с резонансом, который провоцируется формой отверстий и запускается из первоначальной точки разрушения образца.

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что при необходимости получения наиболее прочных образцов их следует изготавливать сплошного сечения. Для дальнейших

исследований, на наш взгляд, перспективным является изучение влияния на характер разрушения образцов степени заполнения их ячеистой структуры при укладке нитей полимера 3D-принтером.

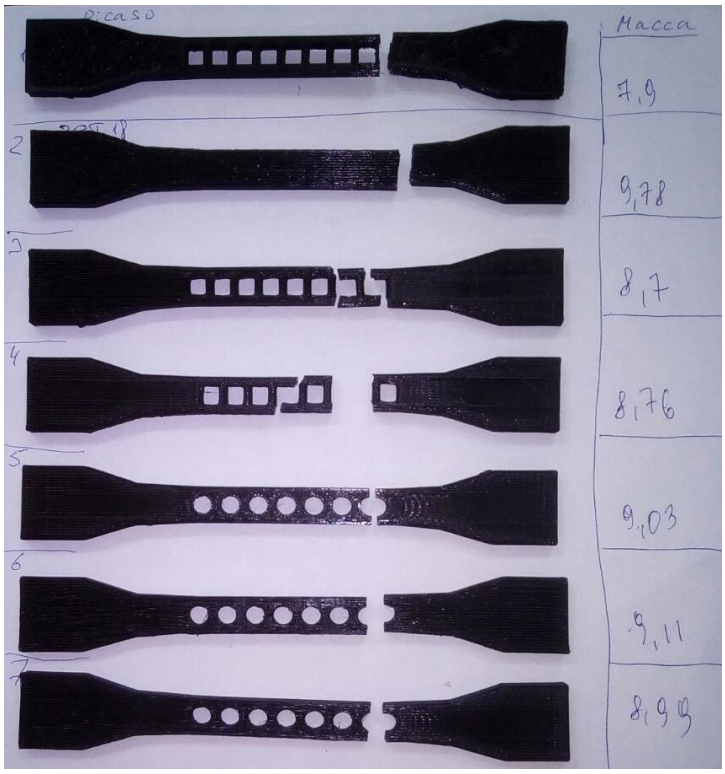



Рисунок 1. Образцы из термопластичного полиэфира после испытаний на разрывной машине МР-0,5-1.

Список используемых источников

1. Макарчук, М.В. Исследование механических свойств материалов, используемых для изготовления изделий в промышленном дизайне / М.В. Макарчук, Е.М. Преображенская // В книге: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2019. С. 184-185.

2. Макарчук, М.В. Повышение прочностных характеристик ячеистой структуры в образцах из термопластичного полиэфира / М.В. Макарчук, Е.М. Преображенская // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2019. С. 186-187.

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАРБИДА ЦИРКОНИЯ

**Алексеева Т.И.[1], Аникин А.Е.[1], Галевский С.Г.[2]**
***[1]- ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия, tatyanaalekseeva8ork@yandex.ru;***
***[2]- ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия.***

Среди карбидов тугоплавких металлов высокими эксплуатационными свойствами обладает карбид циркония, что делает его потенциально пригодным для решения многих задач современного материаловедения [1]. Быстротечный синтез в условиях турбулентного химически активного плазменного потока (т.н. плазмосинтез) в непрерывном режиме обеспечивает получение карбида циркония в нанодисперсном состоянии [2].

По результатам моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков осуществлен выбор порошкообразного сырья и газов – восстановителя и теплоносителя, характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные характеристики порошкообразного сырья и технологических газов.

| Порошкообразное сырье и технологические газы | Содержание основного вещества, % не менее |
|---|---|
| Диоксид циркония ЦрО ГОСТ 21907-76, изм. | 99,0 |
| Метан (природный газ) | 93,6 (этан-3,0; пропан-2,18; бутан-1,18) |
| Технический водород ГОСТ 3022 – 80, изм | 99,8 |
| Технический азот ГОСТ 9293-84, изм. | 99,5 (содержание кислорода не более 0,5) |

Синтез карбида циркония проводился в трехструйном плазмометаллургическом реакторе, созданном совместными усилиями СибГИУ и НПФ «Полимет», включающим также системы электро-, газо-, водоснабжения и вентиляции, контрольно-измерительных приборов и автоматики, дозирования шихтовых материалов и улавливания продуктов плазмообработки [3]. Твердые продукты синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, масс- спектрометрического, электронно-микроскопического, термогравиметрического анализов и методом БЭТ. Газообразные продукты и продукты термодесорбции исследовались хроматографическим методом. Исследовались технологический вариант с использованием шихты состава: $ZrO_2$ + $CH_4$ + $N_2$. При этом оптимизировалось содержание в продуктах синтеза карбида циркония.

Получено следующее уравнение, описывающее зависимость содержания карбида циркония от основных технологических факторов:

$$[ZrC] = -109{,}72 + 0{,}0371\ T_0 + 0{,}0034\ T_з - 0{,}0687\{CH_4\},$$

где $T_0$ – начальная температура плазменного потока (5000 – 5400 К);

$T_з$ – температура закалки (2600 – 2800 К);

$\{CH_4\}$ – количество восстановителя (метана) (100 – 120% от стехиометрически необходимого).

Основные параметры синтеза и характеристики карбида циркония представлены в таблице 2.

Результаты электронно-микроскопического исследования продуктов карбида циркония представлены на рисунке. Можно видеть (рисунок а), что просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) обеспечивает при увеличении 25000 – 30000 только констатацию наноуровня. Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ, рисунок б) обеспечивает при увеличении 220000 визуализацию отдельных частиц, определение их размеров и формы, а также выявление соответствующей карбиду примеси пиролитического, несвязанного в карбид, углерода. Карбид циркония получен в виде ограненных частиц кубической формы размерного диапазона от 10 до 40 нм. Ограненная форма частиц карбида циркония свидетельствует об образовании их по механизму «пар-кристалл», предположительно при взаимодействии паров циркония и циана. Синтезированный карбид циркония по наноуровню и морфологии существенно отличается от его микропорошка, полученного механическим диспергированием (рисунок в).

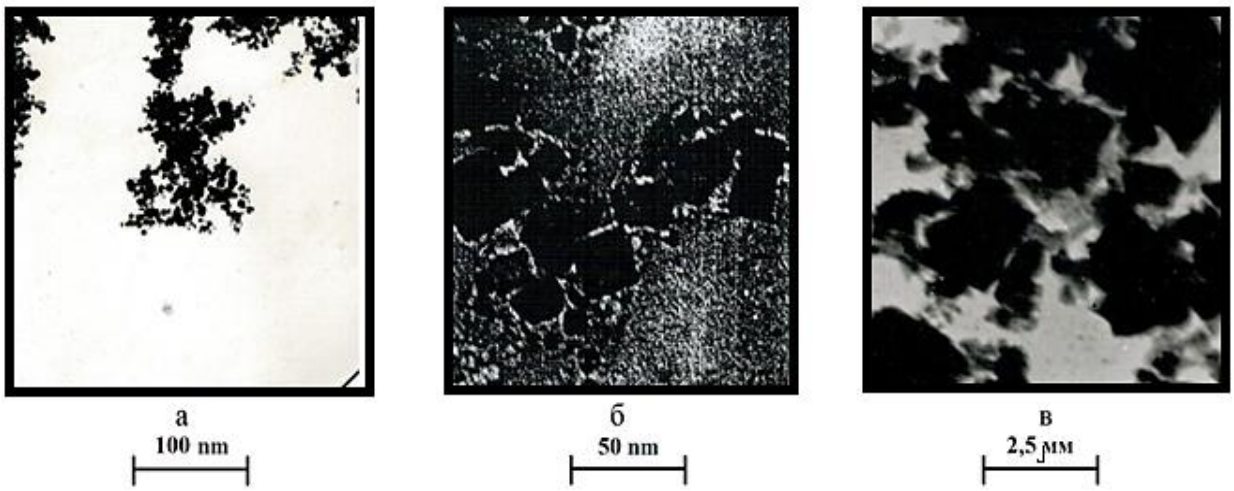



Рисунок 1. Микрофотографии нано- (а, б) и микроскопического карбида циркония (а – ПЭМ; б – РЭМ; в – ПЭМ).

Установлена возможность получения карбида циркония в наносостоянии в условиях плазменных азотно – углеводородного потока. По фазовому и химическому составу, дисперсности карбида циркония предлагаемый способ его получения является конкурентоспособным и может занять лидирующие положения в производстве этого материала для функциональных защитных покрытий.

Таблица 2.

Основные параметры синтеза и характеристики карбида циркония.

| Параметры синтеза и характеристики карбида циркония | |
|---|---|
| Состав газа – теплоносителя, % об.<br>азот; водород; природный газ (метан) | <br>74,0; 2-5; 1,0 |
| Крупность цирконийсодержащего сырья, мкм | 0,5…5,0 |
| Количество карбидизатора (метана), % от стехиометрического | 100 – 130 |
| Начальная температура плазменного потока, К | 5000-5400 |
| Температура закалки, К | 2300 – 2800 |
| Химический состав, %<br>Карбид циркония ZrC<br>диоксид циркония $ZrO_2$<br>углерод свободный $C_{своб}$<br>азот N | <br>94,12 – 93,61<br>4,56 – 5,27<br>1,32 – 1,12<br>1,87 – 2,12 |
| Форма частиц | Округлая |

Установлена возможность получения карбида циркония в наносостоянии в условиях плазменных азотно – углеводородного потока. По фазовому и химическому составу, дисперсности карбида циркония предлагаемый способ его получения является конкурентоспособным и может занять лидирующие положения в производстве этого материала для функциональных защитных покрытий.

Список используемых источников

1. Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, С.Г. Галевский. Технологические решения в производстве карбида циркония: анализ, оценка состояния и перспектив // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т.23 .№ 1. С. 256–270. DOI: 10.18721/ JEST.230126.

2. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: монография: в 3 т. /науч. Ред. Г.В. Галевский; дополнительный том. Плазмометаллургическое производство карбида кремния: развитие теории и совершенствование технологии /В.В. Руднева. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 387 с.

3. Ефимова К.А, Галевский Г.В., Руднева В.В., Алексеева Т.И. Реактор для обработки и производства тугоплавких материалов: теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики / Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF-XV. –2016. - pp. 72-76.

# ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИКИ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ $(1-x-y)BiFeO_3$-$xPbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$-$yPbTiO_3$

**Болдырев Н.А.[1], Павленко А.В.[2], Шилкина Л.А.[1], Глазунова Е.А.[1]**

*[1]- Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, nboldyrev@sfedu.ru;*

*[2]- Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону.*

Мультиферроики (материалы с сосуществующими электрическим и магнитным упорядочением) в настоящее время являются одними из наиболее интенсивно изучаемых объектов в материаловедении [1] благодаря широкому спектру их возможных применений, включая производство датчиков переменного и постоянного магнитного поля, элементов памяти и устройств спинтроники [2, 3]. Феррит висмута, BiFeO3 (BF), является представителем данного класса материалов ($T_C$ - 1123 K, $T_N$ - 643 K) и в настоящее время рассматривается в качестве основы для многих магнитоэлектрических структур. Однако широкому применению феррита висмута препятствует ряд проблем, в том числе сложность получения BF в однофазном состоянии, повышенная электропроводность, вызванная наличием в его структуре ионов переменной валентности ($Fe^{2+}/Fe^{3+}$) и вакансий кислорода, а также чрезвычайно высокое электрическое коэрцитивное поле ($E_C$), необходимое для переориентаций сегнетоэлектрических доменов. Тем не менее, модифицирование редкоземельными элементами или создание твердых растворов (ТР) на основе BF позволяют стабилизировать структуру и улучшить характеристики $BiFeO_3$. Уже давно бинарные системы на основе BF являются предметом активного изучения, причем довольно большое внимание уделяется системе $(1-x)BiFeO_3$-$xPbTiO_3$. Введение титаната свинца $PbTiO_3$ (PT) не только стабилизирует перовскитную фазу, но и формирует морфотропную область (МО) в окрестности $x \sim 0.3$. В этой области система $(1-x)$BF-$x$PT демонстрирует довольно высокие пьезоэлектрические характеристики, но при этом сохраняет высокую электрическую проводимость. В связи с этим в последнее время значительное внимание уделялось получению высокотемпературных сегнетоэлектриков путем создания твердых растворов тройных систем на основе BF и PT [4-6]. Данная работа посвящена изучению характеристик одной из таких систем, где в качестве третьего компонента выступил сегнетоэлектрик ферониобат свинца $PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$.

Тройная система $(1-x-y)BiFeO_3$-$xPbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$-$yPbTiO_3$ исследовалась при помощи семи исследовательских разрезов: I ($x$ =0.175…0.325, $\Delta x$ = 0.025, $y$ = 0.05); II ($x$ = 0.125…0.275, $\Delta x$ = 0.025, $y$ = 0.1); III ($x$ =0.075…0.225, $\Delta x$ = 0.025, $y$ = 0.15); IV ($x$ = 0.05, y = 0.175…0.325, $\Delta y$ = 0.025); V ($x$ = 0.1, y = 0.125…0.275, $\Delta y$ = 0.025);.VI ($x$ = 0.15, y = 0.075…0.225, $\Delta y$ = 0.025); and VII ($x$ = 0.1125…0.1875, $\Delta x$ = 0.0125, y = 0.1125…0.1875, $\Delta y$ = 0.0125).

Образцы получены путём двукратного твердофазного синтеза при $T_1$ = (1093÷1173) К ($\tau_1$ = 10 ч.), $T_2$ = (1143÷1223) К ($\tau_2$ = 10 ч.) с последующим спеканием при температуре $T_{sin}$ = (1273÷1353) К ($\tau_{cn}$=2 ч) в зависимости от состава. Исходными реагентами служили $Bi_2O_3$, $Fe_2O_3$, PbO, $TiO_2$, $Nb_2O_5$ с содержанием основного вещества не менее 99.95 %. Образцы спекались в виде дисков Ø=10 мм и *h*=1 мм. После механической обработки на плоские поверхности дисков наносились электроды ступенчатым вжиганием серебросодержащей пасты: при 473К в течение 20 мин., при 773К в течение 30 мин. и при 1073К в течение 20 мин.

Было установлено (рис. 1), что ромбоэдрическая (Рэ) фаза преобладает в разрезах I, II и III, а в остальных наблюдается морфотропный фазовый переход из Рэ в тетрагональную (Т) фазу, который полностью происходит только в IV разделе. Полученные данные позволили построить фазовую диаграмму исследуемой системы в области, богатой BF. На рис. 1 показана построенная при помощи данных из работ [7, 8] полная фазовая диаграмма системы BF-PT-PFN. Видно, что при концентрациях $x + y \geq 0.5$ в исследуемой тройной системе наблюдается обширная МО, расширяющаяся по мере увеличения концентрации BF.

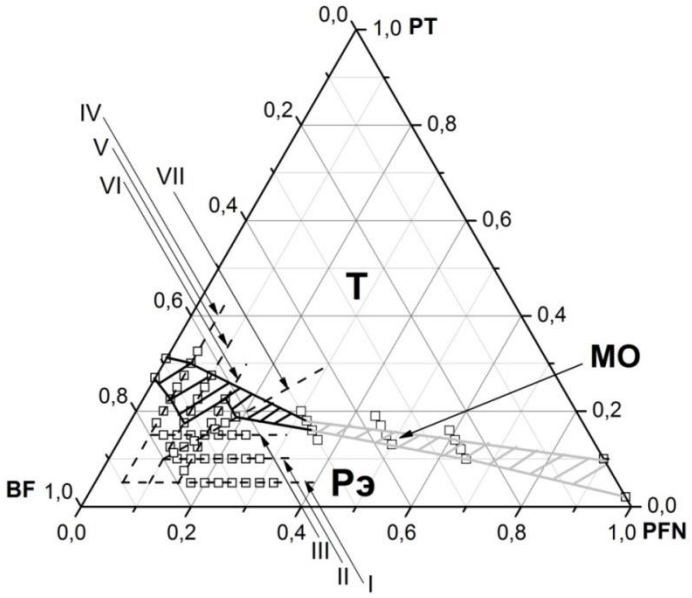



Рисунок 1. Фазовая диаграмма тройной системы (1-x-y)$BiFeO_3$-x$PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O_3$-y$PbTiO_3$ с указанием исследовательских разрезов. Заштрихованная область – МО (серая штриховка – данные [7, 8]).

В рамках исследования были проведены работы по созданию в исследуемых керамиках поляризованного состояния с использованием метода «горячей» поляризации. Несмотря на то, что МО традиционно считается областью экстремальных свойств, зафиксировать относительно высокие и стабильные по времени пьезоотклики удалось лишь в образцах разреза I, который целиком расположен в Рэ области. Значение $d_{33}$ сначала достигает минимума при $x$ = 0,25, а затем увеличивается при увеличении концентрации PFN (рис. 2). Наибольшее значение пьезомодуля 50 пКл/Н для

образца с $x = 0{,}325$ намного выше, чем величина $d_{33}$, наблюдавшаяся в керамике BF-PT, изготовленной по обычной керамической технологии (~17пКл/Н) [8]. Это свидетельствует об эффективности модифицирования твердых растворов на основе BF ферониобатом свинца.

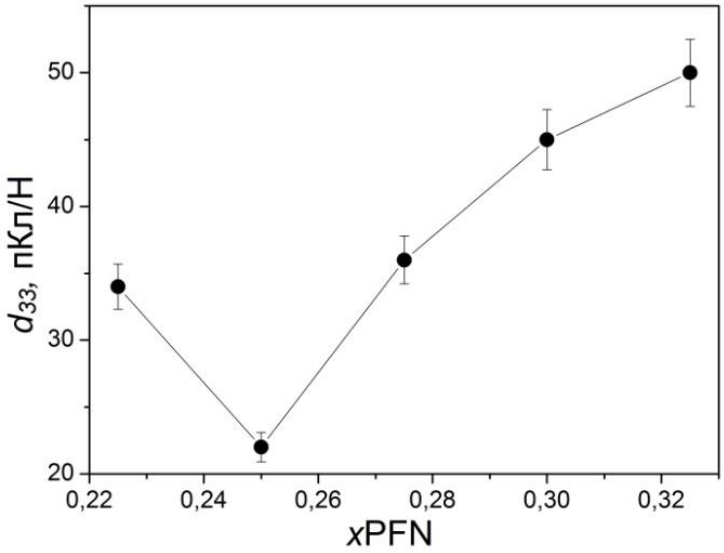



Рисунок 2. Зависимость пьезомодуля $d_{33}$ от концентрации PFN.

**Работа выполнена при поддержке проектов №№ 3.6371.2017/8.9, 3.6439.2017/8.9 государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ и Стипендии Президента РФ СП-1930.2019.1 с использованием оборудования ЦКП «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.*

Список используемых источников

1. Pyatakov A P, Zvezdin A K // *Phys. Usp.* 2012. V. 55. P. 557–581.
2. J. Zhai, Z. Xing, S. Dong, J. Li, D. Viehland. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 8(8), P. 062510.
3. W.A.Borders, H. Akima, S. Fukami, S. Moriya, S. Kurihara, Y. Horio, S. Sato, H. Ohno. // Applied Physics Express. 2008. V. 10(1). P. 013007.
4. J. Zhuang, J. Zhao, L.-W. Su, H. Wu, A.A. Bokov, W. Ren, Z.-G. Ye. // Journal of Materials Chemistry C. 2015. V. 3(48), P. 12450-12456.
5. Q. Lin, C. He, X. Long. // J. Electroceram. 2016. V. 36. P. 8–15.
6. A. Ahlawat, S. Satapathy, R.J. Choudhary, M.K. Singh, P.K. Gupta. // Mater. Lett. 2016. V. 181, P. 123–126.
7. D. Pang, C. He, S. Han, S. Pan, X. Long, H. Tailor // J. Eur. Ceram. Soc. 2015. V. 35. P. 2033–2040.
8. S.P. Singh, S.M. Yusuf, S. Yoon, S. Baik, N. Shin, D. // Acta Materialia. 2010. V. 58. P. 5381–5392.
9. T.P. Comyn, T. Stevenson, A.J. Bell. // J Phys IV Fr. 2005. V

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ СЕРОСОДЕРЖАЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

**Красин М.А., Павлинов В.В., Ефимов А.А., Тишкова А.Г.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***

Для создания более качественных дорог разработано большое количество добавок в асфальтобетонные смеси [1-3]. В наиболее общей классификации они могут быть подразделены на две группы. В первую включаются продукты, разработанные для улучшения эксплуатационных характеристик асфальтобетона. Они представлены полимерами, адгезионными добавками, ингибиторами процессов старения, пластификаторами, стабилизаторами (природный асфальт, каталитические нейтрализаторы) и волокнистыми материалами, служащими наполнителями для вяжущего [4,5]. Определенные полимерные материалы — эластомеры и пластомеры, используются для модификации битума с целью повышения долговечности и качества дорожного покрытия. Они могут применяться для повышения сдвигоустойчивости при высокой температуре или, например, для повышения устойчивости к растрескиванию при низкой температуре. Ко второй группе добавок относятся отходы или переработанное вторичное сырье, такое как гранулированная резина, зола и др. [6-8].

Перспективным направлением в производстве дорожных покрытий является применение связующих материалов, включающих в качестве компонента элементную серу. Целесообразность такого использования серы обусловлена ее дешевизной, с одной стороны, и уникальными вязкостно-пластическими свойствами, с другой. Применение серы в качестве модификатора битумов увеличивает их окислительную стабильность, улучшает адгезионные свойства. Целенаправленное исследование закономерностей процесса взаимодействия элементной серы с битумом актуально и представляет практический интерес с точки зрения разработки технологии получения серобитумных вяжущих.

В данной работе разработан одностадийный технологический процесс модификации битума элементарной серой в смесителе периодического действия, конечной стадией которого является получение серобитумного вяжущего для дорожных покрытий, т.е. материала наиболее предпочтительного для широкого применения в дорожном строительстве по сравнению с используемыми в настоящее время.

С целью выявления оптимальных технологических параметров проведения процесса модификации серой, нами была создана экспериментальная установка на базе лабораторного смесителя СРК-3-1 с Z-образными лопастями и объемом рабочей камеры 3 литра (рис.1). Она состоит из смесителя с приводом от электродвигателя переменного тока, системы управления обогревом смесительной камеры. Для привода

установки использован электродвигатель асинхронный В71В4У2 мощность которого равна 0,75 кВт с числом оборотов 1400 об/мин.

Привод смесителя обеспечивает вращение рабочих лопастей со скоростью 92,5 и 104 об/мин, при этом достигается фрикция 1:1,125. Корпус смесителя обогревался с помощью электронагревателя мощностью 1кВт. Для контроля температуры массы в рабочей полости смесителя установлена термопара, для которой в крышке смесителя предусмотрен штуцер подключения. Сигнал от термопары подавался на измеритель-регулятор типа ТРМ-10.

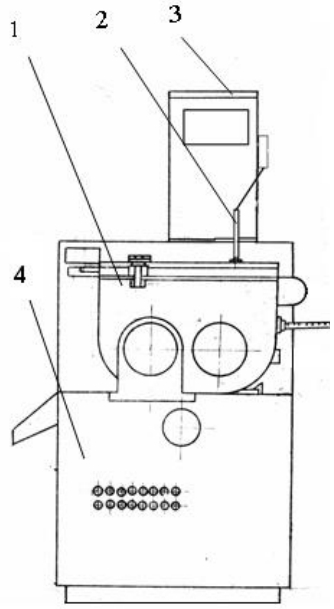



Рисунок 1. Общий вид экспериментальной установки.

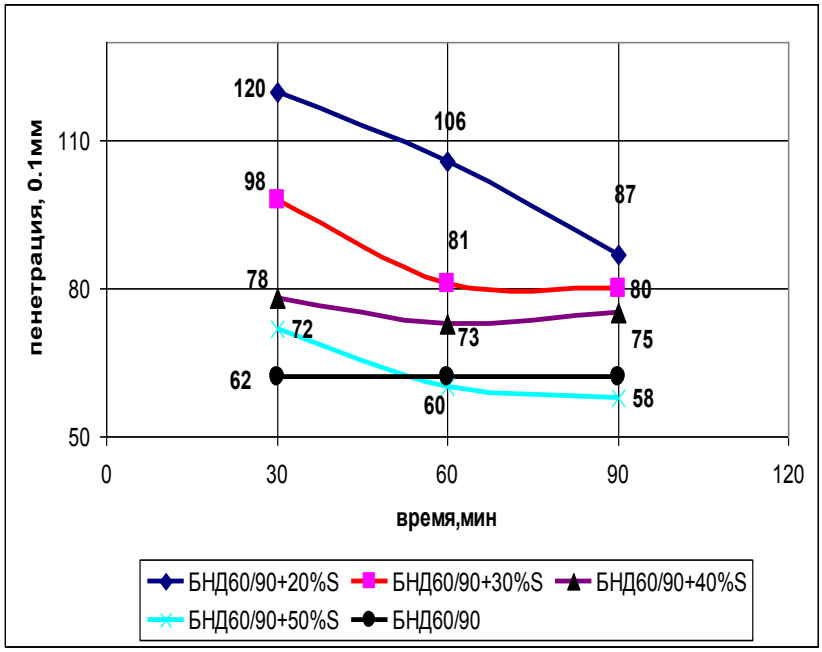



Рисунок 2. Изменение пенетрации битума от времени смешения и концентрации серы.

Внутри сварной станины на плите установлен электродвигатель. Вращение от него через пару зубчатых колес передается валу, установленному на подшипниках скольжения, а затем – через зубчатые пары колес, входящие в двухступенчатый цилиндрический редуктор, передается передней и задней лопастям смесительной камеры. Валы лопастей установлены с одной стороны на шарикоподшипниках, смонтированных в корпусе, а с другой стороны – в опорах скольжения. Лопасти вращаются в корпусе. Для обеспечения герметичности корпуса камеры смешения на валах установлены уплотнения. Сверху корпус закрывается крышкой, в которой закреплена уплотнительная резиновая прокладка. Крышка поджимается к корпусу откидными болтами с рукоятками. Для слива приготовленной массы корпус смесительной камеры с открытой крышкой поворачивают при помощи рукоятки и опрокидывают до упора на лоток, расположенный на станине.

Исследования проводились на серобитумных композициях с концентрацией серы в битуме (в % масс.): 20; 30; 40, до получения

гомогенной массы. На рис. 2 представлены результаты измерения пенетрации от времени смешения серобитумного вяжущего и концентрации серы в системе. Пенетрация – величина, характеризующая консистенцию нефтепродуктов и является аналогом вязкости. Именно этот параметр является входным «фильтром» на асфальтобетонных заводах при приемке битумов. Проведенные исследования показали, что увеличение времени смешения приводит к уменьшению значений пенетрации за счет большего времени взаимодействия серы с углеводородами битума.

Список используемых источников

1. Plewa A., Belyaev P.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F., Frolov V.A. The effect of modifying additives on the consistency and properties of bitumen binders // Advanced Materials and Technologies. 2016. № 4. С. 35-40.

2. Беляев П.С., Забавников М.В., Маликов О.Г. К вопросу получения резино-битумного концентрата для асфальтобетонных дорожных покрытий из изношенных автомобильных шин // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2008. Т. 14. № 2. С. 346-352.

3. Беляев П.С., Маликов О.Г., Забавников М.В., Соколов А.Р. Повышение качества нефтяных битумов путем модификации продуктами переработки изношенных автомобильных шин // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2003. Т. 9. № 1. С. 63-69.

4. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 22. № 2. С. 264-271.

5. Беляев В.П., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Фролов В.А. Повышение энергоэффективности процесса модификация битума регенератом резиновой крошки // Components of Scientific and Technological Progress. 2013. № 1 (16). С. 75-77.

6. Клинков А.С., Соколов М.В., Полушкин Д.Л., Шашков И.В., Беляев П.С., Туляков Д.В. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом // Вестн. Тамбовск. гос. техн. ун-та. 2008. Т. 14. № 4. С. 870-881.

7. Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов. – Тамбов: Из-во ТГТУ, 2015. - 188 с.

8. Беляев П.С., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Фролов В.А., Решение проблемы утилизации отходов резинотехнических изделий путем модификации дорожных вяжущих/ Вестн. Воронежск. гос. ун-та инженерных технологий. Воронеж, №2 (60), 2014 г., с. 129-131.

# СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИЭФИРА НА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЕ

**Макарчук М.В., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,***
***energ-lab@yandex.ru***

Применение термопластичного полиэфира в качестве материала в аддитивной технологии нашло широкое распространение. Данный полимер относится экологичным видам материалов, является устойчивым к изменению температуры, не растворяется в ацетоне. Однако механические свойства материала недостаточно изучены [1, 2].

В представленной работе проводились исследования предела прочности при растяжении образцов из термопластичного полиэфира на разрывной машине МР-0,5-1 (рисунок 1). Образцы изготавливались на 3D-принтерах PICASO 3D Designer PRO 250 и MakerBot Replicator Z18. Геометрические размеры образцов выполнялись согласно ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) «Пластмассы. Образцы для испытания».

Рисунок 1. Испытание образца из термопластичного полиэфира на разрывной машине МР-0,5-1

Результаты испытания образца на разрывной машине МР-0,5-1 представлены на графике зависимости сопротивления к разрушению от приложенной нагрузки (рисунок 2). Полученные данные испытания образцов, напечатанных на 3D-принтерах PICASO 3D Designer PRO 250 и MakerBot Replicator Z18, сведены в таблицу 1.

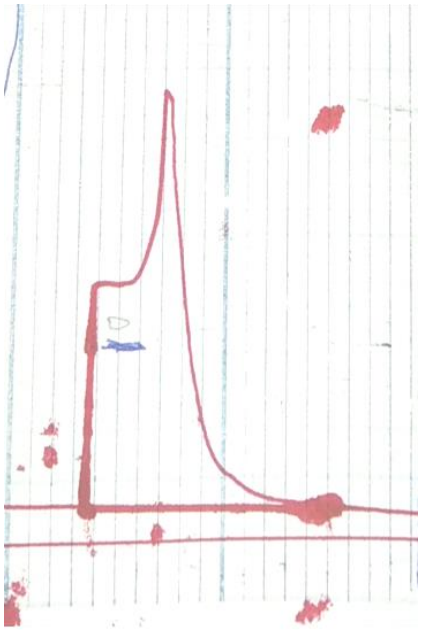


Рисунок 2. График испытания образца из полиэфира на разрывной машине МР-0,5-1

Таблица 1.

| Принтер | Тип отверстий в образце и номер образца | Масса образца, г | Сила разрыва образца, кгс | Удлинение образца при разрыве, мм |
|---|---|---|---|---|
| Picaso | нет | 6,97 | 47 | 15 |
| | квадрат | 5,98 | 0 | 0 |
| | квадрат 2 | 7,9 | 24 | 4 |
| | круг | 7,08 | 18 | 5 |
| Z18 | нет | 10,04 | 211 | 15 |
| | нет 2 | 9,78 | 187,5 | 9 |
| | квадрат | 8,74 | 83 | 7 |
| | квадрат 2 | 8,7 | 81 | 6 |
| | квадрат 3 | 8,76 | 27 | 5 |
| | круг | 8,8 | 79 | 6 |
| | круг 2 | 9,03 | 86 | 6 |
| | круг 3 | 9,11 | 89 | 4 |
| | круг 4 | 8,99 | 86 | 6 |
| Z18, без отверстий в образце | | | | |
| Заполнение ячеек 100% | 1 | 9,65 | 211,5 | 15 |
| | 2 | 9,68 | 218 | 14 |
| | 3 | 9,65 | 217,5 | 11 |
| Заполнение ячеек 50% | 1 | 7,58 | 137 | 8 |
| | 2 | 7,53 | 128 | 8 |
| | 3 | 7,55 | 138 | 8 |

В таблице 1 приведены данные для трех типов образцов, напечатанных на каждом из принтеров. Образцы выполнены с отверстиями в них разной формы и сплошного сечения. Как видно из таблицы, наилучшие прочностные характеристики показали образцы, напечатанные без отверстий. Зависимость прочностных характеристик от типа принтера (алгоритма печати) не замечена.

Дополнительно были проведены испытания образцов напечатанных на 3D-принтере MakerBot Replicator Z18 с 50 и 100% плотностью заполнения ячеек.

Установлено, что при заполнении на 100% у образцов наблюдается нестабильность прочностных характеристик. В свою очередь у образцов с заполнением ячеек на 50% наблюдается одинаковое удлинение при разрыве, что, по-видимому, связано с ячеистой структурой образца.

Таким образом, анализ полученных данных показал, что необходимо провести дополнительные исследования образцов с разной плотностью заполнения – в диапазоне от 10 до 100%.

Список используемых источников

1. Макарчук, М.В. Исследование механических свойств материалов, используемых для изготовления изделий в промышленном дизайне / М.В. Макарчук, Е.М. Преображенская // В книге: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2019. С. 184-185.

2. Макарчук, М.В. Повышение прочностных характеристик ячеистой структуры в образцах из термопластичного полиэфира / М.В. Макарчук, Е.М. Преображенская // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2019. С. 186-187.

# БЕЗОТХОДНАЯ ТВЕРДОФАЗНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

**Дмитриев О.С., Баронин Г.С., Худяков В.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***
***Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: phys@nnn.tstu.ru***

Политетрафторэтилен (фторполимер) и нанокомпозиты (НК) на его основе, модифицированные дисперсным наполнителем находят применение во многих отраслях техники с неуклонным повышением объёма выпуска изделий из них, что делает актуальным ресурсо- и энергосбережение их производства при жестком экологическом контроле технологических процессов. Одним из путей экологизации, т.е. снижения негативного воздействия производства изделий из фторполимерных нанокомпозитов на окружающую среду является совершенствование технологических процессов. Одной из перспективных на сегодняшний день является технология обработки давлением в твердой фазе, т.е. твердофазная штамповка. По сравнению с другими способами получения изделий технология твердофазной штамповки позволяет существенно уменьшить длительность технологического цикла формования, повысить производительность и решить проблему отходов, полностью исключив их, являясь безотходной или сократив до минимума [1].

Для эффективного использования экологичности и безотходности твердофазной технологии целесообразно применять её при производстве массивных блочных изделий сложной формы из фторполимерных нанокомпозитов, модифицированных дисперсным наполнителем – наночастицами кобальта КоФП. Использование КоФП в качестве наполнителя оказывает влияние на физико-механические свойства материала, дает возможность регулировать структуру и свойства полимерных нанокомпозитов и создавать материалы с требуемыми характеристиками. Небольшие добавки КоФП позволяют повысить пластичность нанокомпозита, делая его пригодным для использования в технологии твердофазной штамповки.

Технологический процесс твердофазной штамповки изделий из фторполимерного нанокомпозита включает в себя следующие операции:

- подготовка цилиндрической заготовки из нанокомпозита;
- нагрев прессформы до температуры формования;
- нагрев заготовки из нанокомпозита до нужной температуры;
- укладка заготовки материала в прессформу;
- подача давления и процесс штамповки;
- извлечение готового изделия из прессформы.

Таким образом, на первом этапе получают исходную заготовку для твердофазной объёмной штамповки из политетрафторэтилена и наночастиц кобальта КоФП. Следующей операцией является подготовка нанокомпозита в электромагнитном смесителе, затем с помощью механоактиватора, в котором происходит смешение матрицы полимерного композита с модификатором,

после чего проводится холодное прессование с дальнейшим спеканием. Прессование исходной заготовки нанокомпозита осуществляется на гидравлическом прессе, позволяющим развивать давление до 35 МПа. После прессования заготовку нанокомпозита извлекают из пресс-формы и помещают в печь для спекания. С целью получения наивысших физико-механических характеристик изделия с минимальными энергетическими и временными затратами необходимо при производстве соблюдать заданные оптимальные технологические режимы формования изделий, которые определяются на стадии разработки материала.

Перед операцией спекания отпрессованную заготовка сначала выдерживается в течение 1 часа при температуре, не превышающей 90°С. Далее температуру медленно увеличивают со скоростью 10…25°С/ч. Спекание заготовки производится в течение 3-х часов при температуре 370…382°С. Затем заготовка охлаждается. Скорость охлаждения рекомендуется поддерживать в пределах 8…14°С/ч при охлаждении до 200°С и 50°С/ч – при температуре ниже 200°С. Соблюдение такого режима охлаждения необходимым условием получения качественных изделий из нанокомпозита. По завершении процесса спекания заготовка нанокомпозита извлекается из печи при температуре не выше 90 °С.

Последней стадией производства изделий является объемная твердофазная штамповка полученной на первом этапе заготовки нанокомпозита. В процессе объемной твердофазной штамповки необходимо учитывать ряд особенностей, чтобы не выйти за пределы твердофазной технологии и обеспечить требуемое качество получаемых изделий, в том числе давление формования (боковые и осевое) и температуру переработки (в середине заготовки). Поэтому главной проблемой, возникающей при разработке и реализации технологического процесса твердофазной штамповки, является определение температуры прессформы и скорости штамповки, потому что при твердофазном формовании за счет диссипации механической энергии может возникнуть перегрев заготовки и деструкция нанокомпозита. Моделирование процесса и расчеты показали, что твердофазную штамповку необходимо осуществлять при температуре, равной 80% от температуры плавления материала фторполимерного нанокомпозита.

Таким образом, разработана экологичная безотходная ресурсосберегающая технология получения блочных изделий на основе фторполимерного нанокомпозитного материала с улучшенными физико-механическими характеристиками. Полученные изделия из фторполимерных нанокомпозитов могут применяться в электротехнической и радиотехнической промышленности, машиностроении и других отраслях.

Список используемых источников

1. Баронин Г.С. Полимерные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного нанодобавками / Г.С. Баронин, В.М. Бузник, В.В. Худяков, О.С. Дмитриев, В.Л. Полуэктов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 886-889.

# ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ TETRA PAK И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЦСП

**Ефанова Д.А., Шахова Е.В., Земсков А.Н., Макеев П.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация***

Интенсивный рост объёмов строительства в России, особенно в области малоэтажного домостроения, вызвал значительный рост потребности в цементно-стружечных плитах (ЦСП). В результате его производства образуется большое количество отходов ЦСП, попытки возврата этих отходов в производство не дали положительного результата [1-4].

С другой стороны современную жизнь трудно представить без продуктов питания, упакованных в Tetra Pak. Длительный срок хранения, сохранение всех полезных и питательных свойств упакованной продукции, удобная форма контейнеров и отсутствие лишнего веса – вот неполный перечень достоинств технологии Tetra Pak. Структура Tetra Pak включает 6 слоев, для изготовления которых используется 75% картона, 20% полиэтилена и 5% алюминиевой фольги. Но при переработке полиэтилен и алюминиевую фольгу трудно отделить друг от друга. Поэтому полученный на их основе, так называемый, «полиалюминий» не находит широкого применения в дальнейшем производстве [5-8].

Таким образом поиск применения данных отходов является перспективной задачей с экономической и экологической точки зрения. Исходя из вышесказанного, было принято решение о получении нового композиционного материала на основе отходов ЦСП и Tetra Pak.

Для получения композиционного материала была использована установка на основе смесителя типа Брабендера (рис. 1) [9-10].

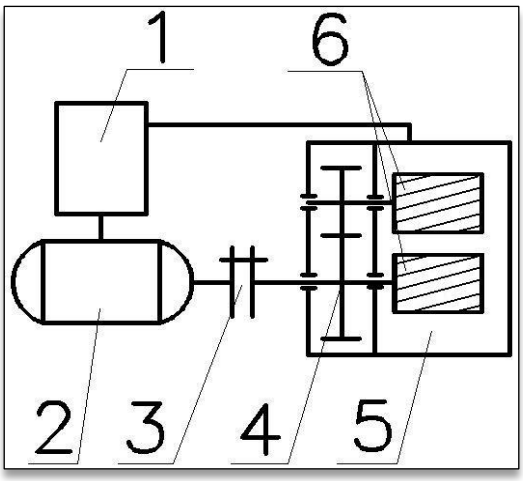



Рисунок 1. Смеситель Брабендера: 1 – шкаф управления; 2 – электродвигатель; 3 – муфта; 4 – фрикционные шестерни; 5 – смесительная камера; 6 – смесительные органы.

Процесс получения композиционного материала происходит следующим образом: отходы ЦСП предварительно смешиваются с отходами Tetra Pak, загружаются в разогретую до 180 градусов камеру, в которой происходит процесс смешения при частоте вращения роторов 45 оборотов в минуту в течении 7 и 15 минут . Далее вынимаем полученную смесь и помещаем её в пресс форму, после прессования полученный образец разрезаем на бруски заданного поперечного сечения и направляем на дальнейшие исследования (рис. 2).

Рисунок 2. Плита полимерного композиционного материала.

Образцы проходили испытание на твердость, водопоглощение и разбухание по толщине, прочность при изгибе, а так же ударную вязкость.

Твердость проверялась на специальном аппарате твердомере, образцы проверялись в трех точках результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Твердость по Шору

| **50% ЦСП 7 мин** | **66% ЦСП 7 мин** | **75% ЦСП 7 мин** | **50% ЦСП 15 мин** | **66% ЦСП 15 мин** | **75% ЦСП 15 мин** |
|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 59 | 60,5 | 52,3 | 62 | 63 |

Для определения водопоглощения и разбухания образцы поместили в ванну с водой на 24 часа, предварительно и после определив размеры и вес изделий (Таблица 2).

Таким образом, анализируя полученные данные можно сделать вывод, что оптимальные прочностные показатели у полученного композита наблюдаются при введении в него 66% ЦСП и времени смешения 15 минут

Список используемых источников

1. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Тамбов, 2015.

2. Переработка отходов полимерных материалов на валково-шнековом агрегате Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 6. № 1 (104). С. 119-123.

3. Ресурсосберегающая технология переработки отходов полимерных материалов Клинков А.С., Макеев П.В., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 3 (47). С. 292-300.

4. Методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества Макеев П.В., Клинков А.С., Полушкин Д.Л., Беляев П.С. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18. № 1. С. 166-172.

5. Валково-шнековый агрегат Клинков А.С., Макеев П.В., Полушкин Д.Л., Соколов М.В., Однолько В.Г. патент на изобретение RUS 2417881 11.01.2009.

6. Анализ эффективности разработанных технологий утилизации отходов термопластов Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Однолько В.Г. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17. № 4. С. 1002-1006.

7. Рециклинг и утилизация тары и упаковки Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В., Однолько В.Г. учебное пособие / А. С. Клинков [и др.] ; М-во образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО "Тамбовский гос. технический ун-т". Тамбов, 2010.

8. Вторичная переработка полимерных материалов на вальцах / И.В.Шашков, А.С.Клинков, М.В.Соколов, Д.Л.Полушкин // Полимеры в строительстве: Тез.докл. – Казань, 2004. – С. 111.

9. Технология получения полимерпесчаной черепицы из отходов термопластов / С.П.Хрущев, И.В.Шашков, А.С.Клинков, П.С.Беляев // Полимеры в строительстве: Тез.докл. – Казань, 2004. – С. 110.

10. Утилизация полимерной тары и упаковки (Учебное пособие) Клинков А.С., Беляев П.С., Соколов М.В., Шашков И.В.,Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 64 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЦСП И ОТХОДОВ TETRAPACK

**Ромашкина Л.В., Ефанова Д.А., Шахова Е.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация***

Композиционный материал на основе отходов ЦСП и TETRAPACK получали на смесителе типа Брабендер (рис. 1). Это устройство, позволяющее изменять в широком диапазоне режимные и конструктивные параметры, и вместе с этим оценивать показатели качества получаемого материала [1-3].

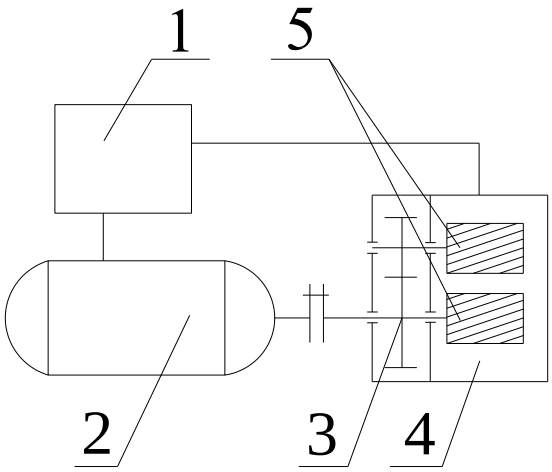



Рисунок 1. Схема устройства: 1 – шкаф управления; 2 – электродвигатель; 3 – фрикционные шестерни; 4 – смесительная камера; 5 – смесительные органы.

Пылевидная смесь ЦСП и гранулы полиалюминия загружаются в смесительную камеру, в которой происходит процесс смешения, и на выходе мы получим композиционный материал, который отправляется на дальнейшие исследования.

В данной работе исследовано влияние температуры на образец дилатометрическим методом. Сущность метода заключается в измерении температурных зависимостей термического расширения и определении коэффициента линейного термического расширения, который для большинства материалов сильно зависит от температуры, скорости нагрева и нагрузки на образец [4].

Линейный дилатометр (рис.2) состоит из плиты 1, термоблока 2, микроскопа 3 и измерительного устройства4. Плита устанавливается в горизонтальное положение винтами 5, которые вращаются в ножках 6. Термоблок с пазами для размещения электрической спирали 7, термометра 8 и образца 9 изготовлен из меди для равномерного нагрева образца. Образец

сверху закрывается медной планкой 10, которая закрепляется винтом 11. Термоблок закрыт защитным кожухом 12. Через кожух, планку, термоблок и плиту проходит сквозное щелевое отверстие 13, через которое свет от электролампы 14 попадает в объектив микроскопа. Микроскоп с окуляр-микрометром 15 установлен на салазках 16 измерительного устройства. Салазки перемещаются с помощью винта 17. Это перемещение измеряется индикатором часового типа 18 через посредство ножки 19. Индикатор крепится к скобе измерительного устройства 20.

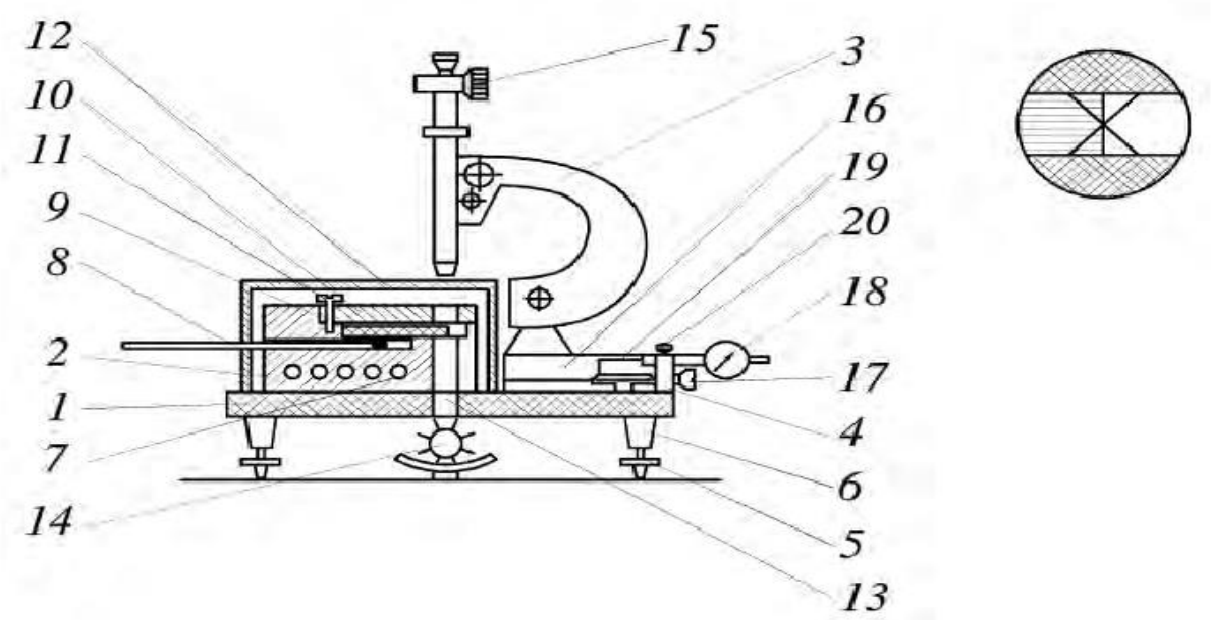



Рисунок 2. Линейный дилатометр.

Коэффициент линейного теплового расширения определяли следующим образом: брали образец длинной 55 мм. круглого сечения и клали его в рабочую полость. После закрытия блока кожухом получали изображение кромки образца. Далее закреплялся индикатор перемещения, и путем его вращения шкала устанавливалась на нулевое значение. Затем включали обогрев термоблока. Скорость повышения температуры была не более 3ºС/мин. По шкале индикатора фиксировали величину температуры образца через каждые 5°С. Для этого винтом перемещали салазки микроскопа так, чтобы перекрестие окуляр-микрометра все время находилось на кромке образца После проведения эксперимента и расчета коэффициента линейного расширения по формуле (1) была построена графическая зависимость (рис 3) [5-6].

$$\alpha = (1/\ l_0)\ (\Delta l/\Delta T) \qquad (1),$$

где $l_0$- начальная длина образца при комнатной температуре;$\Delta l$ – приращение длины в температурном интервале $\Delta T$.

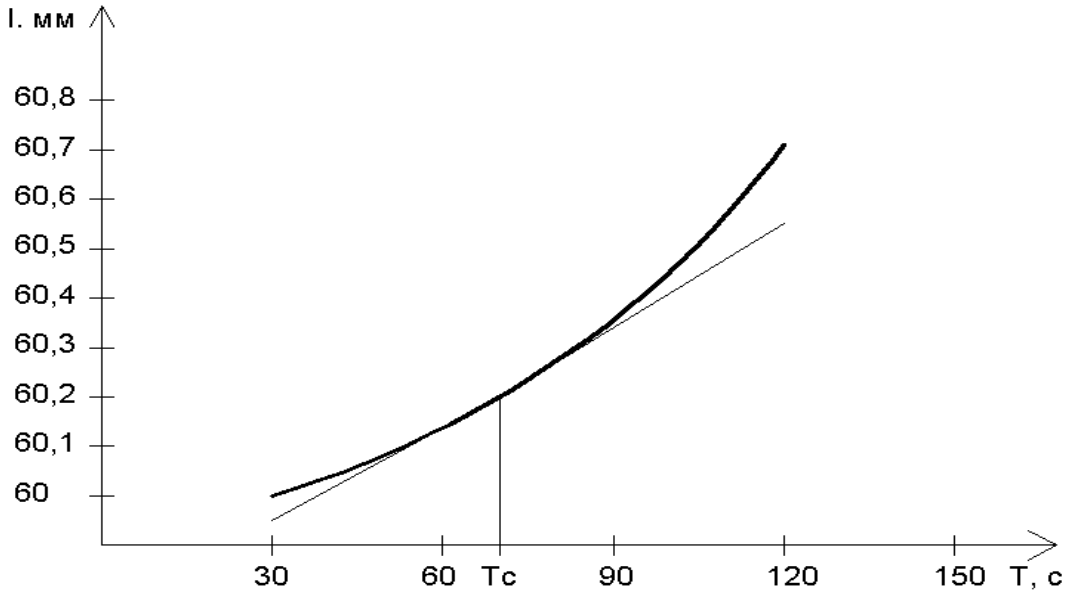



Рисунок 3. Графическая зависимость длины образца от температуры.

Анализируя графическую зависимость можно сделать вывод, что температура стеклования данного образца 67°С.

Список используемых источников

1. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Тамбов, 2015.

2. Переработка отходов полимерных материалов на валково-шнековом агрегате Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 6. № 1 (104). С. 119-123.

3. Ресурсосберегающая технология переработки отходов полимерных материалов Клинков А.С., Макеев П.В., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 3 (47). С. 292-300.

4. Методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества Макеев П.В., Клинков А.С., Полушкин Д.Л., Беляев П.С. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18. № 1. С. 166-172.

5. Анализ эффективности разработанных технологий утилизации отходов термопластов Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Однолько В.Г. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17. № 4. С. 1002-1006.

6. Утилизация полимерной тары и упаковки (Учебное пособие) Клинков А.С., Беляев П.С., Соколов М.В., Шашков И.В.,Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 64 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Петренко В.И., Макарчук А.П.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, vadimasias2014@yandex.ru***

Применение аддитивных технологий получило значительное распространение. Наиболее доступным методом 3D-печати является FDM технология (Fused Deposition Modeling).

Физико-механические свойства детали, получаемой по аддитивной технологии, отличаются по свойствам от используемого филамента. Взаимосвязь технологий 3D-печати и прочностных характеристик рассматривается в немногочисленных публикациях [1-3].

Внутренний объем изделия для экономии материала и сокращения времени печати заполняется полимером в виде ячеистой структуры.

Перед пользователем аддитивной технологии стоит сложный выбор. При экономии количества затраченного материала и времени печати получается прототип с меньшими показателями прочности.

Таким образом, актуальным является исследование прочностных характеристик изделия, выполненного по аддитивной технологии с разным заполнением ячеистой структуры.

Образцы для исследования прочностных характеристик изготавливались по аддитивной технологии на двух 3D-принтерах: MakerBot Replicator Z18 и MakerBot Replicator 5 Gen. Партии образцов из 6 штук формировались с внутренней ячеистой структурой 10-100%. В качестве материала для печати использовался полилактид (PLA). При выращивании образцов применялись настройки печати, рекомендованные производителем оборудования.

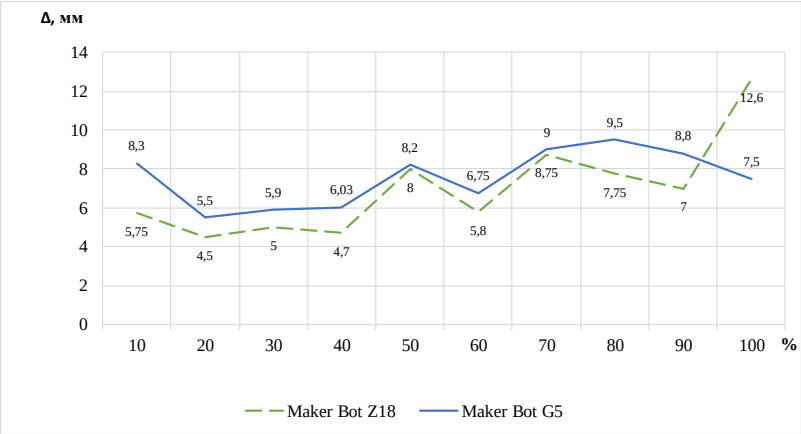



Рисунок 1. Зависимость среднего удлинения образцов до момента разрыва от процента заполнения ячеек.

Удлинение образцов, изготовленных на принтерах Maker Bot Z18 и Maker Bot G5 происходит нелинейно (рис. 1). Характер изменения кривых удлинения образцов коррелируется с характером изменения кривых предела их прочности (рис. 1).

Характер изменения предела прочности образцов, изготовленных на принтерах Maker Bot Z18 и Maker Bot G5 аналогичен (рис. 1).

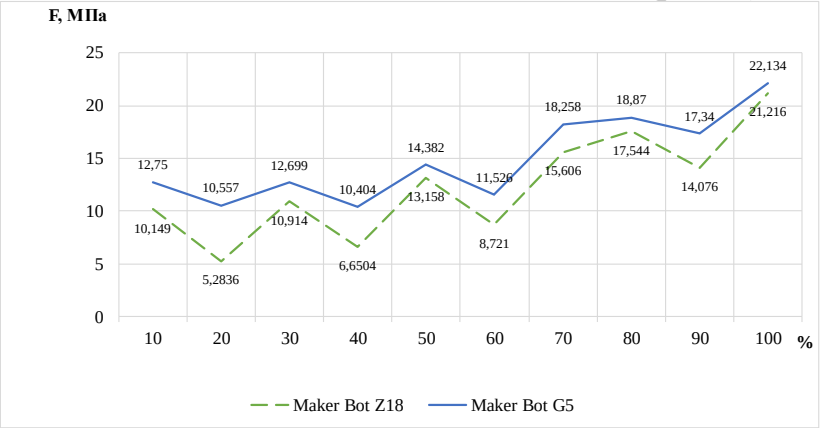



Рисунок 2. Зависимость среднего значения силы, примененной для разрыва образцов, от процента заполнения ячеек.

Список используемых источников

1. Макарчук, М.В. Исследование механических свойств материалов, используемых для изготовления изделий в промышленном дизайне / М.В. Макарук, Е.М Преображенская // IV Всероссийская научно-практическая молодежная конференция. "Современные технологии композиционных материалов". - Башкирский государственный университет (Уфа). – 15 аперля 2019г. – С.184-185.

2. Макарчук, М.В. Повышение прочностных характеристик ячеистой структуры в образцах из термопластичного полиэфира. / М.В. Макарук, Е.М Преображенская // IV Всероссийская научно-практическая молодежная конференция. "Современные технологии композиционных материалов". - Башкирский государственный университет (Уфа). – 15 аперля 2019г. – С.186-187.

3. Петренко, В.И. Исследование физико-механических характеристик образцов из полилактида / В.И. Петренко, А.П. Макарчук // IV Всероссийская научно-практическая молодежная конференция. "Современные технологии композиционных материалов". - Башкирский государственный университет (Уфа). – 15 аперля 2019г. – С.194-197.

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА НА СВЯЗКЕ Fe-Cu-Sn ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

**Ершов В.А., Лутовинова Т.А.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация,***
***slavaershov47@gmail.com***

Порошковая металлургия – этот одно из наиболее перспективных направлений в металлургической технологии. Данная технология позволяет получать высокоточные изделия, требующие минимальной механической обработки из широкого спектра материалов. Высокая необходимость в использовании порошковых технологий объясняется широкими возможностями их использования для создания изделий с заданными физико-механическими свойствами.

Большое преимущество порошковой металлургии состоит в резком сокращении расхода материалов и энергии при производстве изделий, за счет сокращения числа операций при производстве, сокращения количества оборудования и производственных площадей.

Продукция порошковой металлургии используется в авиакосмической, электронной и транспортной отраслях промышленности. При исследовании свойств порошковых деталей, важным является определение их химического состава [1, 2].

При исследовании готового изделия на промышленных спектрометрах установить химический состав затруднительно. Необходимо применять другие способы анализа для установления химического состава [3].

В данной работе рассматривается химический метод определения состава порошкового абразивного материала на металлической связке.

Для определения процентного содержания железа и меди в образце использовался комплесконометрический метод исследования [4, 5].

Методика определения содержания железа в образце следующая: в коническую колбу на 250 мл помещают 2 мл электролита, полученного путем растворения образца в азотной кислоте. Прибавляют 30 мл воды и 1 мл 67%-го водного раствора азотной кислоты. После чего нагревают для окисления железа до трехвалентного. Далее следует нейтрализовать полученный раствор аммиаком в пропорции 1 к 1 до изменения цвета раствора с желто-зеленого до оранжевого и появления взвеси. pH раствора – 4,1. В полученный раствор добавляют 4 мл 1 н. соляной кислоты и нагревают до 60-70$^{o}$C, добавляют 2 мл свежеприготовленного 20%-го раствора сульфосалициловой кислоты и титруют железо 0,1 н. раствором этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) до изменения цвета раствора с тёмно-красного на жёлтый.

К полученному раствору добавляют 30-40 мл ЭДТА и нагревают до 70 $^{o}$C. Нагретый раствор нейтрализуют аммиаком с помощью индикаторной

бумаги и вновь нагревают до кипения. Охладив раствор добавляют 10 мл 3 н. раствора уксуснокислого натрия титруют избыток ЭДТА раствором хлорного железа до появления неисчезающей окраски бурого цвета. Содержание железа определяется по формуле:

$$Fe = \frac{1000aT_{Fe}}{n} \left(\frac{г}{л}\right), \quad (1)$$

где а – количество раствора ЭДТА, затраченного на титрование железа в мл; n – количество электролита, взятого для титрования в мл; $T_{Fe}$ – титр раствора ЭДТА, выраженный в граммах Fe.

Определить титр ЭТДА по железу можно титрованием раствора $FeCl_3$, содержание железа в котором определено заранее весовым способом.

Для определения содержания меди необходимо в пустую колбу на 250 мл набрать 50 мл электролита и добавить 5 мл 90%-го раствора серной кислоты. В Полученный раствор вносят несколько кусочков металлического цинка и кипятят в течение 10 минут. В этот момент медь выделяется в виде бурых хлопьев. Выпавшую в осадок медь фильтруют с помощью неплотного фильтра. Во время фильтрации на фильтр необходимо положить кусочек цинковой стружки для предотвращения окисления меди. Фильтр с медным осадком промывают холодной водой, а затем медь на фильтре растворяют в 50%-ном растворе азотной кислоты, при этом раствор нужно фильтровать в ту же колбу, в которой производилось осаждение. После фильтрации в колбу добавляют 10 мл 90%-го раствора серной кислоты и выпаривают полученный раствор до появления паров $SO_3$. С целью полного удаления азотной кислоты стенки колбы обмывают водой и повторно выпаривают раствор. Далее необходимо разбавить раствор водой до 100 мл, добавить 2 г KJ, и выдержать в темном месте 5 минут. Выделившийся йод необходимо титровать 0,05 н. раствором гипосульфита в присутствии крахмала. Содержание определяется по формуле:

$$Cu = \frac{63{,}5aн.}{n} \left(\frac{г}{л}\right), \quad (2)$$

где а – количество раствора гипосульфита, затраченного на титрование в мл; n – количество электролита, взятого для титрования в мл; н. – нормальность раствора гипосульфита; 63,5 – коэффициент пересчета на медь.

Определение содержания олова возможно весовым методом. Этот метод основан на выделении нерастворимой ß-оловянной кислоты при растворении образца известной массы в азотной кислоте. Полное осаждение ß-оловянной кислоты возможно только в том случае, если в растворе нет других кислот, кроме азотной. Кроме того, осадок так же нужно промывать раствором азотной кислоты или горячим раствором азотнокислого аммония, так как промывание одной водой приводит к образованию золя.

ß-оловянная кислота захватывает значительное количество примесей при осаждении. Вес олова в полученном осадке, можно определить, удалив его в виде летучего галоидного соединения и определив разницу в весе.

Для этого необходимо смешать осадок в тигле с 10-20 кратным количеством галогенида аммония и, учитывая возможное наличие окислов железа добавить немного сернокислого аммония. Полученную смесь нужно прокалить. При этом происходит термическая диссоциация йодистого аммония, образуется йодистый водород, который взаимодействует с двуокисью олова и получается летучее йодное олово:

$$SnO_2 + 4HJ = SnJ_4 + 2H_2O \quad (3)$$

Данная методика позволяет определять состав материалов, изготовленных методом порошковой металлургии на связке Fe-Cu-Sn.

Список используемых источников

1. Мордасов, Д.М. Технические измерения плотности сыпучих материалов / М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. унта, 2004. – 80 с. 2.

2. Balabanov P.V. Thermo-pneumometric method for measuring the thermophysical properties of chemisorbents / P.V. Balabanov, M.M. Mordasov, D.M. Mordasov // Measurement Techniques, 2016. Vol. 59, No. 7, pp. 738-742.

3. Васильев, В.П. Аналитическая химия [Текст]: В 2 кн.: Кн. 1: Титриметрические и гравиметрические методы анализа: Учеб. для студ. вузов, обучающихся по химико-технол. спец. / В.П. Васильев. — 4-е изд. — М.: Дрофа, 2004. — 368 с.

4. Бабко, А.К. Количественный анализ [Текст] / А.К. Бабко, И.В. Пятницкий. – 2 изд., пер. и доп. — М.: Высшая школа, 1962. — 508 с.

5. Лутовинова, Т.А. Химический анализ порошков железа, меди и олова [Текст] / Т.А Лутовинова, С.П. Тебохо // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы IX Международной научно-инновационной молодежной конференции – Тамбов, 2017. – С.261-262.

# ЭЛЕМЕНТНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С МОДИФИКАТОРАМИ W И TA

**Лебедев Д.И.**
***Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН***

## ВВЕДЕНИЕ

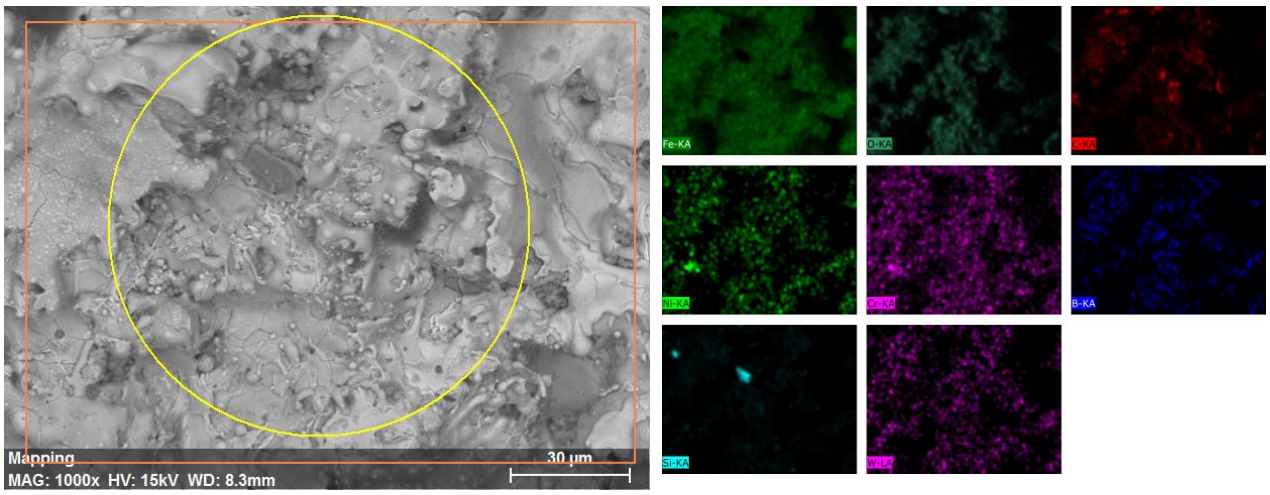
В настоящее время технология электродуговой металлизации по технико-экономическим показателям, является перспективным способом восстановления изношенных деталей техники. Поэтому актуальным остается разработка новых порошковых проволок для получения износостойких покрытий [1-4]. Как показывает практика, покрытия, полученные электродуговой металлизацией, характеризуются неоднородной слоистой структурой. Строение порошковых покрытий, распределение, состав и свойства фаз влияют на износостойкость, твердость и прочность обработанной поверхности деталей машин и механизмов. Поэтому необходимо детальное изучение структуры износостойкого покрытия с учетом технологических свойств порошковой проволоки и процессов нагрева частиц при электродуговой металлизации. В данной работе проведен анализ элементов структуры газотермического покрытия, полученного из порошковой проволоки с добавками вольфрама и тантала. Результаты исследования будут полезны при совершенствовании технологии электродуговой металлизации порошковых проволок [5-10].

На основе обзора и анализа литературных данных и результатов предыдущих исследований разработаны составы порошковой проволоки для технологии электродуговой металлизации. Основу порошкового материала представляет промышленный порошок ПГСР-4 системы Ni-Cr-B-Si.

Элементный состав и распределение элементов модифицированных покрытий исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа HitachiTM 3030, оснащенном EDS анализатором XFlash 6 фирмы Bruker с возможностью определения содержания химических элементов от бора B(5) до америция Am(95). Количественный рентгеноспектральный анализ прибора основан на возбуждении рентгеновской флуоресценции элементов, зависящей от их содержания в образце, и регистрации интенсивности.

На рис. 1 представлены результаты измерения покрытия с модифицирующими добавками W – 0,1. Как видно, покрытие в основном состоит из железа, кислорода и углерода. Данный фрагмент покрытия представляет собой тугоплавкие фазовые неоднородности, бориды образовавшийся в ходе напыления Fe – 76,09%, C – 8,28%, O – 14,87%, B – 2,08%.

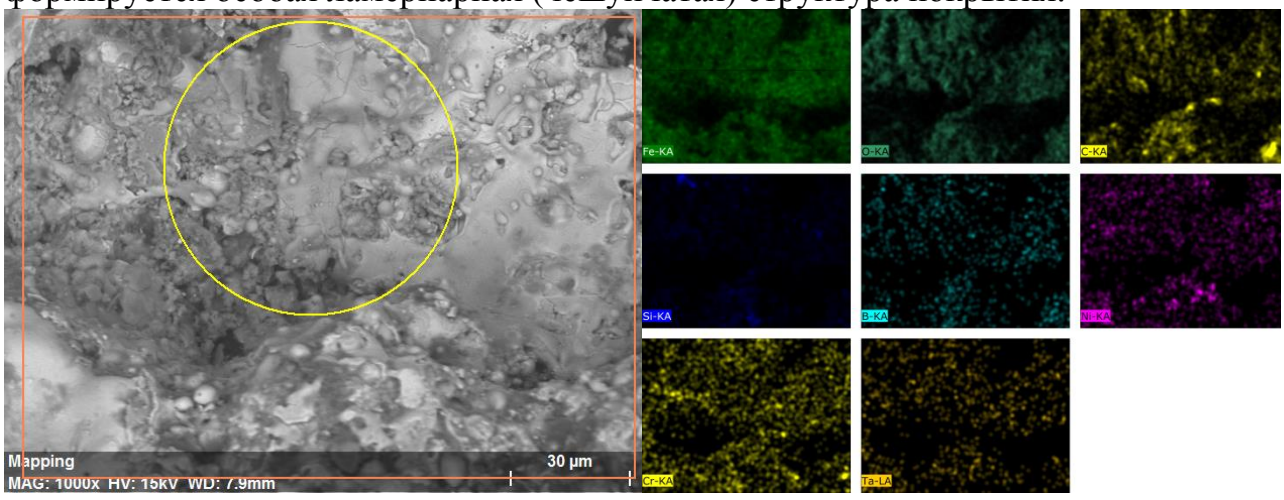
Как видно из рисунка распределение основной упрочняющей фазы Вольфрама (W ~ 0,36%), повышающий износостойкость газотермического покрытия - неоднородна. Вольфрам обладает рядом положительных свойств, уже небольшие добавки вольфрама повышают твердость этих металлов и их устойчивость к окислению.




а) б)

Рисунок 1 – структура и состав модифицированного покрытия с W: а) металлографическое изображение, увеличение ×1000 (РЭМ); б) элементное распределение состава покрытия.

При таких же условиях микрорентгеноспектральным анализом изучены образцы газотермических покрытий с модифицирующими добавками Та - 0,1. Анализ морфологии поверхности покрытия с модифицирующими добавками Та показывает, что покрытие имеет неоднородную слоистую структуру это объясняется тем, что при электродуговой металлизации температура электрической дуги между электродами может достигать ~4000÷5000°С, при этом материал проволоки переходит в жидкую фазу, что обеспечивает образование большого количества мелкодисперсных частиц. В то же время, при коротком замыкании, температура расплава будет ниже, и распыление материала происходит более крупными частицами. Эти процессы приводят к тому, что при электродуговой металлизации порошковых проволок формируется особая ламернарная (чешуйчатая) структура покрытия.




а) б)

Рисунок 2 – структура и состав модифицированного покрытия с Та:
а) металлографическое изображение, увеличение ×1000 (РЭМ);
б) элементное распределение состава покрытия.

Как видно из результатов микрорентгеноспектрального анализа (рис.2), покрытие так же в основном состоит из железа, кислорода и углерода. Fe – 62,38%; O – 22,4%; C – 12,52%; элементный состав и элементное распределение неоднородное. Тантал, как и вольфрам является тугоплавким металлом, выбор модификатора из тантала объясняется наименьшим порогом хладноломкости из переходных металлов (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W). Визуально сравнительно с покрытием вольфрамовым модификатором, структура с танталовым покрытием относительно плотная, с мелкодисперсными наложенными фазами.

Список используемых источников

1. Бороненков В.Н., Коробов Ю.С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург.: Издательство Уральского университета, 2012. 268 с.

2. Архипов, В.Е. Газодинамическое напыление: Структура и свойства покрытий [Текст] / В.Е. Архипов –М: Издательство Красанд, 2017. – 239 с.

3. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии: Т.1. Производство металлических порошков: Учебник [Текст] / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий – Москва: Издательство МИСИС, 2001. –368 с.

4. Тушинский, Л.И. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий [Текст] / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев – Москва: Мир, 2004. – 384 с.

5. Усольцев, А.А. Исследование качества металла, наплавленного порошковыми проволоками системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo [Текст] / А.А. Усольцев, Н.В Кибко, Н.А. Козырев, Л.П. Бащенко, А.И. Гусев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – №1 (23). – С.4-9.

6. Гадалов, В.Н. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами [Текст] / В.Н. Гадалов – М: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2011. – 468 с.

7. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений [Текст] /В.Л. Попов – М: Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2013. – 352 с.

8. Vinokurov, G.G. Statistical approaches to describe the macrostructure formation and wear of powder coatings and materials obtained by high-energy metods [Text] / G.G. Vinokurov, O.N. Popov – Moscow: Academia Publishers, 2013. – 160 p.

9. Vishnu Sankar, PB. Ramkumar, Deepak Sebastian, Doyel Joseph, Abraham Kurian «Optimized Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blades» Materials Today: Proceedings, Volume 11, Part 3, 2019, pp. 912 – 919

10. Sven Henning, Rameshwar Adhikari, Methods in Nanomaterials Characterization Chapter, 1: Scanning Electron Microscopy, ESEM, and X-ray Microanalysis Microscopy , 2017, pp. 1-30.

# ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭД-20*

**Мордасов М.Д., Харитонов Н.А., Мордасов Д.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов,***
***mit@mail.nnn.tstu.ru***

Эпоксидные полимеры, благодаря возможности их модификации, за счет наличия реакционноспособных гидроксильных и эпоксидных групп, с получением материалов с высокими показателями физико-механических свойств, являются наиболее перспективными среди других органических высокомолекулярных веществ [1-3]. При разработке строительно-отделочных материалов на основе эпоксидных смол особое внимание нужно уделить выбору отвердителя, который во многом определяет физико-механические и эксплуатационные свойства полученного полимера.

В настоящее время строительный рынок предлагает широкий спектр отвердителей. Предприятия, производящие данную продукцию разделяют отвердители на группы, выделяя особенности каждого из них, например отвердитель марки ЭТАЛ-2МК предназначен для использования при изготовлении наливных полов, обладает высокими физико-механическими свойствами; отвердитель ПЭПА (полиэтиленполиамин) является самым известным и универсальным, его применяют для получения полимеров, обладающих стойкостью к растворам солей и щелочей; отвердитель ЭТАЛ-45М предназначен для изготовления антикоррозийных покрытий бетонных и металлических поверхностей, стойких к воздействию воды, кислот и щелочей.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния отвердителя на механические свойства эпоксидной смолы ЭД-20. Для отверждения эпоксидной смолы при проведении исследований использовались отвердители марок ПЭПА, ЭТАЛ-45М, ЭТАЛ-2МК.

Отвержденный эпоксидный олигомер, при его использовании в качестве матрицы полимерного композиционного материала, должен обладать максимальными значениями твердости, предельной прочности, ударной вязкости и относительного удлинения. В связи с этим основной задачей данного исследования является выбор отвердителя, который приблизит комплекс физико-механических свойств к идеальным наибольшим значениям.

Подготовка образцов производилась при температуре 20°С путем механического перемешивания компонентов со скоростью 1000 об/мин. Концентрации отвердителей выбраны с учетом рекомендации завода-производителя и составляют: ПЭПА:ЭД-20=1:10, ЭТАЛ-45М:ЭД-20=1:2, ЭТАЛ-2МК:ЭД-20=1:2,2. Подготовка образцов для испытаний осуществлялась в соответствии с ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», ГОСТ 4647-2015 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи».

Испытания на растяжение проводились на универсальной разрывной машине УТС-101-5 (скорость 20 мм/мин, тип датчика 5000 Н). В табл.1 представлены результаты проведенных экспериментальных исследований.

Таблица 1.

Результаты физико-механических испытаний.

| | $\sigma_{пр}$, Н | $\delta$, % | $a$, Дж/см$^2$ | HSA |
|---|---|---|---|---|
| ЭД-20+ПЭПА | 615 | 4,2 | 20 | 70 |
| ЭД-20+ЭТАЛ-2МК | 780 | 4,5 | 23 | 68 |
| ЭД-20+ЭТАЛ-45М | 552 | 5,7 | 25 | 76 |

Для удобства анализа результатов исследования для каждого вычисленного значения физико-механических параметров исследуемых образцов определены безразмерные величины $\overline{HSA}, \overline{\sigma_{пр}}, \overline{\delta}, \overline{a}$, которые вычисляются по формулам:

$$\overline{a} = \frac{a_i}{a_{\max}},$$

$$\overline{\sigma_{пр}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{пр.\max}},$$

$$\overline{\delta} = \frac{\delta_i}{\delta_{\max}},$$

$$\overline{HSA} = \frac{HSA_i}{HSA_{\max}},$$

где, $a_i$ ,$\sigma_i$, $\delta_i$, $HSA_i$ – ударная вязкость, предел прочности при растяжении, относительная деформация и твердость по Шору $i$-го обраца, $a_{max}$ ,$\sigma_{max}$, $\delta_{max}$, $HSA_{max}$ – наибольшее значение параметра из $i$-вариантов. С использованием вычисленных безразмерных величин построена лепестковая диаграмма (рис.1).

На диаграмме (рис. 1) закрашенной области соответствует комплекс свойств, которым должен обладать материал в идеальном случае. В результате проведенных испытаний выявлено, что комплекс физико-механических свойств у образца с отвердителем ЭТАЛ-45М в большей степени соответствует закрашенной области, обозначающей лучшую совокупность исследуемых параметров. Данный образец имеет повышенные показатели твердости, ударной вязкости и относительного удлинения. Таким образом, на основе проведенных исследований для эпоксидного олигомера ЭД-20 выбран отвердитель (ЭТАЛ-45М), обеспечивающий оптимальное сочетание физико-механических свойств полимера для его использования в качестве матрицы полимер минеральных композиционных материалов.

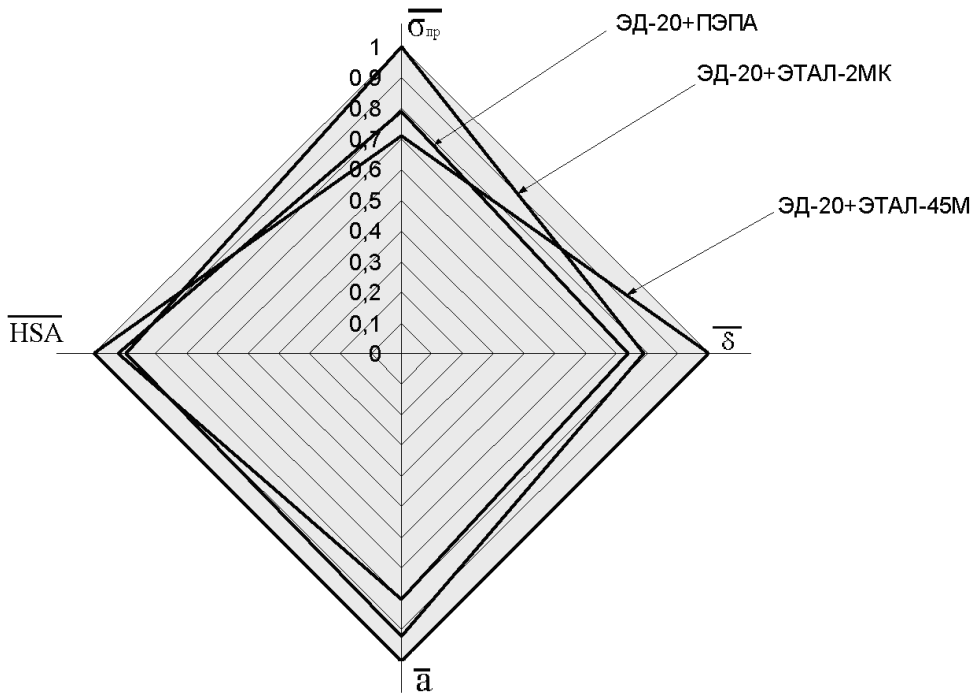



Рисунок 1. Диаграмма сравнения отвержденных эпоксидных олигомеров.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 19–43–680003.*

Список используемых источников

1. Мордасов Д.М. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д.М. Мордасов, П.В. Макеев, Д.Л. Полушкин, М.Д. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2019. Т. 25. № 1. - С. 136-141.

2. Мордасов М.Д. Исследование структуры полимерного композиционного материала / М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов // Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием Сборник материалов конференции. В 3-х частях. - 2018. – С. 464-466.

3. Мордасов М.Д. ИК-спектроскопия полимерного композиционного материала / М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов // Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов. - 2018. - С. 349-350.

# ПРИМЕНЕНИЕ КАРБОНАТОВ И ГИДРОКАРБОНАТОВ АММОНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ТОЧНОГО ЛИТЬЯ

**Леушина Л.И.**
***Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, kafmto@mail.ru***

Отечественные и зарубежные машиностроительные предприятия долгие годы широко применяют литье по выплавляемым моделям с целью получения точных заготовок ответственных деталей машин. Однако указанный способ литья не лишен недостатков: например, дороговизна применяемых материалов и длительность производственного цикла. Для минимизации затрат практикуется изготовление многослойных оболочковых форм с использованием двух связующих материалов, имеющих различную рыночную цену: внутренние, рабочие, слои, непосредственно контактирующие с металлическим расплавом, могут содержать дорогой гидролизованный этилсиликат, а внешние слои – относительно недорогое жидкое стекло. Как показывает опыт, пониженная трещиноустойчивость укрепляющих слоев таких форм часто не позволяет обеспечивать стабильность качества отливок при прокаливании оболочек и последующей заливке расплавом, что в первую очередь нельзя допускать при производстве изделий ответственного назначения.

По этой причине на практике предприятия часто вынуждены прибегать к увеличению числа рабочих слоев оболочковой формы или к применению энергозатратной технологической схемы заливки оболочковых форм в опорном наполнителе, засыпаемом в специальные опоки из дорогостоящего жаростойкого материала.

В работе ставилась задача выбора экономичного технологического варианта повышения трещиноустойчивости внешних слоев керамической оболочки на жидком стекле, применимого к условиям действующего производства и не требующего существенных затрат в ходе освоения.

Сначала анализировались механизмы отверждения композиций форм и стержней на базе жидкого стекла [1-2], как известно, чаще всего представляющего собой водный раствор силикатов калия или натрия [3].

На практике, в литейном производстве, различают три основных принципиально различающихся механизма отверждения жидкостекольных композиций:

– дегидратация;

– $CO_2$-процесс;

– отверждение при участии сложных эфиров или твердых реагентов.

Известна целая линейка приемов дегидратации: тепловая сушка; проветривание или выдержка на воздухе; поверхностная сушка; продувка горячим или холодным воздухом или иным газом; вакуумная экстракция;

комбинирование названных методов. В итоге во всех случаях жидкое стекло теряет влагу.

Принималось во внимание, что технологический процесс получения керамических оболочек точного литья на базовом предприятии предусматривает последовательно воздушно-аммиачную и тепловую сушку [4-5], а также прокаливание форм в нагревательной печи, однако проблема трещиноустойчивости оболочек не снимается.

Было предложено и успешно опробовано в условиях действующего производства внесение в материал огнеупорной обсыпки укрепляющих слоев оболочковой формы технологической добавки на основе порошкообразных карбонатов и гидрокарбонатов, так как при воздействии температур они разлагаются с выделением летучего диоксида углерода, как известно, способствующего упрочнению жидкостекольных формовочных смесей.

Рассматривались и оценивались варианты порошкообразных карбонатов и гидрокарбонатов бария, магния, кальция, калия, натрия и аммония, которые при термическом воздействии разлагаются с образованием летучего диоксида углерода. В итоге были выбраны карбонат и гидрокарбонат аммония, которые при рабочих температурах процесса точного литья разлагаются по реакциям:

$$(NH_4)_2CO_3 = 2NH_3\uparrow + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow. \quad (1)$$

$$NH_4HCO_3 = NH_3\uparrow + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow. \quad (2)$$

При этом среди продуктов указанных реакций (1) и (2) отсутствуют твердые вещества, что позволяет сохранить требуемый уровень газопроницаемости формы, оставляя раскрытыми ее поры, что очень значимо при заливке оболочки расплавом металла. Присутствие в линейке продуктов реакций комбинации паров аммиака и воды усиливает дегидратацию внутренних слоев керамической оболочки на основе гидролизованного этилсиликата [6].

Таким образом, благодаря наличию в составе огнеупорной обсыпки оболочковой формы технологической добавки в виде карбоната или гидрокарбоната аммония в ходе сушки и прокаливания оболочки происходят упрочнение и повышение трещиноустойчивости слоев оболочки на жидкостекольном связующем без ущерба другим ее функциональным характеристикам. При этом газообразные продукты реакции самостоятельно удаляются из формы посредством системы вентиляции, имеющейся на базовом предприятии, без дополнительного специального оборудования.

Список используемых источников.

1. Леушин, И.О. О некоторых методах повышения технологичности стержней на жидкостекольном связующем / И.О. Леушин, К.А. Маслов // Теория и технология металлургического производства: Межрегиональный сборник научных трудов. – Вып. 10. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – С. 121-126.

2. Грачев, А.Н. Разработка составов экзотермических смесей для стального и чугунного литья с применением отходов термического производства / А.Н. Грачев, И.О. Леушин, Л.И. Леушина // Черные металлы. – 2018. – №2. – С. 39-43.

3. Центральный металлический портал Российской Федерации. URL: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/plavka_i_rozliv/prochnost_liteinix_form/osnovi_texnologii_liteinix_form/30 (дата обращения 27.10.2019).

4. Гаранин, В.Ф. Оптимизация режимов сушки оболочек для литья по выплавляемым моделям / В.Ф. Гаранин, В.Г. Фирсов, А.С. Муркина // Литейное производство. – 1991. – №5. – С. 28–29.

5. Серебряков, С.П. Совершенствование технологии сушки форм по выплавляемым моделям / С.П. Серебряков, И.А. Редькин, А.А. Шатульский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15. – №1. – С. 3-5.

6. Леушина, Л.И. Применение технологических добавок карбонатов и гидрокарбонатов аммония в ресурсосберегающей технологии точного стального литья / Л.И. Леушина, И.О. Леушин, М.А. Ларин, С.В. Плохов // Черные металлы. – 2019. – №4. – С. 22-26.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

**Петренко В.И., Макарчук А.П.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, vadimasias2014@yandex.ru***

Применение аддитивных технологий получило значительное распространение. Наиболее доступным методом 3D-печати является FDM технология (Fused Deposition Modeling).

Физико-механические свойства детали, получаемой по аддитивной технологии, отличаются по свойствам от используемого филамента. Взаимосвязь технологий 3D-печати и прочностных характеристик рассматривается в немногочисленных публикациях [1-3].

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на прочностные характеристики прототипа, является особенность технологии при его «выращивании». Внутренний объем изделия для экономии материала и сокращения времени печати заполняется полимером в виде ячеистой структуры. В случае минимального заполнения внутреннего объема прототипа можно получить лишь его оболочку с пустым (незаполненным) объемом внутри.

Перед пользователем аддитивной технологии стоит сложный выбор. При экономии количества затраченного материала и времени печати получается прототип с меньшими показателями прочности. Другим вариантом является изготовление прототипа с большей прочностью, но при этом будет израсходовано большее количество материала и затрачено больше времени.

Очевидно, что при создании прототипов необходимо индивидуально подбирать параметры 3D-печати в зависимости от целей и поставленных задач, а также с учетом экономии материала и снижения массы получаемого прототипа или конечного изделия.

Таким образом, актуальным является исследование прочностных характеристик изделия, выполненного по аддитивной технологии с разным заполнением ячеистой структуры с приложением нагрузки в разных векторах.

Образцы для исследования прочностных характеристик изготавливались по аддитивной технологии на двух 3D-принтерах: MakerBot Replicator Z18 и MakerBot Replicator 5 Gen. На каждом из принтеров образцы изготавливались партиями по шесть штук в каждой партии с заполнением внутренней ячеистой структуры образцов 10-100%. Всего было изготовлено 120 образцов. При выращивании образцов применялись настройки печати, рекомендованные производителем оборудования. В качестве материала для

печати использовался полимер полилактид (PLA), полиэфир молочной (2-гидроксипропионовой) кислоты CH3-CH(OH)-COOH.

Геометрические размеры образцов выполнялись согласно ГОСТ 33693-2015.

По результатам испытаний каждого вида образцов, каждой партии из шести образцов построены графики зависимости для средних показателей массы (рис. 1)

Следует заметить что образцы второго вида изготовленные на Maker Bot Z18 (рис.1) легче чем образцы, изготовленные на Maker Bot G5.

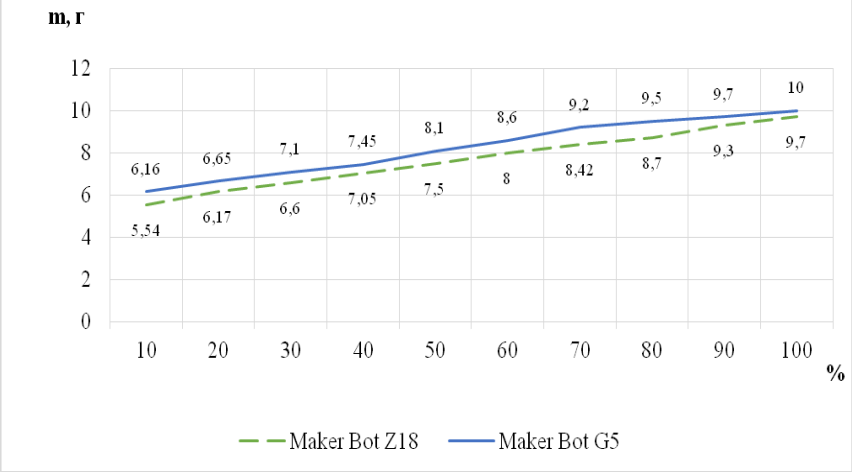



Рисунок 1. Зависимость среднего удлинения образцов до момента разрыва от процента заполнения ячеек.

Изменение массы в каждой партии образцов происходило однородно, без значительного разброса значений и пропорционально изменению заполнения ячеистой структуры.

Список используемых источников.

1. Макарчук, М.В. Исследование механических свойств материалов, используемых для изготовления изделий в промышленном дизайне / М.В. Макарук, Е.М Преображенская // IV Всероссийская научно-практическая молодежная конференция. "Современные технологии композиционных материалов". - Башкирский государственный университет (Уфа). – 15 аперля 2019г. – С.184-185.

2. Макарчук, М.В. Повышение прочностных характеристик ячеистой структуры в образцах из термопластичного полиэфира. / М.В. Макарук, Е.М Преображенская // IV Всероссийская научно-практическая молодежная конференция. "Современные технологии композиционных материалов". - Башкирский государственный университет (Уфа). – 15 аперля 2019г. – С.186-187.

3. Петренко, В.И. Исследование физико-механических характеристик образцов из полилактида / В.И. Петренко, А.П. Макарчук // IV Всероссийская научно-практическая молодежная конференция. "Современные технологии композиционных материалов". - Башкирский государственный университет (Уфа). – 15 апреля 2019г. – С.194-197.

# МОДИФИКАЦИЯ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

**Ромашкина Л.В., Макеев П.В., Тефанюк М.Н.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Liliyaromashkina433@gmail.com***

Резина – один из таких материалов, который имеет широкий спектр применения, как в науке, так и в практическом использовании, резиновые изделия находят самое широкое применение во всех отраслях народного хозяйства. Примерно половина всего объема производства резины предназначается для изготовления шин. Остальное используется в качестве различных видов изоляции, для изготовления деталей различных машин и механизмов, напольных покрытий, в обувной промышленности, электротехнике, производстве медицинского оборудования, приборостроений, а такжеспециальных костюмов для войск РХБЗ и гражданской обороны [1].

Резина является эластичным полимерным материалом, продуктом переработки природного или синтетического изопренового или диенового каучука.

В состав резины входят: каучук, регенерат, вулканизирующие вещества, ускорители вулканизации, наполнители, мягчители, противостарители, красители. Каучук натуральный и синтетический является основным сырьем для получения резиновых изделий. В настоящее время резиновые материалы преимущественно производятся из синтетического каучука, который добывается из этилового спирта, нефти, природного газа и других веществ [2].

Преобразование каучука в резину происходит путем его вулканизации. При этом линейные молекулы полимера вступают в химическую реакцию с серой, между соседними молекулами образуются сульфидные мостики. Полимер приобретает пространственную структуру. За счет изменения структуры значительно повышаются эластичность, прочность, износоустойчивость и другие технологические характеристики материала [3].

В зависимости от необходимых свойств конечного продукта в реакционную смесь вводят различные добавки. Для улучшения эксплуатационных качеств готовых резиновых изделий в последнее время все чаще применяются органические добавки, в частности пероксиды и олигоэфиракрилаты [4].

Большинство резиновых смесей имеют высокую воздухо- и паропроницаемость, низкую устойчивость к действию многих агрессивных сред, что не всегда позволяет обеспечить необходимую герметичность [5].

Нами совместно с АО «АРТИ-Завод» разрабатывается резиновая смесь с улучшенными физико-механическими показателями путем введения в

рецептуру смеси бутилового синтетического каучука БК-1675Н (бутилкаучук БК-1675Н).

Каучук БК-1675Н – это продукт совместной полимеризации изобутилена и изопрена с непредельностью 1,4-1,8 % в хлористом метиле, с использованием неокрашивающего антиоксиданта.Данный каучук относится к каучукам специального назначения [6].

Каучук БК-1675Н весьма химически инертен и обладает низкой газопроницаемостью, превосходными озоно- и погодостойкостью, термостабильностью, химической стойкостью и водостойкостью, обеспечивает вибродемпфирование и повышенные коэффициенты трения. Такие свойства обуславливаются тем, что продукт является насыщенным полимером карбоцепного строения [7-8].

Физико-механические показатели каучука БК-1675Н приведены в таблице 1 [9].

Таблица 1.

Физико-механические показатели каучука БК-1675Н.

| Показатель | Значение | |
|---|---|---|
| | Высший сорт | Первый сорт |
| Вязкость по Муни, МБ1+8 (125°С), в пределах | 46 - 56 | 46 - 56 |
| Разброс вязкости внутри партии, ед., не более | 6 | 6 |
| Непредельность, % мол. | 1,6 ± 0,2 | 1,6 ± 0,2 |
| Условная прочность при растяжении, МПа, не менее | 20 | 19 |
| Относительное удлинение при разрыве, %, не менее | 620 | 600 |
| Условное напряжение при 400% удлинении, МПа, в пределах | 7 - 13 | 7 - 13 |
| Потеря массы при сушке, %, не более | 0,30 | 0,30 |
| Массовая доля золы, %, не более | 0,30 | 0,40 |
| Массовая доля железа, %, не более | 0,010 | 0,020 |
| Массовая доля антиагломератора, %, не более | 1,1 | 1,2 |
| Массовая доля стабилизатора, % (в пределах): | 0,05 - 0,20 | 0,05 - 0,20 |

**Каучук БК-1675Н** применяется при изготовлении диафрагм для латекса бутилкаучука и форматоров-вулканизаторов, автокамер, паровых рукавов, резиновых колец, уплотнителей, герметиков и кровельных покрытий [10].

Список используемых источников

1. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Тамбов, 2015.

2. Переработка отходов полимерных материалов на валково-шнековом агрегате Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 6. № 1 (104). С. 119-123.

3. Ресурсосберегающая технология переработки отходов полимерных материалов Клинков А.С., Макеев П.В., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 3 (47). С. 292-300.

4. Методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества Макеев П.В., Клинков А.С., Полушкин Д.Л., Беляев П.С. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18. № 1. С. 166-172.

5. Валково-шнековый агрегат Клинков А.С., Макеев П.В., Полушкин Д.Л., Соколов М.В., Однолько В.Г. патент на изобретение RUS 2417881 11.01.2009

6. Анализ эффективности разработанных технологий утилизации отходов термопластов Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Однолько В.Г. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17. № 4. С. 1002-1006.

7. Рециклинг и утилизация тары и упаковки Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В., Однолько В.Г. учебное пособие / А. С. Клинков [и др.] ; М-во образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО "Тамбовский гос. технический ун-т". Тамбов, 2010.

8. Вторичная переработка полимерных материалов на вальцах / И.В.Шашков, А.С.Клинков, М.В.Соколов, Д.Л.Полушкин // Полимеры в строительстве: Тез.докл. – Казань, 2004. – С. 111.

9. Технология получения полимерпесчаной черепицы из отходов термопластов / С.П.Хрущев, И.В.Шашков, А.С.Клинков, П.С.Беляев // Полимеры в строительстве: Тез.докл. – Казань, 2004. – С. 110.

10. Утилизация полимерной тары и упаковки (Учебное пособие) Клинков А.С., Беляев П.С., Соколов М.В., Шашков И.В.,Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 64 с.

# ОСОБЕННОСТИ СЛОИСТОГО ТИТАНОВОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО ТВЕРДОФАЗНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ*

**Саркеева А.А.**
***Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа,***
***aigul-05@mail.ru***

## ВВЕДЕНИЕ

С механической точки зрения значительный интерес к слоистым материалам (СМ) обусловлен тем, что в них можно достигнуть высокого сопротивления ударному разрушению [1-3]. Данные материалы получают различными технологическими приемами, основанными на соединении как разнородных, так и однородных металлических материалов. Диффузионная сварка (ДС) является одним из них и обладает целым рядом достоинств, в частности, не нарушает структуры материалов, обеспечивает равнопрочное соединение, а совмещение с сверхпластической формовкой позволяет изготавливать многослойные конструкции ответственного назначения. Применение СМ, в частности из титановых сплавов, позволит решить ряд актуальных задач, связанных как с формообразованием изделий сложной конфигурации, так и повышением их эксплуатационных характеристик [4]. ДС осуществляется при температуре ниже температуры плавления свариваемых металлов с приложением давления, необходимого для пластической деформации приконтактных слоев соединяемых материалов. Процессом формирования твердофазного соединения (ТФС), а соответственно уровнем необходимых свойств, можно управлять за счет подбора режимов обработки.

Отличительной особенностью многослойных материалов по сравнению с монолитным материалом является наличие многочисленных внутренних границ раздела между слоями, которые играют существенную роль в механическом поведении. Основные механизмы повышения ударной вязкости данных материалов могут быть разделены на две категории: внутренне и внешние [5]. Внутренние механизмы связаны с микроструктурой материала (размер зерна, состояние границ зерен, расположение частиц и вторых фаз и т.д.), все остальные факторы, приводящие к повышению ударной вязкости, относят к внешним механизмам. Внешние механизмы способствуют уменьшению интенсивности напряжения в вершине трещины, например образование расслоений по поверхностям соединений.

В слоистом материале выделяют три вида расположения поверхностей ТФС, которые обеспечивают в одном случае торможение, в другом разветвление фронта трещины, а также прохождение сквозной трещины [1]. Соответственно, трещина может распространяться последовательно через каждый слой, одновременно через все слои и вдоль межслойной границы.

Характерной особенностью слоистых материалов, полученных ДС, является наличие пор в зоне ТФС. В целом установлено, что поры отрицательно влияют на механические свойства ТФС. С другой стороны, поверхности твердофазного соединения с порами представляют собой свободные

поверхности, способные к образованию расслоений, которые в свою очередь относятся к внешним механизмам повышения ударной вязкости. Именно поэтому эффект пор в механическом поведении слоистого материала может быть иным. Исследования в этой области представляют не только научный, но и практический интерес, поскольку слоистый материал можно рассматривать в качестве модели поведения многослойной конструкции.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для изготовления СМ являлся двухфазный титановый сплав ВТ6 в виде листа толщиной 1,5 мм, полученного промышленной прокаткой. Методика эксперимента и проведения исследований подробна описана в работе [2]. Испытаний на ударный изгиб проводили на стандартных образцах, которые отличались расположением U-образного надреза относительно поверхностей соединения.

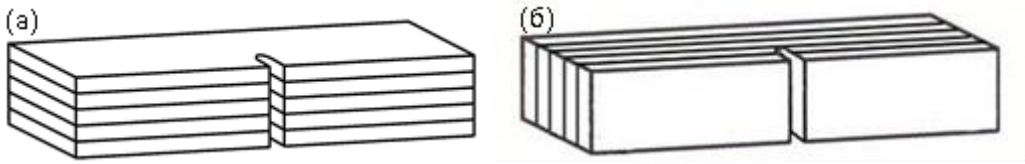



Рисунок 1. Образец для испытаний на ударный изгиб с «разветвляющим» (Р-образец) (а) и «тормозящим» (Т-образец) (б) трещину расположением поверхностей соединения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

7-ми слойные материалы, изготовленные по трем режимам, характеризовались различной пористостью в зоне ТФС. Результаты механических испытаний, проведенных при комнатной температуре, показали, что ударная вязкость зависит как от расположения поверхностей соединения относительно распространяющейся магистральной трещины, так и от протяженности пор. В слоистом материале, полученном при температуре 900 °С, поры практически отсутствуют в зоне ТФС. Повышенным значением ударной вязкости характеризуется образец с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения. В слоистых материалах, полученных при температуре 750°С, а также после дополнительно вакуумного отжига при температуре 900°С, повышенные значения ударной вязкости имеют образцы с «тормозящим» трещину расположением поверхностей соединения. При этом в результате испытания при комнатной температуре Т-образец слоистого материала, полученного при температуре 750 °С, не разрушился, как и Т-образец 13-слойного материала, полученного при такой же температуре [2].

Фрактографические исследования показали, что в СМ, полученных при температуре 750°С, а также после дополнительно вакуумного отжига при температуре 900°С, в процессе ударного разрушения образуются расслоения по поверхностям соединений. Способность образцов к появлению расслоений возрастает с увеличением относительной протяженности пор в зоне соединения. Однако только образцы с «тормозящим» трещину расположением поверхностей соединения показывают высокие значения ударной вязкости. Стоит отметить, что в Т-образцах ослабленные за счет пор поверхности твердофазного

соединения расположены перпендикулярно к плоскости движения основной трещины. При испытаниях на ударный изгиб по ослабленным поверхностям образуются трещины расслоения. Роль трещин расслоения, по-видимому, заключается в увеличении площади разрушения и, соответственно, энергии, расходуемой на формирование самой поверхности и приповерхностного слоя, подвергающегося пластической деформации.

Согласно механике разрушения вязкость разрушения возрастает при уменьшении трехосности напряженного состояния [6]. Создание внутренней «свободной» поверхности (в данном случае – это поверхность ТФС с порами), перпендикулярной направлению распространения трещины является одной из возможностей уменьшения степени трехосности напряженного состояния в области у вершины трещины. Кроме уменьшения трехосности напряжений в области вершины трещины за счет создания внутренней свободной поверхности, трещина при достижении этой поверхности не только отклоняется от своего магистрального направления, но и притупляется.

## ВЫВОДЫ

Особенностями слоистого материала, полученного твердофазным соединением листовых заготовок титанового сплава ВТ6, является наличие поверхностей соединения, которые могут характеризоваться присутствием пор. На механическое поведение СМ влияет ориентированное расположение поверхностей соединения относительно действующей нагрузки. Поры в зоне ТФС снижают ударную вязкость СМ при распространении трещины одновременно через все слои (Р-образец) и способствует многократному повышению данной характеристики, когда трещина распространяется последовательно из слоя в слой (Т-образец).

**Настоящая работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИМСП РАН № АААА-А17 117041310221 5.*

Список используемых источников

1. Embury J.D., Petch N.J., Wraith A.E., Wright E.S. // Trans, of Metall. S. AIME. 1967. V. 239. P. 114-118.
2. Саркеева А.А., Круглов А.А., Бородин Е.М. и др. // Физ. мезомех. 2012. Т.15. № 5. С. 51-57.
3. Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Мирзаев Д.А. и др. // ФММ. 2007. № 2. С. 212-221.
4. Ганеева А.А. // Вестник ТГУ. 2010. Т. 15. вып. 3. С. 1165-1168.
5. Cepeda-Jiménez C. M. et al. // Scripta Mater. 2009. Vol. 61. P. 407-410.
6. Хеллан К. // М.: Мир. 1988. 364 с.

# ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ*

**Зайнуллин Р.И.[1], Ганеев А.А.[2], Шахов Р.В.[2], Логунов А.В.[3], Мухтаров Ш.Х.[2]**

*[1]- Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, Уфа;*

*rishat.zayn@yandex.ru*

*[2]- Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа;*

*[3]- ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск.*

## ВВЕДЕНИЕ

С повышением температуры деформации промышленных сплавов, и сужением допустимого интервала температур для деформации, необходим материал штампового инструмента, пригодного для длительной работы при в интервале температур 1000-1200°С. В качестве такого материала может использоваться сплав на никелевой основе с добавлением редкоземельных элементов и легированием тугоплавкими элементами, которое обеспечивало бы эффективное упрочнение твердого раствора [1-2]. Однако более высокое легирование такими элементами, особенно рением, может привести к образованию топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз при длительном воздействии высоких температур [4-5]. В некоторых работах показывается как отрицательный, так и положительный эффект ТПУ фаз на механические свойства [5]. Таким образом, легирующие добавки должны быть точно подобраны, чтобы избежать образования нежелательных фаз.

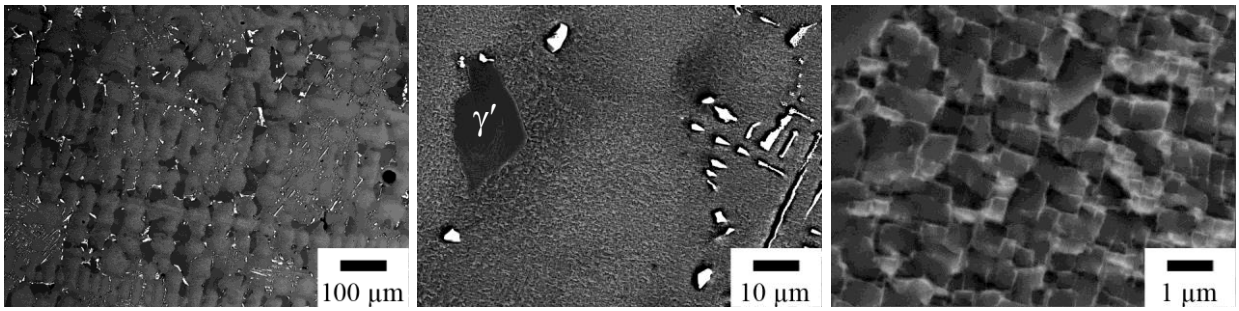
Настоящая работа посвящена изучению микроструктуры и механических свойств нового литого сплава на никелевой основе с высоким содержанием Re и W.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала взят никелевый сплав состава Ni-13(Al,Ta,Ti,Nb) 27(Cr,Co,Mo,W,Re,Si,C,B) (вес. %). Материал слитка в литом состоянии подвергли обработке на твердый раствор при температуре 1290 °С и двухступенчатому старению при температурах 1050 °С и 950 °С. Из термически обработанного сплава вырезали образцы ∅8×12 мм на сжатие. Испытания на сжатие проводились в диапазоне температур 900-1150°С. Для микроструктурных исследований использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE). Анализ с помощью дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD анализ) с шагом сканирования 11 мкм. При этом выделения γ′ фазы принимались за γ фазу. Анализ EBSD проводился с использованием программного обеспечения CHANNEL 5. Границы зерен, имеющие угол разориентации менее 2°, были исключены из рассмотрения с учетом точности измерений. Границы зерен, имеющие угол разориентации более 15°, рассматривались как границы больших углов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1а представлена дендритная микроструктура литого сплава. Микроструктура состояла из γ фазы с большим содержанием выделений γ′ фазы размером 0,5-1 мкм, крупных частиц γ′ фазы (рисунок 1в) размером до 20 мкм (рисунок 1б), выделениями ТПУ фаз (светлые вытянутые выделения, рисунок 1а,б) и карбидами размером до 5 мкм. Выделения мелкой γ′-фазы были равномерно распределены по микроструктуре (рисунок 1в), как во всех жаропрочных никелевых сплавах [1, 2].




а б в

Рисунок 1. Изображения BSE сплава в исходном литом состоянии при различных увеличениях.

На рисунке 2 показаны изображения BSE сплава после термической обработки. Видно, что дендриты полностью растворились, и сформировалась крупнозернистая структура со средним размером γ зерен более 500 мкм. Выделения ТПУ фаз и карбиды, вероятно, частично растворились. По границам γ зерен крупные выделения γ′ фазы выросли до 100 мкм (рисунок. 2а). Пластинчатые выделения ТПУ фаз длиной 2-3 мкм равномерно распределены по микроструктуре. Выделения γ′ фазы размером 0,5-1 мкм округлились, по их границам видны, вероятно, выделения мелких карбидов [1,2], образовавшихся при высокотемпературном старении.

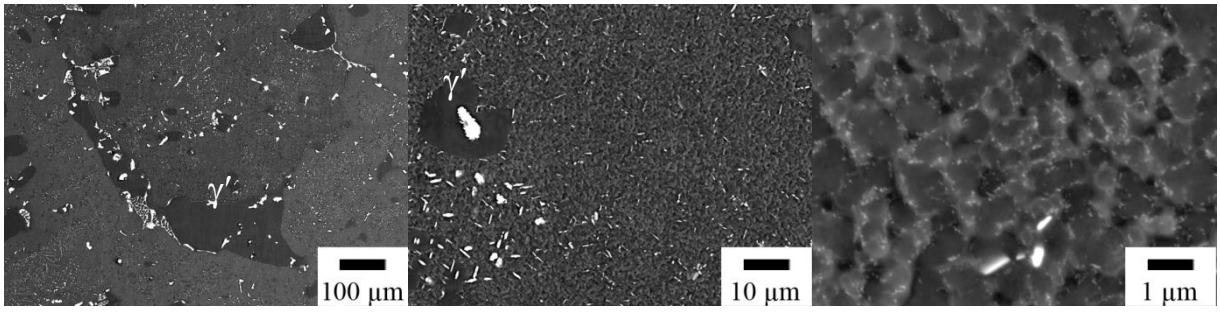
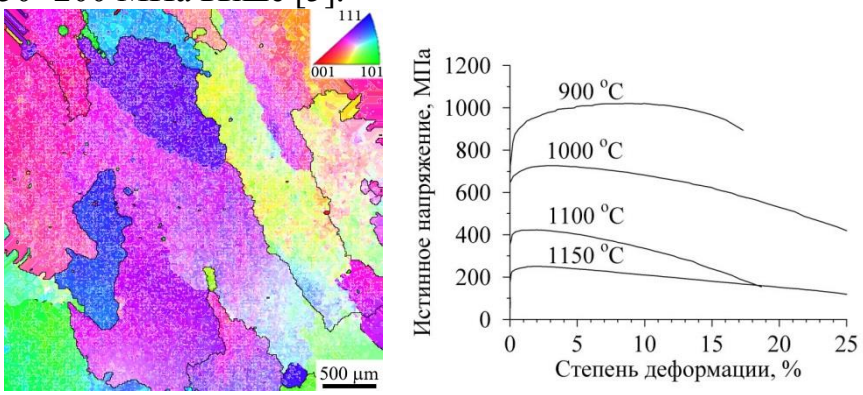



Рисунок 2. Изображения BSE сплава после ТО при различных увеличениях.

EBSD анализ подтвердил, что размер γ зерен после проведения термической обработки около 1000 мкм (рисунок 3а). На рисунке 3б показаны зависимости истинного напряжения от степени деформации сплава после термической обработки. Истинные напряжения исследуемого поликристаллического сплава при температурах 1100 и 1150°С оказались

сравнимы с интерметаллидным сплавом ВКНА-1В, а при температурах 900 – 1000°С на 350- 200 МПа выше [5].




а б

Рисунок 3. Карта ориентации EBSD сплава (а), зависимости истинных напряжений от степени деформации (б), полученные для сплава после термической обработки.

## ВЫВОДЫ

Литой никелевый сплав состава Ni-13(Al,Ta,Ti,Nb) 27(Cr,Co,Mo,W,Re,Si,C,B) (вес. %) подвергнутый термической обработке имеет крупнозернистую микроструктуру с размером γ зерен около 1000 мкм, крупными размером до 100 мкм и мелкими около 0,5-1 мкм выделениями γ′ фазы, а также ТПУ фазы. При температуре 1150°С сплав показал истинные напряжения течения на сжатии 250МПа, что достаточно для деформации перспективных высоколегированных никелевых сплавов.

**Благодарность. Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием ИПСМ РАН (АААА-А17-117041310215-4). Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования «Структурные и физико-механические исследования материалов» при Институте проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук.*

Список используемых источников

1. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge University Press. – 2006. – P. 372.

2. Rae C.M.F., Karunaratne M.S.A., Small C.J., Broomfield R.W., Jones C.N., Reed R.C. Topologically close packed phases in an experimental rhenium-containing single crystal superalloy. Superalloys 2000. TMS, 2000, p. 767-776.

3. Pyczak F., Neumeier S., Göken M. Temperature dependence of element partitioning in rhenium and ruthenium bearing nickel-base superalloys, Mater. Sci. Eng. A A527 (2010) 7939-7943.

4. Darolia R., Lahrman D.F., Field R.D. Formation of topologically closed packed phases in nickel base single crystal superalloys. Superalloys 1988. TMS, 1988, p. 255-264.

5. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А. Новый литейный сплав ВКНА-1В. Авиационная промышленность, №12, 1991 https://www.viam.ru/public/files/1991/1991-200868.pdf

# НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ ГРАДИЕНТНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОСПЛАВА Cu-Cr-W, ПОЛУЧЕННЫЙ МЕТОДАМИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ*

**Шкодич Н.Ф.[1,2], Вергунова Ю.С.[1], Кусков К.В.[2], Ковалев И.Д.[1],Трусов Г.В.[1]**

*[1]- Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, n.f.shkodich@mail.ru*

*[2]-Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

Металлические композиты, состоящие из взаимно нерастворимых компонентов с разными температурами плавления, называемые псевдосплавами, привлекают большое внимание исследователей благодаря уникальному сочетанию их механических, электрических и теплофизических свойств [1-3]. Псевдосплавы на основе меди широко применяются в качестве материалов для электроконтактов и дугостойких электродов, теплоотводящих элементов в микроэлектронных устройствах и др. Среди тугоплавких металлов вольфрам благодаря исключительной тугоплавкости и высоким прочностным свойствам является наиболее перспективной основой для изделий и материалов, работающих в условиях высоких температур и высоких нагрузок. Кроме того, вольфрам имеет самый большой удельный вес (19,3 г/см) и высокий коэффициент поглощения γ- излучения, что в свою очередь наделяет его отличными радиационно-защитными свойствами. Хром обладает хорошей жаростойкостью, коррозионной стойкостью, химической стабильностью, твердостью, что делает данный материал перспективным для электротехнических приложений. Несмотря на имеющийся в настоящее время большой выбор электроконтактных материалов различного назначения, проблема создания высоконадежных электроконтактов остается актуальной, ввиду непрерывно меняющихся и возрастающих требований к таким материалам.

Определяющим с точки зрения физико-механических свойств псевдосплавов является взаимное расположение фаз друг относительно друга и их дисперсность.

Методом высокоэнергетической механической обработки (ВЭМО) удается получать пересыщенные твердые растворы и нанокомпозиты с размером зерен в несколько десятков нанометров.

Перспективным методом получения объемных материалов с мелким, в том числе наноразмерным зерном, является искровое плазменное спекание (ИПС). Этот метод позволяет проводить компактирование порошковых материалов при относительно низких температурах, внося минимальные изменения в наноструктуру исходных порошков.

В данной работе с целью создания наноструктурированного

градиентного материала на основе Cu-Cr-W использовалось сочетание методов ВЭМО и ИПС.

ВЭМО порошковых смесей Cu+Cr+W с разным содержанием вольфрама (5-70 масс. %) проводилась в планетарной шаровой мельнице "Активатор-2S" при скорости вращения планетарного диска 694 об/мин, скорости вращения барабанов 1388 об/мин в среде аргона (360 грамм шаров на 18 грамм смеси, 20:1). Продолжительность ВЭМО составила от 30 до 150 минут. Полученные механокомпозиты Cu+Cr+W спекали на установке искрового плазменного спекания Labox 650(SinterLand, Япония).

Комплексное исследование структуры композитов Cu+Cr+W на основе псевдосплавов проводилось методами РСА, СЭМ, ЭДС.

Результаты РСА исходной и механически обработанных порошковых смесей Cu+Cr+W (5-70 масс.%) с разной продолжительностью ВЭМО представлены на рисунке 1. По мере увеличения времени высокоэнергетического механического смешения (до 30 минут) наблюдается уширение дифракционных пиков W (110), (200), Cu (200), Cr (200) и снижение их интенсивностей, в то время как основные пики Cu (111) и Cr (110), а также пики W(221) и Cu(220) становятся очень широкими и частично перекрываются, образуя один общий ассиметричный пик. Дальнейшее увеличение продолжительности механической обработки (60-150 минут) приводит к уменьшению интенсивности дифракционных рефлексов (уменьшению размеров ОКР).

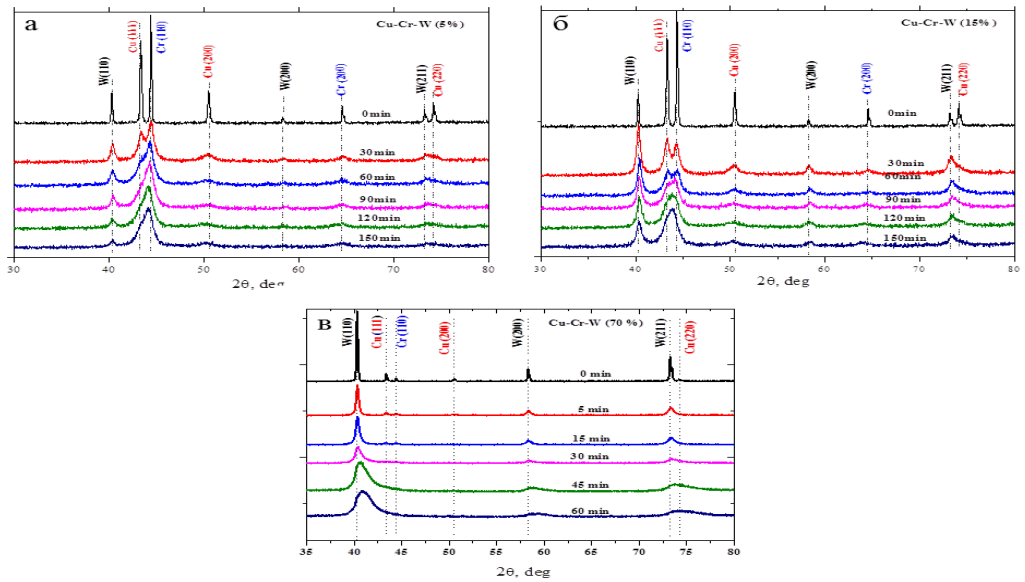



Рисунок 1. Рентгенограммы исходной и механически активированных порошковых смесей Cu-Cr-W с разным содержанием вольфрама при разной продолжительности ВЭМО: (а) Cu-Cr-W(5%), (б) Cu-Cr-W(15%), (в) Cu-Cr-W(70%).

Полученные наноструктурированные механокомпозиты Cu+Cr+W в процессе ВЭМО, консолидировались послойно Cu/Cu-Cr-W(5%)/Cu-Cr-W(15%)/Cu-Cr-W(70%) методом ИПС при температуре 800°С.

Результаты СЭМ консолидированного градиентного композиционного

материала Cu/Cu-Cr-W(5%)/Cu-Cr-W(15%)/Cu-Cr-W(70%), представленные на рисунке 2, показали, что во всех его слоях(кроме слоя чистой Cu) наноразмерные зерна W (20-100 нм) и Cr (20-50 нм) равномерно распределены в матрице меди. Таким образом, следует отметить, что структура композита Cu-Cr-W сформированная на стадии ВЭМО, сохраняется после консолидации методом ИПС.

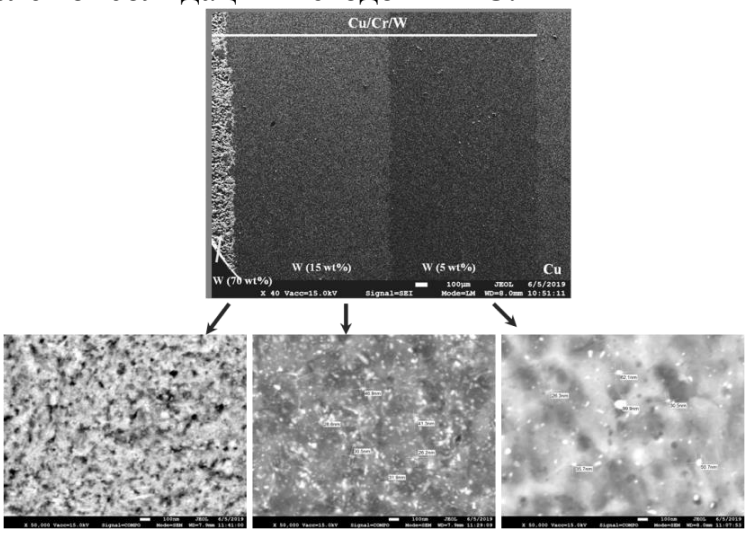



Рисунок 2. Микроструктура консолидированного методом ИПС при 800 °С градиентного материала Cu/Cu-Cr-W(5%)/Cu-Cr-W(15%)/Cu-Cr-W(70%).

Твердость по Виккерсу различных слов полученного градиентного материала (Cu-Cr-W(5%): 150 мин/694об/мин (800°С), Hv =5,5 ГПа; Cu-Cr-W(15%): 150 мин/694об/мин (800°С), Hv =6,5 ГПа; Cu-Cr-W(70%): 60 мин/694об/мин (800°С), Hv =9,5 ГПа) значительно превосходила твердость спеченных образцов Cu-Cr-W без предварительной механической обработки (например, Cu-Cr-W (5%) без ВЭМО, Hv =1,02 ГПа).

Полученные результаты в данной работе, показывают перспективность использования сочетания методов ВЭМО и ИПС для создания консолидированных нанокристаллических градиентных композитов Cu-Cr-W, варьируя содержание тугоплавких компонентов.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 18-38-00843 мол_а)*

Список используемых источников

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М., Электрические контакты, Интеллект, 2008, 560с.

2. Slade, P. The Vacuum Interrupter Contact. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions, 1984, v. 7, № 1, p. 25-32.

3. Binary Alloy Phase Diagrams/ Eds. Massalski T.B., Okamoto H., Subramanian P.R. et al. Ohio: ASM International materials Park, 1990.

# ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТИТАНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ*

**Сударчикова М.А.[1], Насакина Е.О.[1], Севостьянов М.А.[1], Царева А.М.[1], Новикова Д. А.[1], Колмаков А.Г.[1]**

***[1]- Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва,***

mariahsudar@yandex.ru

Одним из методов модификации поверхности изделий в таких областях промышленности и науки, как машиностроение, авиастроение, космонавтика, приборостроение и медицина является получение тонких поверхностных слоев из различных химических элементов [1,2]. Свойства получаемых таким образом материалов зависят от свойств самого элемента, а также формируемой структуры, которая определяется видом используемого метода нанесения покрытия и его параметрами [3,4]. Метод магнетронного напыления обладает высокой эффективностью процесса ионизации рабочего газа благодаря наличию магнитной ловушки, что приводит к высокой скорости получения качественных тонких поверхностных слоев[2]. Создание методом магнетронного распыления функциональных материалов с поверхностным слоем из титана позволит соединить самые разнообразные, часто диаметрально противоположные свойства материалов[5].

В качестве подложки использовались плоские образцы из стали 20. Для определения влияния положения подложки в потоке распыляемого титана, времени напыления, параметров мощности и расстояния между подложкой и мишенью на толщину и равномерность поверхностного слоя использовали с помощью атомно-эмиссионного спектрометра GDS–850A фирмы LECO. Для определения фазового состава использовали рентгеновский дифрактометр "Ultima IV" (Cu Kα – излучения).

Оптимальный процесс распыления титана производился при 70% мощности установки, что при постоянном токе 860 мА, значение напряжения составляло ~400 В, расстоянием между подложкой и плоской мишенью было выбрано значение - 150 мм, а рабочее давление (давление газа аргона) составляла 0,4 Па.

Поток атомов титановой мишени предположительно можно разбить на несколько зон, которые отличаются друг от друга интенсивностью распыления. Во время отработки параметров распыления было замечено, что с уменьшением толщины эрозионного слоя мишени (т.е. зеленой зоны 2) возрастало значение напряжения, что возможно связано с увеличением количества захватываемых электронов. Результаты атомно-эмиссионной спектрометрии показали, что вращение позволяет уменьшить разброс значений толщины поверхностного слоя из титана более чем на 5%, а с увеличением времени напыления распределение титана становилось

равномернее. Поверхностный слой состоял полностью из фазы β-Ti (кубическая объемно-центрированная кристаллическая решетка).

В ходе отработки получения металлических композиционных материалов методом магнетронного напыления были выбраны: эффективное расположение подложки и её движение в потоке атомов титана в процессе напыления, расстояние между подложкой и мишенью, а также время напыления, которое влияет на структуру и свойства поверхностного слоя и всего материала в целом.

**Работа выполнена при поддержке гранта президента для молодых ученых (МК-4521.2018.8).*

Список используемых источников.

1. Данилин Б. С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.

2. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – К.: Аверс, 2008. – 244 с.

3. Насакина Е.О., Севостьянов М.А., Демин К.Ю., Михайлова А.Б., Гольдберг М.А., Колмаков А.Г., Заболотный В.Т. Использование способа ионно-атомного осаждения для создания одномерных композитов. Материаловедение. 2015. № 1. С. 47-51. 11

4. Thomann A.-L., Caillard A., Raza M., El Mokh M., Cormier P.A., Konstantinidis S. Energy flux measurements during magnetron sputter deposition processes. Surface & Coatings Technology. 2019. DOI:10.1016/j/surfcoat.2019.08.016

5. Насакина Е.О., Ковалева Е.Д., Севостьянов М.А., Михайлова А.Б., Колмаков А.Г., Заболотный В.Т. Микротвердость наноструктурного композиционного материала. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 3. С. 23-26.

# ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ $La_{2-x}Cd_xMoO_{6-x/2}$

**Верескун А.Д., Чебышев К.А., Селикова Н.И., Пасечник Л.В.**
***Донецкий национальный университет, Донецк, Украина,***
***chebyshev.konst@mail.ru***

Для неодима и празеодима известны соединения с кубической флюоритоподобной структурой (пр. гр. Pn-3n) состава $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$ содержащие больше молибдена, чем оксомолибдаты (в пересчете на $MoO_3$ 54.5 мол. %). В зависимости от условий синтеза часть атомов молибдена может восстанавливаться и тогда величина δ принимает значения от 0 до 0.5. В восстановительных условиях (δ=0) изоструктурные молибдаты получены для редкоземельных элементов от лантана до тербия.

В окислительных условиях молибдат лантана состава $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$ (δ=0.5) неустойчив и распадается на смесь фаз со структурами $Ln_2MoO_6$ и $Ln_2Mo_2O_9$. Для редкоземельных элементов, находящихся после неодима, составы $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$, полученные в окислительных условиях, имеют моноклинную структуру и, очевидно, попадают в область гомогенности соединений $Ln_2MoO_6$ (пр. гр. C2/c, z=8).

Примечательно, что все кристаллические структуры, в которых кристаллизуются оксомолибдаты РЗЭ, а также близкие по составу соединения $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$, являются производными от флюорита и отличаются способом искажения исходной структуры флюорита.

Описаны составы, в которых кубическая структура молибдатов РЗЭ от лантана до лютеция стабилизируется замещением редкоземельного иона двухвалентным металлом по схеме:

$$Ln^{+3} + 1/2O^{-2} \rightarrow Me^{+2} + 1/2V_O,$$

образуя соединения с общей формулой $MeLn_4Mo_3O_{16}$. При этом температура синтеза увеличивается с увеличением атомного номера РЗЭ, а также зависит от природы двухвалентного металла. Введение кадмия и свинца понижает температуру образования кубической фазы, а щелочноземельных элементов – увеличивает.

В настоящей работе кубическая флюоритоподобная фаза получена гетеровалентным замещением лантана на кадмий в молибдате лантана с тетрагональной структурой. Диаграмма распределения фаз в изучаемой системе представлена на рисунке 1.

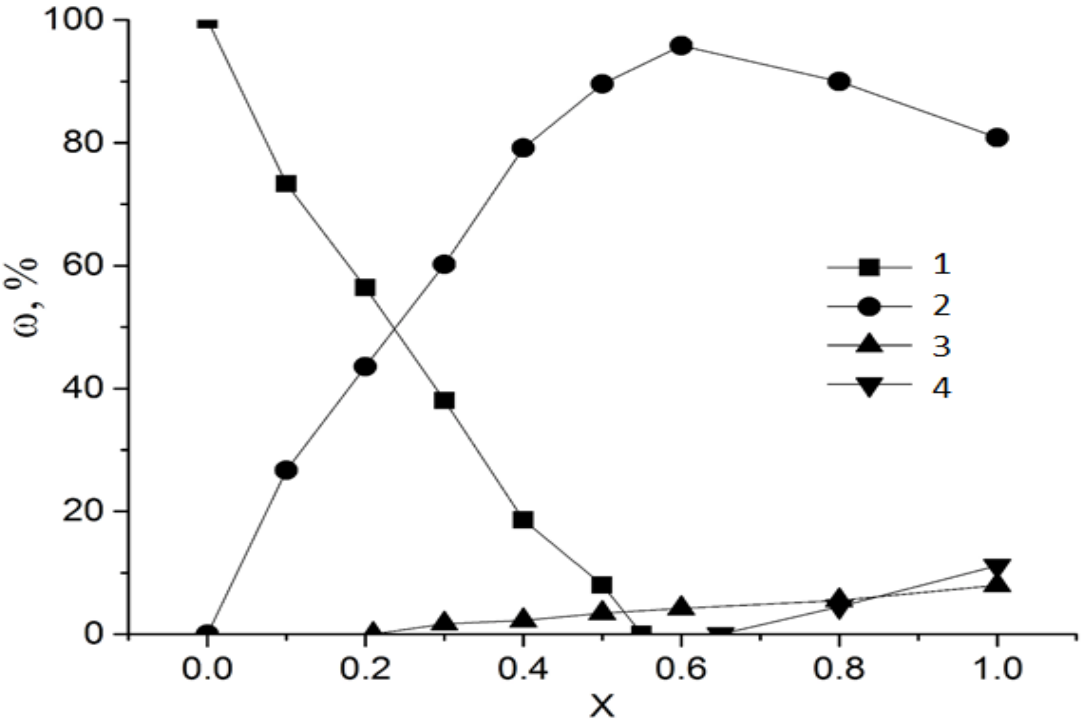



Рисунок 1. Диаграмма распределения фаз в системе $La_{2-x}Cd_xMoO_{6-x/2}$. (1– $La_2MoO_6$, 2 – кубическая фаза; 3 – CdO; 4 – $CdMoO_4$).

Содержание молибдата лантана с тетрагональной структурой линейно снижается с увеличением содержания кадмия в системе. Также возрастает содержание кубической флюоритоподобной фазы. Наибольшее содержание кубической фазы составляет 96% при величине x=0,6. Дальнейшее снижение содержания кубической фазы связано с образованием молибдата кадмия. Рефлексы фазы оксида кадмия появляются при x=0.2 и ее содержание при x=1 составляет 8%.

# СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ CuCrFeTiNi и CoCrFeMnNi, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

**Вергунова Ю.С., Шкодич Н.Ф.**
***Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка,***
***Yulya-ser94@yandex.ru***

Традиционный подход к разработке металлургических сплавов заключается в выборе одного или двух металлов в качестве основы в зависимости от основных требований, предъявляемых к будущему материалу, и легирующих элементов для придания необходимых рабочих и технологических свойств. Такой подход привел к ограничению круга сплавов, которые могут быть использованы для получения материалов различного назначения.

Новых подход в создании металлических соединений был предложен учеными из Тайваньского университета [1], которые разрабатывая новые сплавы, обнаружили, что в многокомпонентных сплавах (МС) эквиатомного состава могут образовываться структуры из простых твердых растворов. Как оказалось, подобные МС обладают привлекательными физико-механические и магнитными свойствами.

Новый класс металлических соединений, состоящий из не менее пяти основных элементов, концентрация которых варьируется от 5 до 35 ат. %, было предложено назвать высокоэнтропийными сплавами (ВЭС) [1-3].

Особенностью ВЭС является то, что они имеют выигрыш в энтропии смешения, которая как предполагается, подавляет образование интерметаллических фаз, и тем самым способствует формированию простых твердых растворов с ГЦК или ОЦК, или ГЦК/ОЦК структурами.

Одним из перспективных методов получения ВЭС с более однородной и стабильной нанокристаллической структурой является высокоэнергетическая механическая обработка (ВЭМО) в шаровых планетарных мельницах.

В данной работе для получения наноструктурированных порошков ВЭС в системах CuCrFeTiNi и CoCrFeMnNi использовали метод ВЭМО в шаровой планетарной мельнице «Активатор 2S» до 240 минут в режиме вращения водила и барабанов 694об/мин / 1388 об/мин соответственно. Для получения объемных ВЭС проводили консолидацию наноструктурированных порошковых смесей методом искрового плазменного спекания (ИПС).

Исследование структурных составляющих ВЭС проводилось методами РФА, СЭМ, ЭДС; их термическая стабильность — методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). По данным РФА

начиная с 30 минут ВЭМО в системе CuCrFeTiNi происходит образование однофазного продукта с ОЦК структурой (рис.1а), а в системе CoCrFeMnNi - однофазный твердый раствор с ГЦК структурой (рис.1б), начиная с 45 минут механической обработки.

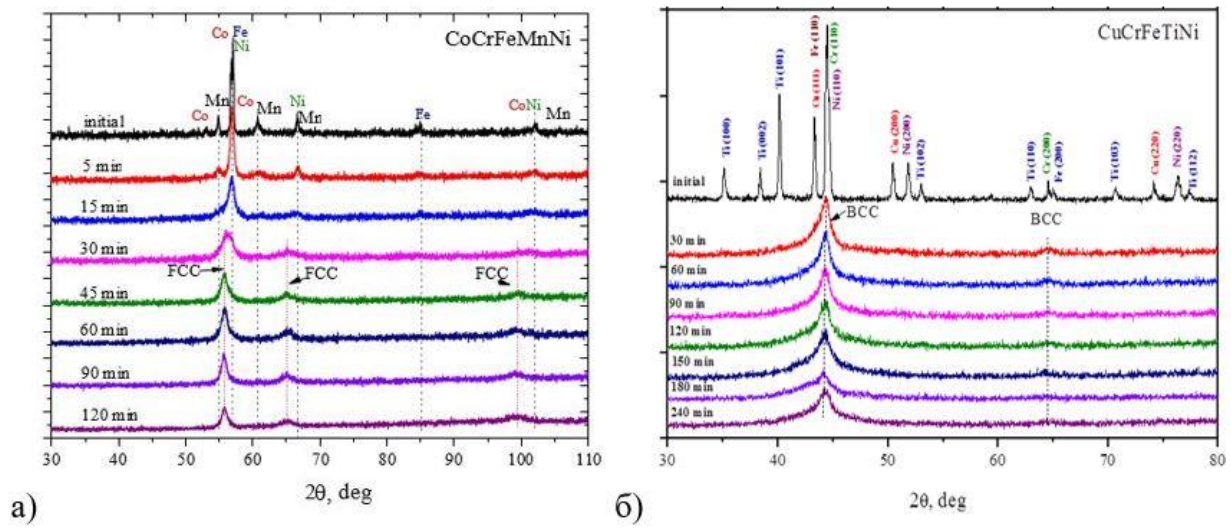
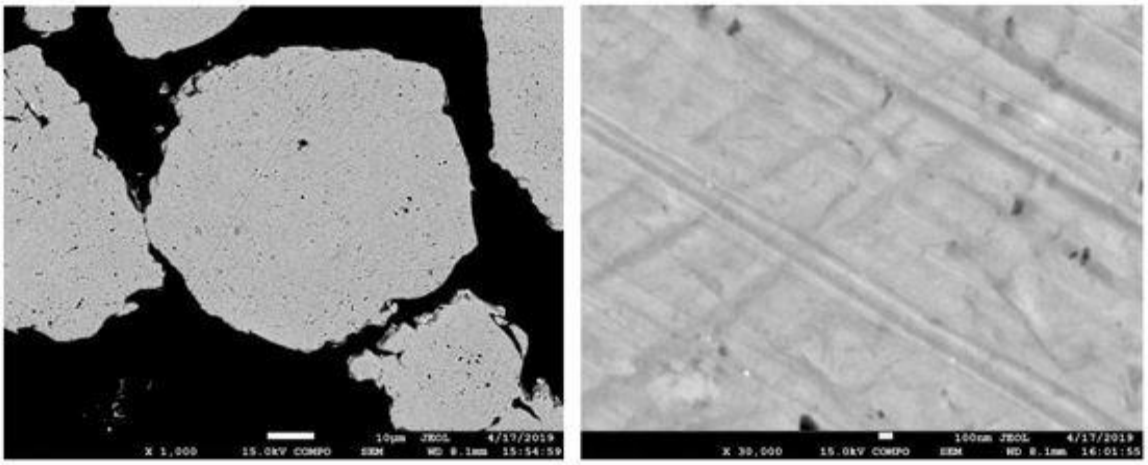


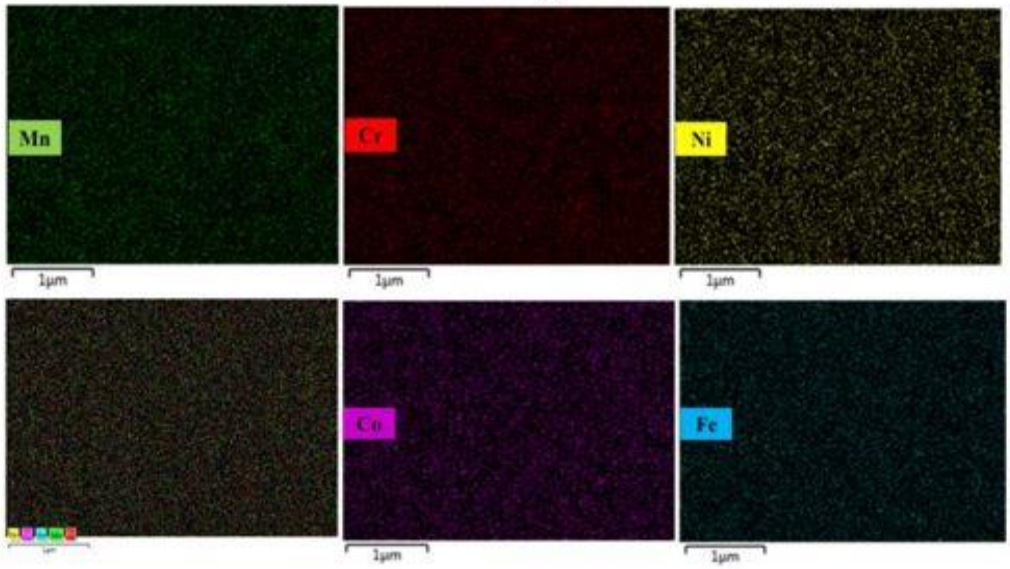

Рисунок 1. Рентгенофазовый анализ порошков (а) CuCrFeTiNi и (б) CoCrFeMnNi при разных временах ВЭМО.

По данным СЭМ измельченная порошковая смесь CuCrFeTiNi состояла из композитных частиц округлой формы, размер которых составил 10-12 микрон. ЭДС анализ показал, что для обеих систем CuCrFeTiNi и CoCrFeMnNi исходные элементы равномерно распределены в композитных частицах, сформированных на стадии ВЭМО. На рисунке 2 (а, б) представлены СЭМ фотографии (шлиф) и карта распределения элементов в смеси CoCrFeMnNi после 60 минут ВЭМО.

Последующая консолидация порошковых смесей CuCrFeTiNi с ОЦК структурой и CoCrFeMnNi с ГЦК структурой методом ИПС до 700 - 800°C приводит к частичному распаду ОЦК структуры на ГЦК и ОЦК для системы. CuCrFeTiNi, в то время как твердый раствор с ГЦК структурой в системе CoCrFeMnNi остается стабилен до 800°C.



(а)




(б)

Рисунок 2. а) СЭМ и б) ЭДС (карта распределения элементов) порошковой смеси CoCrFeMnNi после 60 мин ВЭМО.

Твердость материала ($H_v$) CuCrFeTiNi, полученного из наноструктурированных порошков в несколько раз выше (7,7 ГПа) аналогичных материалов, спеченных из смеси микрокристаллических порошков 2,1 (ГПа). Для системы CoCrFeMnNi твердость образцов консолидированных до 800°C без ВЭМО составила 2.95 ГПа, в то время как использование предвадительной ВЭМО в течение 60 минут позволило увеличить твердость до 4.5 ГПа.

Список используемых источников

1. P.-K. Huang, J.-W. Yeh, T.-T. Shun, S.-K. Chen. Adv.Eng. Mater. 6 (2004) 74-78.

2. B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent. Mater. Sci. Eng. A 375-377 (2004), 213-218.

3. Easo P. George, Dierk Raabe and Robert O. Ritchie, Nature Reviews Materials (2019).

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЦСП И ПОЛИОЛЕФИНОВ

**Зинчук Е.А., Макеев П.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***

В связи с увеличением темпов строительства жилищно-коммунального сектора, возрастают и темпы производства материалов используемых в строительстве. Одним из таких материалов является цементно-стружечная плита (рис. 1). Цементно-стружечная плита (ЦСП) – это современный материал, применяющийся в наружных и внутренних строительно-ремонтных работах. В ее состав входит цемент (до 65 %), стружка хвойных пород (до 25 %), вода (8,5 %), специальные присадки (2,5 %).В качестве сырья для ЦСП используются натуральные компоненты, не содержащие экологически опасных веществ. Исходная смесь включает в себя силикатный цемент, отходы деревообрабатывающего производства, модифицирующие добавки и воду. ЦСП изготавливают плитами, которые не всегда соответствуют нужному, для строительства размеру, в связи с этим образуется много отходов, которым нужно найти применение [1-2].

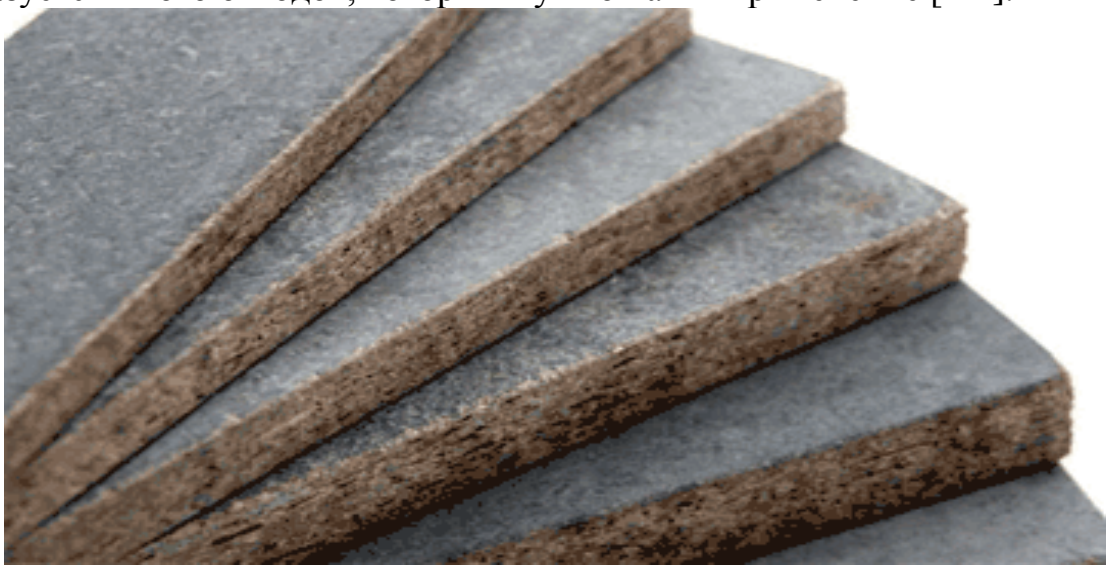


Рисунок 1. Цементно-стружечная плита.

С другой стороны в связи с большим производством изделий из полимерных материалов возникает проблема их утилизации. Одним из наиболее крупнотоннажных полимеров являются - полиолефины, которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности, транспорта и в сельском хозяйстве. К ним относятся полиэтилен высокой и низкой плотности, полипропилен [3-6].

В связи с существующими проблемами была поставлена задача по получению нового композиционного материала на основе отходов ЦСП и

отходов полиолефинов. В соответствии с поставленной задачей был разработан способ и подобрано оборудование для получения композиционного материала.

Способ осуществлялся следующим образом: промытые и высушенные отходы с содержанием посторонних примесей не более 5% подвергаются сортировке. Делаются навески полимера и цсп. Подготовленные отходы загружаются в рабочую камеру смесителя, где вращающиеся рабочие органы затягивают их. Далее происходит смешение и диспергирование в течение времени, заданного выбранным технологическим режимом.

Для исследования процесса была создана экспериментальная установка (ЭУ) на основе смесителя Брабендера (рис.2), как устройство, позволяющее оценивать и прогнозировать показатели качества получаемого композита, изменяя в широком диапазоне режимные и конструктивные параметры.

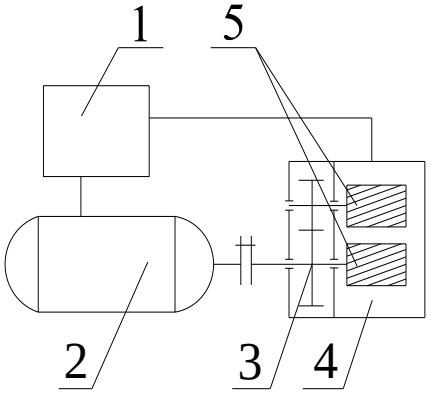
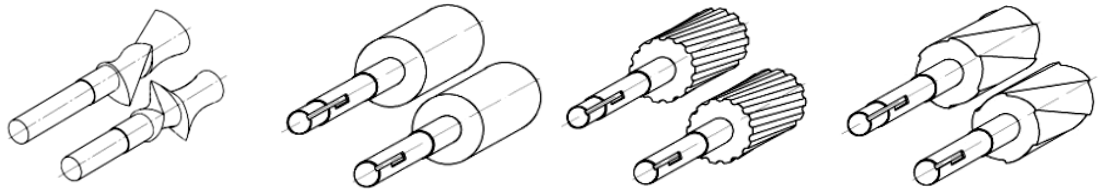



Рисунок 2. Экспериментальная установка на основе смесителя Брабендера: 1 – шкаф управления; 2 – электродвигатель; 3 – фрикционные шестерни; 4 – смесительная камера; 5 – смесительные органы.

Установка (рис. 2) состоит из смесительной камеры 4, станины с приводом 2, 3 и электрооборудования 1. Смесительными органами являются два ротора 5 специального профиля, вращающиеся в противоположные стороны. Вращение роторов осуществляет мотор-редуктор 2; второй ротор получает вращение от приводного через зубчатую передачу 3 с передаточным отношением 1,5. Частота вращения рабочих органов регулируется в диапазоне 30…90 об/мин. Камера обогревается шестью трубчатыми электронагревателями. Шкаф управления 1 (рис. 2) предназначен для управления электроприводом смесителя и поддержанием температуры в рабочей зоне. С целью интенсификации процесса диспергирования и изучения влияния различных конструктивных параметров на качество получаемого материала разработаны рабочие органы с различной геометрией их фигурной части (рис. 3). Минимальный зазор при использовании любой из предложенных конфигураций составляет $h_0$ = 0,15 мм, что обеспечивает высокую сдвиговую деформацию. Конфигурация гладких рабочих органов (фигурная часть в виде гладких валков) позволяет достичь максимальной величины сдвига за короткий промежуток времени. Для обеспечения продольного перемещения материала разработаны рабочие

органы с наклонной нарезкой фигурной части: рифлёные (фигурная часть в виде рифлёных валков) и винтовые многозаходные (фигурная часть в виде многозаходной винтовой нарезки).



овальные гладкие рифлёные винтовые многозаходные

Рисунок 3. Исследуемые фигурные части рабочих органов.

Предварительные экспериментальные исследования показали работоспособность разработанной технологии и оборудования и возможность создания на ней композиционного материала с с заданным набором свойств

Список используемых источников

1. Утилизация и переработка твёрдых бытовых отходов Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Тамбов, 2015.

2. Переработка отходов полимерных материалов на валково-шнековом агрегате Макеев П.В., Клинков А.С., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 6. № 1 (104). С. 119-123.

3. Ресурсосберегающая технология переработки отходов полимерных материалов Клинков А.С., Макеев П.В., Шашков И.В., Полушкин Д.Л. Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 3 (47). С. 292-300.

4. Методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества Макеев П.В., Клинков А.С., Полушкин Д.Л., Беляев П.С. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18. № 1. С. 166-172.

5. Технология получения полимерпесчаной черепицы из отходов термопластов / С.П.Хрущев, И.В.Шашков, А.С.Клинков, П.С.Беляев // Полимеры в строительстве: Тез.докл. – Казань, 2004. – С. 110.

6. Утилизация полимерной тары и упаковки (Учебное пособие) Клинков А.С., Беляев П.С., Соколов М.В., Шашков И.В.,Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 64 с.

# ПОВЕДЕНИЕ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С НАПРЯЖЕНИЕМ СДВИГА

**Опарина И.Б.**
***Институт металлургии и материаловедения РАН,***
***ibo@imet.ac.ru***

Реологический взрыв твердых тел является специфической формой разрушения этих тел под высоким давлением и касательными напряжениями. Это явление впервые описано Бриджмен в своей классической работе [1]. Он рассматривал взрывы образцов, периодически происходившие в ходе экспериментов, как некие мешающие факторы и не обращал внимания на изучение этого явления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования этого явления проводились с помощью аппарата, включающего одну пару наковален Бриджмена (рис. 1), одна из которых была закреплена на 100-тонном гидравлическом прессе, а другая - на валу механического редуктора. Редуктор обеспечивал вращение наковальни вокруг оси, проходящей через центры обеих наковален. Угол поворота измерялся с точностью ± 0,2 рад и был неограниченным. Скорость вращения была постоянной с точностью около 1 рад/сек.

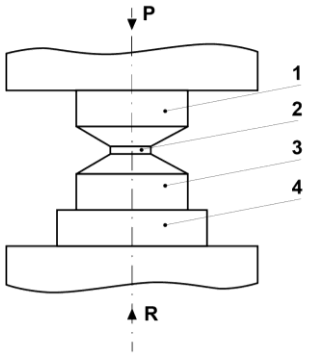



Рисунок 1. Схема аппарата: 1 - верхняя наковальня, 2 - образец, 3 – нижняя наковальня, 4 - вал редуктора.

Наковальни имели форму усеченных конусов, изготовленных из легированной стали твердостью HRC60 или из цементированного карбида с 8 % кобальта. Рабочие поверхности наковален имели площадь 2-3 $см^2$ и были отшлифованы.

Объектом исследований были поликристаллические диэлектрики, такие как различные формы $CaCO_3$, угля, кирпича, соли, борной кислоты и т. п. материалы. Наиболее удобным был мел.

Давление оценивалось как среднее усилие на площадь рабочей поверхности наковален. Образцы взрывались, когда давление и деформация достигали некоторых значений, индивидуальных для каждого материала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что взрыв происходит только при давлении выше начального значения $P_0$. Взрыв никогда не происходил ниже этого значения независимо от деформации. Взрывы, которые наблюдались при давлениях выше $P_0$, зависели от величины давления: чем больше давление, тем больше сила взрыва. Величина деформации, которая была необходима для взрыва (α), зависела от величины давления. Форма этой зависимости показана на рис. 2.

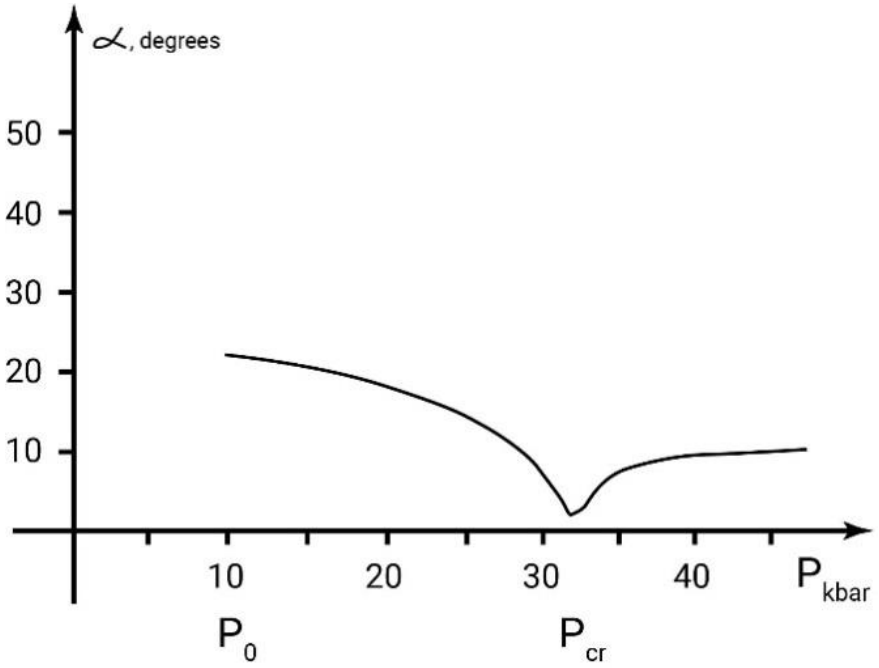



Рисунок 2. Зависимость угла поворота наковальни, необходимого для взрыва.

Кривая имеет минимум, который отличается для разных материалов. Значение давления, соответствующее этому минимуму, обозначается $P_{cr}$. Величина α при $P_{cr}$ составляет всего 1-3 градуса. Величина α изменяется от десятков градусов при давлении $P_0$ до 1-3 градусов при $P_{cr}$, а затем медленно увеличивается до значения 10 градусов.

Таблетка из материала формировалась между наковальнями только под давлением около $P_0$ и выше. При более низких давлениях таблетки не формировались - материал только растрескивался. После взрыва остаток таблетки оставался между наковальней. Толщина таблеток зависит от вида материала и величины давления и составляет около нескольких миллиметров. Толщина и масса остаточных таблеток была меньше, чем толщина и масса таблеток до взрыва. Таблетки теряли от нескольких процентов до 50 % массы после взрыва. Значение этой потери зависит от давления. Плотность таблеток после взрыва стала на несколько процентов выше, чем до взрыва.

Структура таблеток резко отличалась до взрыва и после. Образовывалось много слоев, лежащих под углом ± 45 градусов к оси симметрии. Эти слои похожи на поверхности разрушения. Металлические

хлопья образовались в остаточных таблетках, когда материал был легирован металлическим порошком. Ориентация этих хлопьев была такой же, как и ориентация указанных слоев.

Часть материала вылетала при взрыве в виде пыли. Большинство частиц пыли (около 90%) были размером 1-2 микрона. Поверхности разрушения также были покрыты большим количеством пыли.

Рабочая поверхность наковален получила специфические повреждения после взрыва. Было два вида повреждений: волны и царапины. Эти повреждения наблюдались как на стальных, так и на твердосплавных наковальнях. Волны имели длину около нескольких миллиметров и ширину около десятых долей миллиметра. Длина волны не зависела от материала наковален, но ширина была больше у стальных наковален, по сравнению с твердосплавными.

Царапины имели длину до 2-3 миллиметров, глубину и ширину до нескольких десятых миллиметра. Формы царапины были разнообразны, а ширина и глубина менялись вдоль одной царапины. Направления царапин были хаотичными в центральной части рабочей поверхности наковален, и становились радиальными в периферийной части. При этом следует отметить, что твердость всех взорвавшихся материалов и твердость включений была заметно меньше, чем у материалов наковален.

Обнаружена особенность реологического взрыва: материал под давлением выше $P_{cr}$ меньше подвергается деформации и может находиться в этом состоянии неопределенно долгое время, но может взрываться при снижении давления. Таким образом, наблюдается метастабильное состояние твердого тела.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реологический взрыв сопровождается жестким излучением, которое наблюдается во время и после взрыва. Излучение исследовали с помощью высокочувствительного сцинтилляционный детектора. Излучение, которое появилось в момент взрыва было электромагнитным и имело верхний энергетический порог 10-12 кэВ. Количество зарегистрированных частиц зависело от энергии: она быстро уменьшалась выше этого порога и увеличивалась ниже его.

Возникновение жесткого излучения при взрыве является следствием столкновений высокоскоростных продуктов взрыва с молекулами воздуха.

Список используемых источников

1. Bridgman PW 1935 *Phys. Rev.* **48** pp 825-847.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

**Леушин И.О., Марков А.И.**
***Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Skixmai@yandex.ru.***

Внедрение технологии вакуумно-пленочной формовки (ВПФ), в основе которой заложен чистый формовочный песок без связующих материалов, вакуум и синтетическая пленка, создало возможность организации литейных производств нового поколения. Еще в начальный период появления технологии вакуумно-пленочной формовки, специалистам было известно о возможностях изготовления стержней по технологии ВПФ.

Известны наиболее целесообразные направления использования таких стержней, но оказывается, что ведущим производителям оборудования это невыгодно. «Промлит» (г. Чебоксары), «ВКМ-Сталь» (г. Саранск), «Новые Литейные Технологии» (г. Набережные челны), эксплуатирующие оборудование вакуумно-пленочной формовки и специализирующиеся на выпуске крупного вагонного литья, отливок запорной арматуры используют стержня изготавливаемые по другой технологии, нежели ВПФ [1].

К примеру: для производства стержней, формирующих внутреннюю поверхность пустотелых корпусов отливок при ВПФ, используются стержневые автоматы фирмы Laempe, использующие Cold-BoxAmin процесс. При всех существующих технологических и экономических преимуществах изготовления стержней по Cold-BoxAmin процессу, в период заполнения вакуумируемой формы расплавом, на практике приводит к разрушению их поверхностного слоя и формированию в отливках многочисленных дефектов, таких как засоры и раковины.

Наиболее подходящий вид стержней для вакуумно-пленочной формовки, являются стержни, изготовленные вакуумируемой оснастке.

Процесс изготовления стержней с использованием технологии вакуумно-пленочной формовки не значительно отличается от процесса изготовления вакуумно-пленочных форм. Главными достоинствами использования таких стержней являются: возможность использования одних и тех же формовочных и расходных материалов, одни и те же подходы для устранения возникающих дефектов [2].

На блок-схеме представлена типовая технология изготовления стержней в вакуумируемой оснастке.

Использование стержней, изготовленных по технологии вакуумно-пленочной формовки имеет ряд преимуществ:

1) Сокращаются потери формовочного песка на обороте до 1.5-2% (снижение объемов свежих добавок песка и отходов производства).

2) Значительно повышается качество литой продукции и сокращаются объемы окончательного брака (удаление выделяемых газов, использование чистого формовочного песка без примесей).

3) Многократно сокращаются объемы выделяемых газов (отсутствие химических составляющих в формовочном и стержневом материалах, отсос газов) [3].

Таким образом, применение технологии изготовления стержней в вакуумируемой оснастке позволяет получать качественные отливки с минимальным процентом брака. В настоящее время исследования в этом направлении проводятся на кафедре «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, а именно, идёт разработка опытного образца стержневого ящика, изучаются варианты герметизации стержня, и разрабатываются необходимые меры для сохранения геометрии стержня во время заливки формы и затвердевания отливки.

Список используемых источников

1. Феклин Н.Д., Вакуумно-пленочная формовка. Способ перегрузки форм. // ИТБ «Литье Украины». – 2015. - №3. – С. 39-40.

2. Илларионов И.Е., Кузнецов В.П. Вакуумно-пленочная формовка. История развития и внедрения в отечественной промышленности // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 10. – С. 3-8.

3. Феклин Н.Д., Вакуумно-пленочная формовка. Особенности разработки литейных технологий. // ИТБ «Литье Украины». – 2015. – №4. – С. 40-42.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОСТИ АБРАЗИВНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИЛА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ IMAGEJ

**Ершов В.А., Мордасов Д.М.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация,***
***slavaershov47@gmail.com***

При выполнении металлографических исследований перед исследователем встает необходимость описать структуру изучаемого материала. Одним из наиболее распространенных элементов структуры материалов являются поры. Особенно важна роль пор при изготовлении изделий методами порошковой металлургии. Программный анализ изображений значительно облегчает исследование пористости материалов [1].

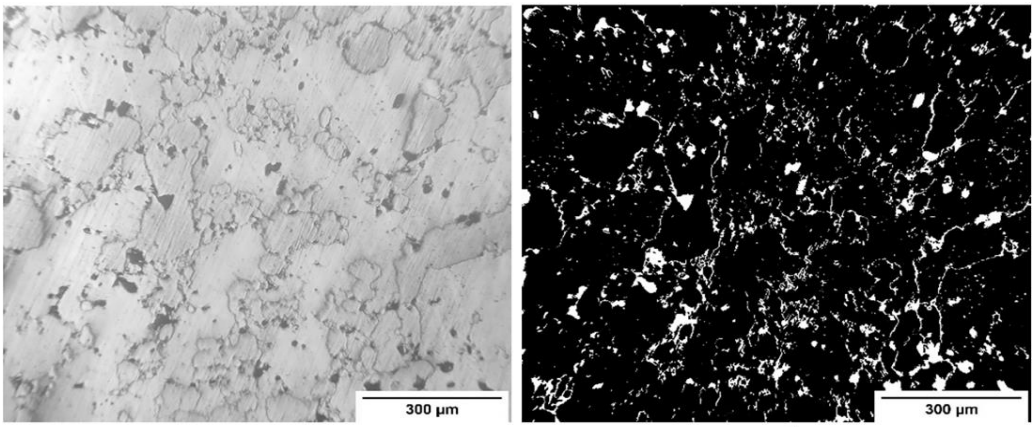
Целью работы является определение доли поверхностных пор от общей площади поверхности, выявление характера распределения пор по размерам и их геометрические особенности.

В качестве объекта исследования выбран абразивный материал, полученный методом порошковой металлургии. Из исследуемого материала изготовлен металлографический шлиф.

Исследование проводилось на оптическом микроскопе ММР-2. На рис.1,а показана поверхность образца после полировки.

Проведение комплексного анализа поверхностных пор возможно при помощи программы с открытым исходным кодом для анализа и обработки изображений – ImageJ [2].

Первым этапом анализа является определение масштабов для последующей обработки фотографии. Для этого масштабная линейка изображения измеряется и в программе задается соответствие 1 пикселя и известного размера.




а б

Рисунок 1. Микроструктура образца: а - общий вид; б - маска пор.

Далее на изображении выделяется исследуемая область, которая преобразуется в 8-ми битное, черно-белое изображение. Используя инструмент Threshold, выбираются параметры, обеспечивающие максимальное выделение всех пор. Таким образом, получаем маску для анализа характеристик пор рис.1.б.

С помощью программного компонента анализа частиц получаем таблицу данных для каждой поры (площадь, периметр, округлость).

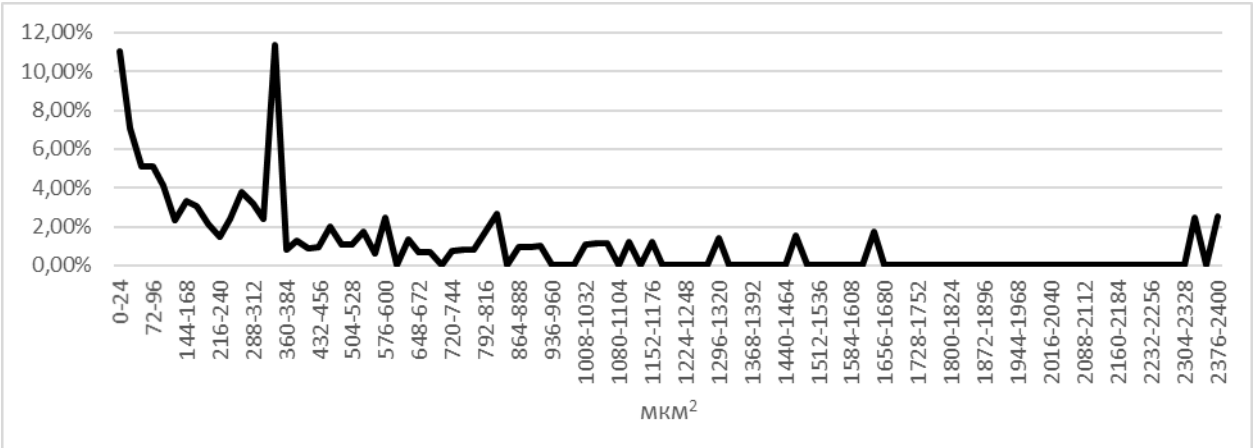



Рисунок 2. Вклад пор различной величины в общую пористость образца.

Частотный анализ данных по площади показал, что наибольшее количество пор имеют площадь от 0 мкм$^2$ до 24 мкм$^2$. Распределение пор носит экспоненциальный характер.

Вклад пор разной площади в общую пористость отражен на графике рис.2. На графике, есть выраженные пики в диапазонах 0-24 (мкм$^2$) 336-360 (мкм$^2$).

Для определения округлости пор программа ImageJ обрабатывает данные каждой поры по формуле:

$$Rn = \frac{4 \times S}{\pi \times D_{max}{}^2} \times 100\%, \quad (1)$$

где $Rn$ – округлость поры; $S$ – площадь поры; $D_{max}$ – наибольший диаметр эллипса, в который заключена пора.

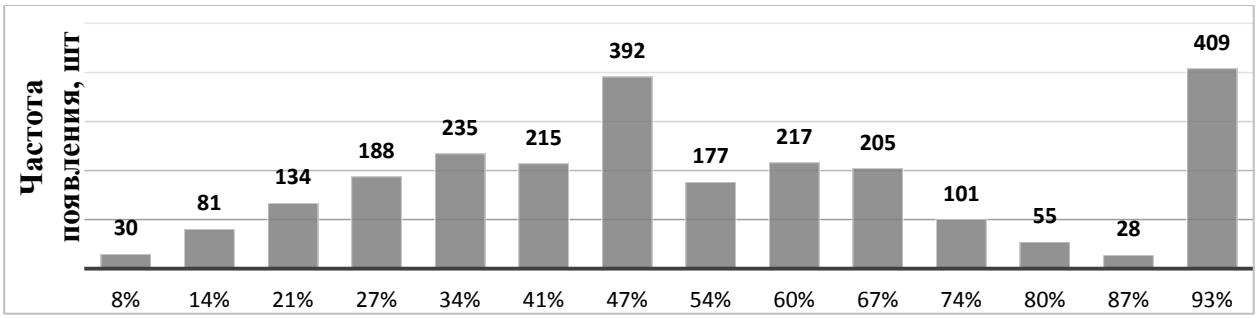



Рисунок 3. Распределение пор по округлости.

На графике рис.3. необходимо отметить аномальный пик на последнем диапазоне. Этот пик объясняется наличием большого количества малых по площади пор, которые ввиду низкого разрешения снимка интерпретируются программой как точки. Данный пик можно не учитывать при оценке округлости пор.

Таким образом, в работе установлена доля поверхностных пор от общей площади поверхности. Выявлен характер распределения пор по размерам и их геометрические особенности.

Список используемых источников

1. Фандеев, В.П. Методы исследования пористых структур / В.П. Фандеев, К.С. Самохина // Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – №4.

2. Schindelin, J. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis / J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise // Nature methods. – 2015. – №9. – p.676.

3. Dinh, H.T. Digital processing of images of nano-dimensional elements on nanostructured material surface using the ImageJ software / H.T. Dinh, N.V. Lushpa, K.V. Chernyakova, I.A. Vrublevsky // Doklady BGUIR. – 2019. – Vol.122. – №.4. – p.79.

# ИСПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

**Леушин И.О., Горохов Д.А.**
***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева",***
***denisgorokhov57@gmail.com***

Ремонтные материалы на основе металлополимерных композиций применяют более 30 лет. Число производителей металлополимерных композиций постоянно увеличивается как в России, так и за рубежом. И если в нашей стране эти материалы не отличаются стабильным качеством из-за низкого качества входящих компонентов, то зарубежные производители выпускают высококачественную продукцию со стабильными физико-техническими характеристиками.

Для осуществления восстановления размеров деталей наиболее перспективными являются способы, при которых деталь или не подвергается температурным воздействиям, или подвергается незначительному нагреву, не изменяющему ее структуру и механические свойства. К таким способам относятся: гальваническое и электроискровое наращивание металла, различного рода металлизации напылением, импульсная приварка лент, но в первую очередь – применение полимерных композиционных материалов. Это обусловлено:

- относительной дешевизной синтетических материалов по сравнению с металлами;
- простотой их применения;
- универсальностью при восстановлении деталей из цветных и черных металлов, бетона, дерева, пластмасс, керамики, стекла и др.;
- высокой химической стойкостью полимеров к различным агрессивным средам, в том числе кислотам, щелочам, нефтепродуктам, морской воде и др.;
- возможностью получения разнообразных, порой уникальных физико-химических свойств полимерных композиционных материалов, часто превосходящих по своим эксплуатационным характеристикам металлы;
- малой удельной массой полимеров;
- шумо- и вибропоглащением при их использовании в конструкциях машин и механизмов;
- антифрикционными и электроизоляционными свойствами.

Несмотря на невысокие (по сравнению с металлами) прочностные характеристики полимеров и адгезионных соединений полимер-металл, а также на невысокую допустимую рабочую температуру восстановленных соединений (в большинстве случаев не выше 200-250 ºС), применение

полимерных материалов в ремонтных работах возрастает во всем мире. В настоящее время уже достаточно четко определились те области, в которых использование полимерных материалов предпочтительно, а их ценные свойства используются наиболее эффективно. Ремонтно-восстановительные работы с применением полимерных материалов в различных отраслях промышленности можно условно разделить на два основных направления:

- использование полимерных материалов для устранения брака и дефектов основной продукции предприятия, например, литьевого брака в литых заготовках;

- ремонт основного и вспомогательного технологического оборудования самих предприятий (насосное и вентиляционное оборудование, редукторы, системы гидравлики, трубопроводы, технологические емкости и др.);

Восстановление деталей металлополимерными композициями имеет ряд специфических особенностей по сравнению с восстановлением деталей металлами (наплавкой, металлизацией, сваркой, пайкой и т.п.), обусловленных, прежде всего, использованием химической энергии для обеспечения реакции полимеризации. В этом случае необходимо в ходе технологического процесса управлять формированием свойств полимерного материала, показатели которого отличаются от показателей свойств металлической детали. Поэтому незначительное отклонение от оптимальных условий может привести к резкому ухудшению качества восстанавливаемой детали. При восстановлении деталей металлополимерами имеется определенный «запас» качества, в результате чего режимы восстановления не так жестки.

Подготовка поверхностей деталей. Одной из основных операций, определяющих качество восстановления деталей, является подготовка их поверхностей перед нанесением металлополимерной композиции. Ее цель – обеспечить наилучшие условия адгезионного взаимодействия между композицией и деталью, а также придать поверхности детали необходимую геометрическую форму.

Весь процесс подготовки можно разделить на следующие операции:

- очистка и мойка деталей;

- обезжиривание и химическая обработка восстанавливаемой поверхности;

- сохранение чистоты восстанавливаемой поверхности до нанесения композиции.[1]

При отливке деталей из алюминиевых сплавов типа АЛ5, АЛ9, ВАЛ5 и др. наряду с допустимыми дефектами литья встречаются отдельные поры и раковины глубиной 1–3 мм, которые по условиям работы деталей недопустимы, поскольку приводят к снижению сопротивления усталости металла и способствуют развитию коррозии [2,3].

Для выравнивания внешней поверхности летательных аппаратов (щелей, зазоров, ступенек), а также неровностей в местах крепежных соединений широко применяются шпатлевочные материалы. Как правило,

такие материалы являются высоконаполненными системами, на основе полимерных пленкообразующих веществ.

Шпатлевочные материалы, которые могут быть использованы для выравнивания внешней поверхности, а также заполнения дефектов литья, должны соответствовать следующим основным требованиям:

- легко наноситься на поверхность, заполняя углубления за минимальное количество технологических операций;
- обеспечивать надежное заполнение зазоров между деталями при минимальной усадке при отверждении;
- обеспечивать аэродинамические и декоративные свойства поверхности;
- хорошо обрабатываться технологическим инструментом;
- обладать высокой адгезией к металлу;
- устойчивостью к вибрации и перепадам температур от -60 до +135°С, а также механической прочностью и эластичностью.

Следует отметить, что физико-механические свойства шпатлевочных материалов зависят как от химической природы полимерного пленкообразующего, так и от химической природы и структуры наполнителей [4].

## ВЫВОД

Металлополимерные композиции, выполняющие роль шпатлевочных материалов, могут быть использованы как для устранения дефектов литья (заделки пор и раковин) на деталях корпусов из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, так и для выравнивания внешней поверхности деталей в целях обеспечения заданных характеристик.

Список используемых источников

1. Тулинов, А.Б. Новые композиционные материалы в ремонтном производстве:/ А.Б. Тулинов, А.Б. Гончаров// Ремонт, восстановление, модернизация.- 2003. -№11 -С. 46-47.

2. Шавнев, А.А. Методы соединения алюминиевых композиционных материалов:/ А.А. Шавнев, Е.И. Курбаткина, Д.В. Косолапов// Авиационные материалы и технологии.- 2017.- №3 -С. 35–42.

3. Жиликов, В.П. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ):/ В.П. Жиликов, С.А. Каримова, С.С. Лешко, Д.В. Чесноков// Авиационные материалы и технологии.- 2012. -№4 -С. 18–22.

4. Кондрашов, Э.К. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники:/ Э.К. Кондрашов, В.А. Кузнецова, Л.В. Семенова, Т.А. Лебедева// Российский химический журнал.- 2010.- №1- С. 96–102.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА, АРМИРОВАННОГО ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ

**Максимович С.В., Белкина И.В.**
***Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,***
cheslovna@tut.by, belkina_iv@grsu.by

Полистиролбетон можно отнести к перспективным материалам, которые характеризуются рядом преимуществ: относительно высоким коэффициентом конструктивного качества, хорошей обрабатываемостью, способностью сохранять стальную арматуру от коррозии и т.д.[1].

Однако при всех положительных качествах политстиролбетон обладает и определенными недостатками, одними из которых являются более высокая усадка в сравнении с другими видами легких бетонов, а также низкая прочность и хрупкость не позволяющие строить многоэтажные здания [2].

По данным [3] предельные величины свободных деформаций усадки для полистиролбетона составили соответственно 3,2...3,5 мм/м. На основании данных полученных по результатам исследований[4] деформации усадки полистиролбетона превышают аналогичные деформации поризованных легких бетонов.

Уменьшить усадку, увеличить прочность и терщиностойкость полистиролбетона можно добавлением фибры. Чтобы оценить влияние полипропиленовой фибры на прочностные характеристики и усадочные деформации полистиролбетона были проведены экспериментальные исследования. В результате получены данные о прочностных характеристиках и усадочных деформациях образцов из полистиролбетона и полистиролбетона, армированного полипропиленовой фиброй.

Для определения прочности полистиролбетона были изготовлены образцы в виде кубов (длина ребра 10 см) и призм (10х10х40 см).

Заформованные образцы до распалубки выдерживались одни сутки в формах. После распалубливания все образцы хранились в одинаковых температурно-влажностных условиях.

Результаты испытаний образцов-кубов на сжатие сведены в таблицу 1.

На основании данных таблицы 1 можно сделать вывод о том, что добавление фибры улучшает прочностные характеристики полистиролбетона.

При определении усадки бетона использовались образцы-призмы (10х10х40 см).

Определение изменений линейных деформаций образцов осуществлялось с помощью установки для определения деформаций усадки и расширения и индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. За базу измерений принимался стальной эталон длиной 430 мм.

Таблица 1.

Испытания образцов на прочность.

| Наименование изделия | Плотность, кг/м$^3$ | Прочность на сжатие, МПа | Прочность на изгиб, МПа |
|---|---|---|---|
| Полистиролбетон армированный фиброй | 526,4 | 3,85 | 0,955 |
| Полистиролбетон без фибры | 527,02 | 3,51 | 0,819 |

На рисунке 1 представлено фото определения деформаций усадки.

Рисунок 1. Определение деформаций усадки

Полученные значения деформации усадки бетонов экспериментальных составов представлены на рисунке 2.

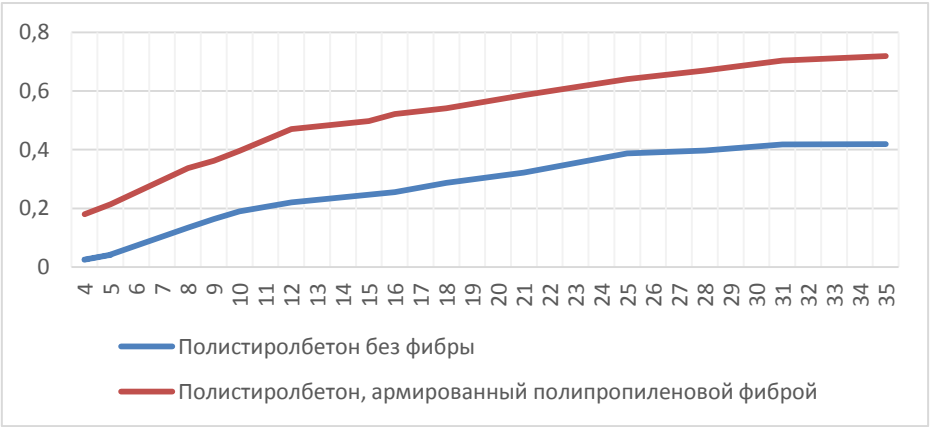



Рисунок 2. Деформации усадки бетонов

По графику можно сделать вывод, что введением в состав полистиролбетона полипропиленовой фибры можно существенно снизить усадку бетона.

В ходе выполненной работы установлено, что при введении в состав полистиролбетонной смеси полипропиленовой фибры достигается положительный эффект: уменьшение усадочных деформаций на 42%, увеличение прочности на сжатие на 8,5%, увеличение прочности на изгиб на 17%.

Список используемых источников

1. Методика проектирования состава полистиролбетона с заданными свойствами / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, Ю.В. Гарницкий, Г.В. Кочкарёв // Технолгии бетонов. – 2015. - №1-2. – С.42-46.

2. Максимович С.В. Полистиролбетон армированный фиброй/ С.В.Максимович // Современные твердофазные технологии: теория, практика, инновационный менеджмент : материалы VIII Междунар. науч.-инновац. молодежной конф., Тамбов, 27-28 октября 2016 г..- Тамбов : Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2016 .- С.119-121.

3. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности / Ю.М.Баженов, Е.А.Король, В.Т.Ерофеев, Е.А.Митина. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 320 с.

4. Беляков В.А. Прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства полистиролбетона для строительных конструкций и изделий. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.- Уфа – 2010.

5. Булатов И.Ю. Ползучесть и усадка фибробетона. / И.Ю. Булатов // Транспортное строительство. – 2014. - №1 – С.19-22.

6. Садович М.А. Пенополистиролцементные композиции в строительных материалах: Результаты исследований и внедрения в строительство. – Братск: БрГТУ, 2000. – 147с.

# МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ЛАТУНИ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

**Земцова Я.С., Мордасов Д.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов,***
***mit@mail.nnn.tstu.ru***

Латунь является одним из самых распространенных сплавов на основе меди и цинка. Кроме этих элементов в основе существующих марок латуни содержатся также элементы как олово, марганец, свинец, железо и другие элементы, которые необходимы для улучшения свойств. Отличительной особенностью изделий из латуни является их золотистый цвет, повышенная коррозионная устойчивость и высокие физико-механические свойства.

Коррозионная стойкость латуни определяется главным образом защитными свойствами оксидной пленки, образующейся на поверхности латуни. Такая пленка не эластична и обладает незначительной прочностью, на её создание требуется время.

В процессе эксплуатации возможно обесцинкование латуни – вид коррозионного разрушения, при котором в результате действия на латунь окислительной среды, с ее поверхности удаляется цинк, являющийся более активным металлом. При этом медь остается, и окраска поверхности приобретает красноватый цвет.

Задачей исследования являлось изучение изменения координат цветовой модели RGB поверхности латуни после её окисления в азотосодержащей среде. В качестве окислительной среды использовался 4% раствор азотной кислоты.

Цветовая модель RGB — самый популярный способ представления графики, который подходит для описания цветов, видимых на мониторе, телевизоре, видеопроекторе, а также создаваемых при сканировании изображений. Она используется при описании цветов, получаемых смешиванием трех лучей: красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue).

Для удобства представления координат с помощью средств вычислительной техники их значения варьируются в диапазоне от 0 до 255. Общее количество значений равно 256.

Известны исследования связанные с диагностикой коррозионного разрушения металлов с использованием цветовой модели RGB [1, 2].

В настоящей работе изучена динамика окисления латуни путем определения изменений значений координат RGB.

При проведении эксперимента, заранее отполированный образец помещался в емкость с окислительной средой. Через определенные промежутки времени образец извлекался из раствора, фотографировался и его цифровое изображение обрабатывалось в графическом редакторе Paint. На рис. 1 представлены фотографии поверхности образца латуни после его окисления в 4% растворе азотной кислоты.

0 мин. 3 мин. 6 мин. 11 мин. 14 мин. 17 мин.

Рисунок 1. Латунь после окисления в растворе азотной кислоты.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что значения координат R, G и B аддитивной цветовой модели, определяемые по цифровым изображениям поверхности латуни, уменьшаются с увеличением времени ее окисления и стремятся к определенным значениям. Наибольшее изменение наблюдается в координате G, а наименьшее - в координате B. Такая зависимость связана с формированием окисной пленки, толщина которой и определяет изменение цвета.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы в исследовательской практике для установления времени пребывания латунных изделий в окислительных средах.

Список используемых источников

1. Тарасова М.А. Идентификация зон коррозионного повреждения на поверхности оптическим методом / М.А. Тарасова // Вестник ИжГТУ, 2014. № 2. - С. 39–40.

2. Петренко В.И. Изменение координат аддитивной цветовой модели латуни после окисления в различных средах / В.И. Петренко, Я.С. Земцова, Д.М. Мордасов // Современные технологии композиционных материалов. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Уфа, 2019. - С. 319-320.

# ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ПОЛИАНИЛИНА И КОМПОЗИТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

**Гутник И.В., Дьячкова Т.П., Пасько А.А.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,***
***anosowa_i_w@mail.ru***

Композиционные материалы на основе полианилина и углеродных наноструктур (композиты ПАНИ/УНТ) на протяжении последних десятилетий стали объектом многочисленных исследований. Большинство научных работ посвящено рассмотрению способов получения композитов и влияния условий синтеза на их морфологию и свойства – электропроводность, термическую стабильность. Однако сведения о структурных характеристиках композитов ПАНИ/УНТ в научной периодике не представлены. В связи с этим целью настоящей работы стало изучение особенностей структуры полианилина и композитов ПАНИ/УНТ методом рентгеноструктурного анализа (РСА).

Полианилин и его композиты с углеродными нанотрубками синтезировали методом окислительной полимеризации по методике [1]. Для модифицирования полимером были использованы исходные УНТ «Таунит-М» и «Таунит-МД», отличающиеся физическими свойства и геометрическими параметрами (таблица 1).

Таблица 1.

Общая характеристика УНТ «Таунит-М» и «Таунит-МД».

| Параметры | «Таунит-М» | «Таунит-МД» |
|---|---|---|
| Наружный диаметр, нм | 8–15 | 30–80 |
| Внутренний диаметр, нм | 4–8 | 10–20 |
| Длина, мкм | 2 и более | более 20 |
| Общий объем примесей начальный (после очистки), % | до 5 (до 1) | до 5 (до 1) |
| Удельная геометрическая поверхность, $м^2/г$ | 300–320 | 180–200 |
| Термостабильность, °С | до 600 | до 600 |

РСА образцов (углеродные нанотрубки, полианилин, композиты ПАНИ/УНТ) проводили на дифрактометре «Дифрей 401» (Россия), излучение с длиной волны 2,2897 Å. Время измерения интенсивности в каждой точке составляло 300 секунд в трех положениях рентгеновской трубки и детектора (θ-θ): 25−25, 40−40, 50−50. Измерения проводили с вращением образца. Калибровка детектора осуществлялась по внешнему стандарту. Результаты анализа образцов приведены на рис. 1–3.

На дифрактограммах исходных УНТ «Таунит-М» присутствует рефлекс при $2\theta = 36{,}1^{o}$ (межплоскостное расстояние (d) 3,697 Å), на

дифрактограммах исходных УНТ «Таунит-МД» рефлекс наблюдается при 2θ = 36,47° (d = 3,661 Å), что по данным рентгенофазного анализа соответствует фазе графита. Также стоит отметить уширение дифракционных линий: для УНТ «Таунит-М» ширина на полувысоте составляет 3,75, для УНТ «Таунит-МД» – 3,90.

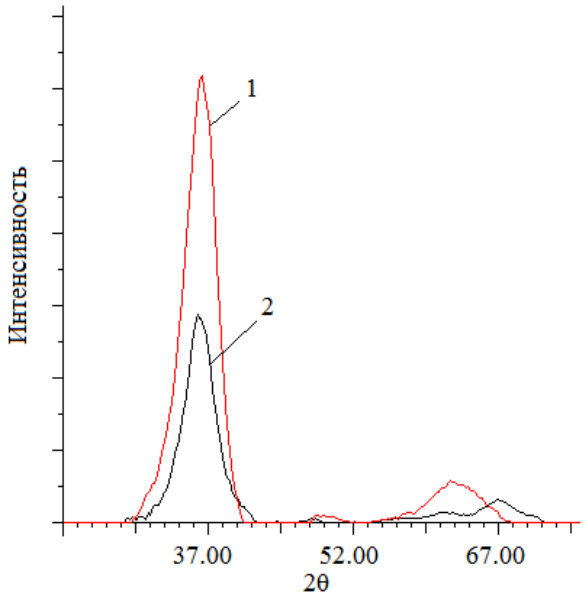



Рисунок 1. Рентгеновские дифрактограммы исходных УНТ «Таунит-М» (1) и «Таунит-МД» (2).

На рентгеновской дифрактограмме полианилина (рис. 2) проявляются три широких пика: 2θ ≈ 38° (d = 3,525 Å); 2θ = 79,2° (d = 1,798 Å); 2θ = 99,1 (d = 1,105 Å). Согласно [2], для электропроводящей формы полианилина широкий пик (d = 3,5 Å), соответствует наличию периодической структуры вдоль полимерных цепей. Причиной уширения пиков, наблюдаемого на дифрактограммах УНТ и ПАНИ, по всей видимости, является высокая аморфизация материала.

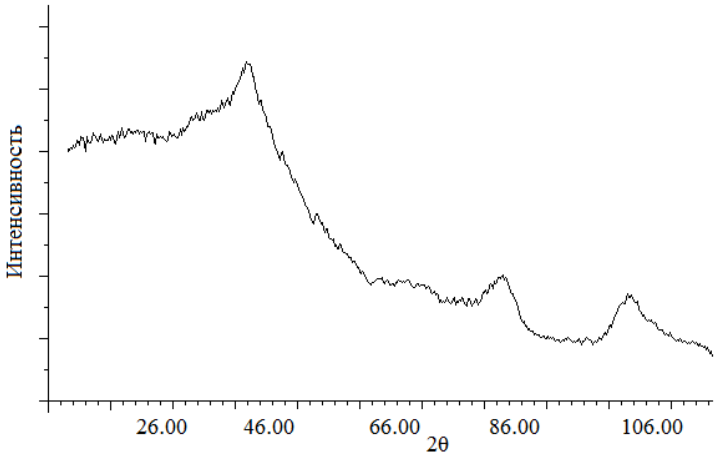



Рисунок 2. Рентгеновская дифрактограмма полианилина, полученного методом окислительной полимеризации.

Общий вид дифрактограмм композитов ПАНИ/УНТ, представленных на рис. 3, имеет сходный вид, т.е. морфологические особенности УНТ не оказывают влияние на структурные характеристики композиционных материалов. На дифрактограммах отсутствуют характерные для кристаллической структуры пики, а наблюдается их размытие в гало. Таким образов формирование массивного полианилинового покрытия на поверхности УНТ способствует аморфизации.

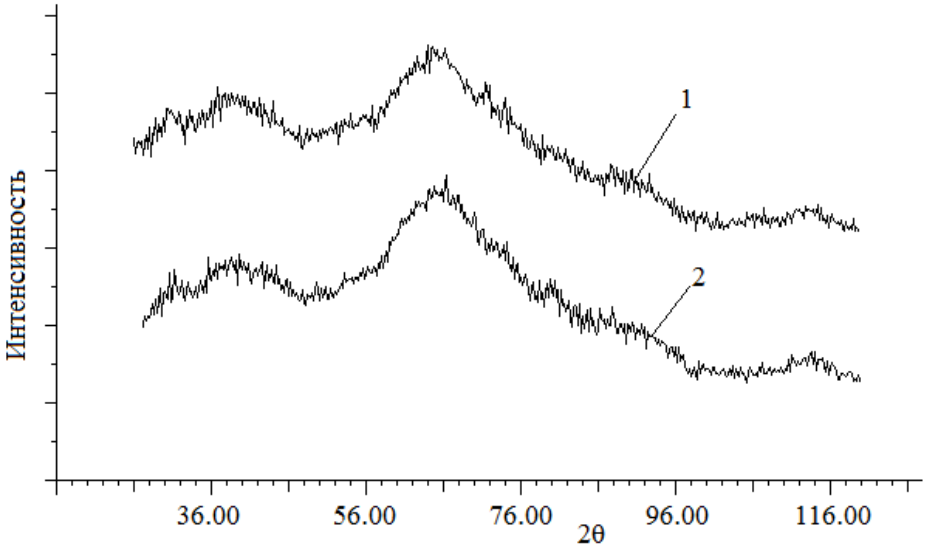



Рисунок 3. Рентгеновские дифрактограммы композитов ПАНИ (80 мас.%) /УНТ «Таунит-М» (20 мас. %) и ПАНИ (80 мас.%) /УНТ «Таунит-МД» (20 мас. %).

На основе представленных данных можно сделать вывод о том, что дифракционная картина, наблюдаемая для композитов ПАНИ/УНТ, не соответствует исходным компонентам. При объедении в композиционном материале полимера и углеродных нанотрубок их свойства кардинально меняются, наблюдается синергетический эффект. Очевидно, что на структуру композитов могут оказывать влияние химический состав поверхности УНТ, массовое содержание в композите полимера и углеродных наноструктур. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

Список используемых источников

1. Аносова, И.В. Исследование закономерностей модифицирования карбоксилированных многослойных углеродных нанотрубок полианилином / И.В. Аносова, Т.П. Дьячкова, А.В. Рухов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – Т. 2. – № 5. – С. 163–168.

2. Сапурина, И.Ю. Наноструктурированный полианилин и композиционные материалы на его основе: дис. ... доктора хим. наук: 02.00.06 / Сапурина Ирина Юрьевна; [Место защиты: Ин-т высокомолекуляр. соединений]. – Санкт-Петербург, 2015. – 292 с.

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ, ВЫЗВАННЫЕ КОГЕРЕНТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Верченов В.С., Никитин А.В., Лоскутова А.Д.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов***

Задачей исследования является исследование влияния когерентного излучения на электрофизические свойства пористого полупроводника [1].

В качестве когерентного излучения использовались полупроводниковые лазеры с известными длинами волн (λ = 650 нм, 530 нм, 808 нм) и мощностью (P = 5 мВт, 200 мВт, 300 мВт).

Образец, имеющий полупроводниковую пористую структуру изготавливался из монокремниевой пластины [2, 3] с последующим электрохимическим травлением: время травления 15 мин., напряжение, подаваемое на электроды 10В, плотность тока проходящего через пластину 0,35 мА/мм$^2$ в растворе электролита HF:C2H5OH=1:2.

Далее пористую структуру поочередно облучали лазерами, параллельно измеряя силу тока, возникающую на образце.

Результаты измерений представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1.

Результаты измерения силы тока, вызванная когерентным излучением.

| Длина волны лазера, нм | 650 | 530 | 808 |
|---|---|---|---|
| Мощность лазера, мВт | 5 | 200 | 300 |
| Сила тока на образце, мА | 1 | 43 | 61 |

Из таблицы видно, как изменяется сила тока на образце при увеличении мощности излучателя.

Это можно объяснить тем, что в полупроводниковой пористой структуре кремния возникает внутренний фотоэффект [4, 5]. Кванты света монохромного полупроводникового лазера с энергией $h\nu$ превышающей ширину запрещенной зоны ΔE, поглощаются электронами валентной зоны, которые в результате переходят в свободную зону (рисунок 1).

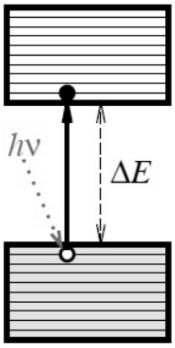



Рисунок 1. Механизм внутреннего фотоэффекта.

При этом возникает дополнительная пара носителей – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне.

Таким образом, с увеличением мощности полупроводникового лазера, проводимость в полупроводниковой пористой структуре будет расти, а сопротивление падать.

Исследованы температурные зависимости удельного сопротивления при воздействии когерентных излучений на пористый полупроводниковый образец (рисунок 2).

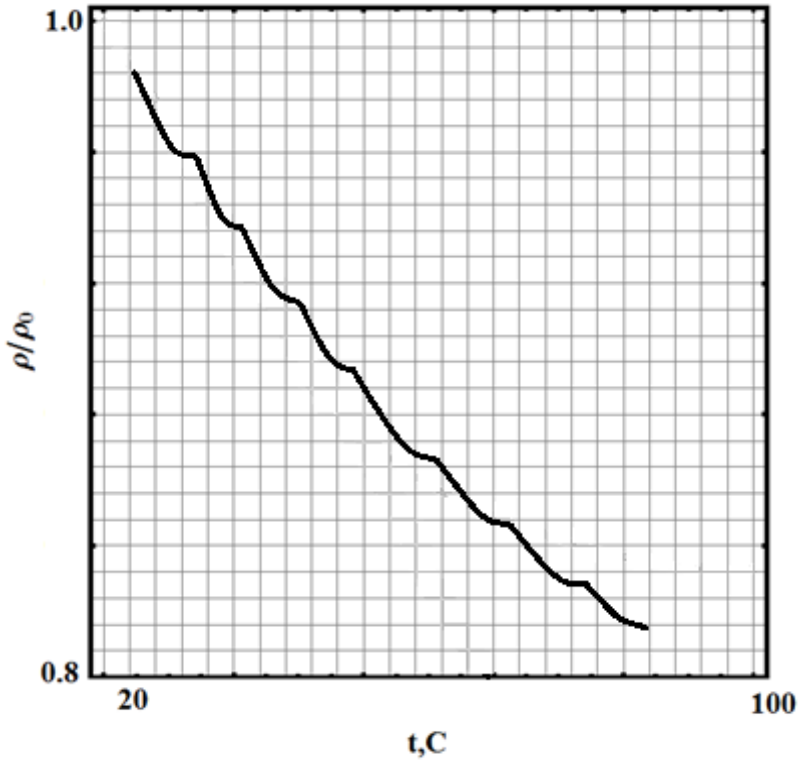



Рисунок 2. Зависимость удельного сопротивления от температуры пористого полупроводникового кремния.

На графике зависимости наблюдается не равномерный спад удельного сопротивления.

Этот вопрос пока не изучен, но предположительно «ступеньки» на зависимости возникают из-за того, что в пористой структуре может проходить квантование.

## ВЫВОД

Исследовано влияние когерентного излучения на электрофизические свойства пористого полупроводника при разных температурах.

Список используемых источников

1. Korolev A.P. Porous silicon is for environmental monitoring sensors / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, N.B. Badirova // Материалы Международной научно-практической конференции «В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов», 2016 – С. 159-163.

2. Королев А.П. Эффективный подход в описании наноразмерных процессов в полевой структуре на монокристаллическом кремнии / А.П. Королев, М.В. Макарчук // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», 2015 – С. 132-133.

4. Макарчук М.В. Температурная зависимость электрофизических свойств образцов из монокристаллического и пористого кремния / М.В. Макарчук // сборник материалов IV международной конференции «Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии», 2017 – С. 79-80.

5. Пятибратов И.С. Исследование теплофизических характеристик полупроводниковой структуры / И.С. Пятибратов, М.В. Сертаков, А.П. Королев // Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 2017 – С. 117-118.

6. Korolev A.P. Solid State Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement / A.P. Korolev, V.P. Shelochvostov, V.N. Chernyshov // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -1999. -Т. 5, № 4. -С. 536 -542.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

**Лоскутова А.Д., Королева И.Л.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов***

Точность выполнения полупроводникового ТЧЭ зависит от уровня технологии, от правильно выбранных технологических режимов и оборудования [1-4]. При технологическом эксперименте исследовались факторы, влияющие на точность получения физико-топологических и конструктивных параметров структуры. Определяющими точность исполнения являются такие технологические операции как фотолитография, диффузия и окисление.

На рисунке 1 изображена микрофотография топологии структуры преобразователя после фотолитографии по оксиду кремния.

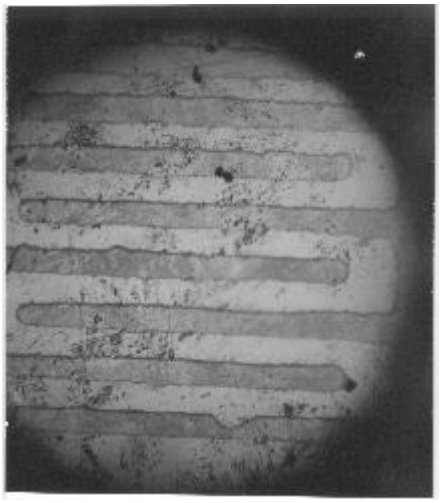


Рисунок 1. Топология после фотолитографии по оксиду кремния.

На изображении видно, что края оксида имеют неровности. Следовательно, нарушается стабильность расстояний между ветвями меандра оксида кремния, что вносит погрешность в выходные характеристики структуры. Абсолютная величина неровности составляет 0,01 мкм. Неточность воспроизведения размеров при фотолитографии связана с преломлением лучей при засвечивании фоторезиста. С неточностями можно бороться, заменив оптическую фотолитографию электронно-лучевой.

При осуществлении локальной диффузии имеет место не только диффузия вглубь подложки, но и в сторону под углом девяносто градусов. Эта боковая диффузия составляет, по литературным данным, 0,8 от вертикальной [5,6]. Это достаточно большая величина, которой нельзя пренебрегать. При расчете профиля легирования и создания топологии необходимо в модель расчета вносить значение боковой диффузии.

С боковым распространением примеси можно бороться, заменив термическую диффузию из газовой фазы ионной имплантацией.

Список используемых источников

1. Ершов В.А. Наноразмерные процессы в полевой кремниевой структуре / В.А. Ершов, А.П. Королев // Шестьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, 2016. – С. 772-774.

2. Korolev A.P. Porous silicon is for environmental monitoring sensors / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, N.B. Badirova // Материалы Международной научно-практической конференции «В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов», 2016 – С. 159-163.

3. Макарчук М.В. Температурная зависимость электрофизических свойств образцов из монокристаллического и пористого кремния / М.В. Макарчук // сборник материалов IV международной конференции «Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии», 2017 – С. 79-80.

4. Пятибратов И.С. Исследование теплофизических характеристик полупроводниковой структуры / И.С. Пятибратов, М.В. Сертаков, А.П. Королев // Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 2017 – С. 117-118.

5. Королев А.П. Эффективный подход в описании наноразмерных процессов в полевой структуре на монокристаллическом кремнии / А.П. Королев, М.В. Макарчук // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», 2015 – С. 132-133.

6. Korolev A.P. Solid State Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement / A.P. Korolev, V.P. Shelochvostov, V.N. Chernyshov // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -1999. - Т. 5, № 4. -С. 536 -542.

# ОБЪЕМНЫЙ ЗАРЯД В ДИЭЛЕКТРИКЕ ПОЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

**Никитин А.В., Верченов В.С., Лоскутова А.Д.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов***

Эксплуатационное качество полевой полупроводниковой структуры зависит от качества слоев. В том числе очень важное значение имеет подзатворный слой оксида кремния [1,2], от надёжности диэлектрических свойств которого зависит точность работы всей структуры. Качество диэлектрика определяется количеством зарядов, что говорит о неидеальности структуры (рисунок 1).

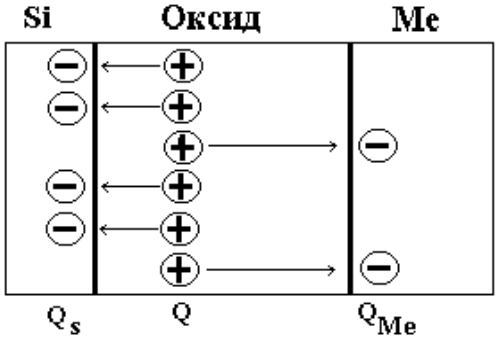



Рисунок 1. Схема расположения зарядов.

Природа объемного (фиксированного) заряда в окисле $Q_{ox}$:

1. Ионы примеси, обычно щелочных металлов K+, Na+ и др.
2. Заряд электронов и дырок на ловушках.

Отрицательная роль объемного заряда состоит в уходе пороговых напряжений структуры металл-оксид-полупроводник: $Vg=-Q_{ox}/C_{ox} + \ldots$, но в этом же его положительная роль: инжектированный и захваченный на ловушках заряд – это информационный заряд постоянного запоминающего устройства [3,4]. Влияние положения заряда в диэлектрике на напряжение плоских зон $V_{BF}$. Пусть Q – полный заряд в диэлектрике, $Q_S$ – наведенный заряд в полупроводнике, $Q_M$- наведенный заряд в металле. Очевидно, что $Q=Q_S+Q_M$ – в силу электронейтральности всей системы. Если соединить затвор с подложкой накоротко, то их потенциалы сравняются $V_S = V_{Me}$ (рисунок 2).

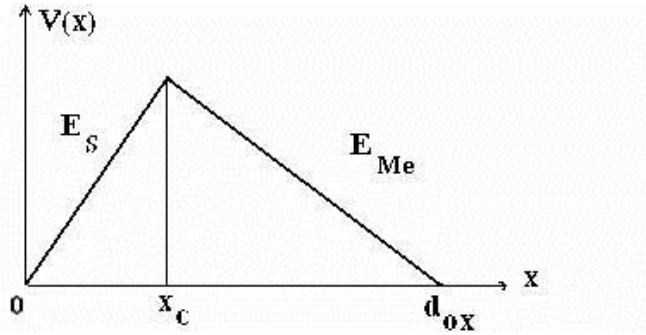



Рисунок 2. Расположение поля и потенциала в МДП системе в зависимости от объёмного положения заряда.

$V_M = E_M \cdot (d_{ox} - x_c)\ V_S = E_S \cdot x_c$,

Здесь $x_c$ = центроид заряда. $V_S = V_M$

$E_S = E_M \cdot (\frac{d_{ox} - x_c}{x_c})$, $E = \frac{Q}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$

$V_{FB} = \frac{Q}{C_{ox}} \cdot (1 - \frac{x_c}{d_{ox}})$, $Q_M = Q \cdot (\frac{x_c}{d_{ox}})$

Значение концентрации заряда на ловушках $N_t$ можно определить из уравнения Пуассона:

$\frac{d^2V_{FB}}{dx^2} = -\frac{qN_t}{\varepsilon\varepsilon_0}$ или $N_t = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{q} \cdot \frac{d^2V_{FB}}{dx^2}$

где ε - диэлектрическая проницаемость, q – элементарный заряд, $\frac{d^2V_{FB}}{dx^2}$ - вторая производная $V_{FB}$ по толщине диэлектрика.

Список используемых источников

1. Ершов В.А. Наноразмерные процессы в полевой кремниевой структуре / В.А. Ершов, А.П. Королев // Шестьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, 2016. – С. 772-774.

2. Korolev A.P. Porous silicon is for environmental monitoring sensors / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, N.B. Badirova // Материалы Международной научно-практической конференции «В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов», 2016 – С. 159-163.

3. Королев А.П. Эффективный подход в описании наноразмерных процессов в полевой структуре на монокристаллическом кремнии / А.П. Королев, М.В. Макарчук // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», 2015 – С. 132-133.

4. Korolev A.P. Solid State Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement / A.P. Korolev, V.P. Shelochvostov, V.N. Chernyshov // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -1999. - Т. 5, № 4. -С. 536 -542.

# ФЕРРИТ ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННЫЙ КРУПНОРАЗМЕРНЫМИ (La), СРЕДНЕРАЗМЕРНЫМИ (Tb) И МЕЛКОРАЗМЕРНЫМИ (Tm) РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Хасбулатов С.В[1,2], Гордиенко Д.И.[3], Шилкина Л.А.[1], Алешин В.А.[1], Вербенко И.А.[1], Резниченко Л.А.[1]**

***[1]-Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону,***

***said_vahaevich@mail.ru***

***[2]-Физико-математический факультет Чеченского государственного университета, г. Грозный,***

***[3]-Физический факультет Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону***

Исследованы кристаллическая структура, микроструктура и диэлектрические свойства твердых растворов вида $Bi_{1-x}РЗЭ_xFeO_3$ (РЗЭ – La, Tb, Tm; x = 0.05–0.20, Δx = 0.05). Установлены закономерности формирования изученных свойств объектов.

## ВВЕДЕНИЕ

К сегнетомагнетикам на основе феррита висмута приковано исключительное внимание как со стороны исследователей, так и со стороны предпринимателей в связи с сочетанием в них как магнитного ($T_N$ ~ 643 K), так и сегнетоэлектрического ($T_C$ ~ 1083 K) упорядочений [1]. Обзор публикаций, связанных с исследованием мультиферроиков вида $Bi_{1-x}РЗЭ_xFeO_3$(РЗЭ – редкоземельные элементы), показал значительный разброс данных, касающихся как симметрии объектов, так и макроотликов в [2-3]. В связи с этим целью работы явилось установление закономерностей формирования физических свойств данных объектов.

## ОБЪЕКТЫ, МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Объектами выступили твердые растворы (ТР) состава $Bi_{1-x}РЗЭ_xFeO_3$ (РЗЭ – La, Tb, Tm, представители крупно,-средне,-и мелкоразмерных РЗЭ, соответственно, $x$ = 0.05–0.50, $\Delta x$ = 0.05). Образцы получены двухстадийным твердофазным синтезом из оксидов $Bi_2O_3$, $Fe_2O_3$, $(РЗЭ)_2O_3$ высокой степени чистоты (чда, осч) при температурах из интервала $T_{1,2синт}$ = (1000÷1183) K, $\tau_{1,2синт}$ = 4-6 ч. (в зависимости от состава) с последующим спеканием по обычной керамической технологии при температурах, $T_{сп}$, равных 1203 K, $\tau_{сп}$ = 1,5 ч.

Использованы стандартные методики исследования зеренного строения и диэлектрических свойств ТР.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных позволил выявить следующие закономерности. При модифицировании крупноразмерными РЗЭ, в том числе, лантаном, формируются фазовые диаграммы состояний, содержащие пять концентрационных областей, соответствующих последовательным структурным превращениям Рэ→Рэ+$P_1$→Рэ+$P_1$+$P_2$→$P_1$+$P_2$→$P_2$(Рэ-ромбоэдрическая фаза, $P_i$- ромбические фазы) с небольшими вариациями фазовых картин. В группе со среднеразмерными РЗЭ, включая Tb, Рэ-фаза, свойственная $BiFeO_3$, либо сохраняется во всём концентрационном диапазоне, либо сосуществует с возникающей Р-фазой. По мере уменьшения радиуса РЗЭ и, как следствие, нарушения условий изморфизма, обеспечивающих образование ТР [4], фазовые диаграммы упрощаются, что, в определённой мере, связано с образованием примесных(балластных) фаз различного состава. Накопление последних в ряду La→Tm приводит к разрыхлению микроструктуры, утолщению границ кристаллитов, деформации габитуса зёрен основной фазы(рис.1).

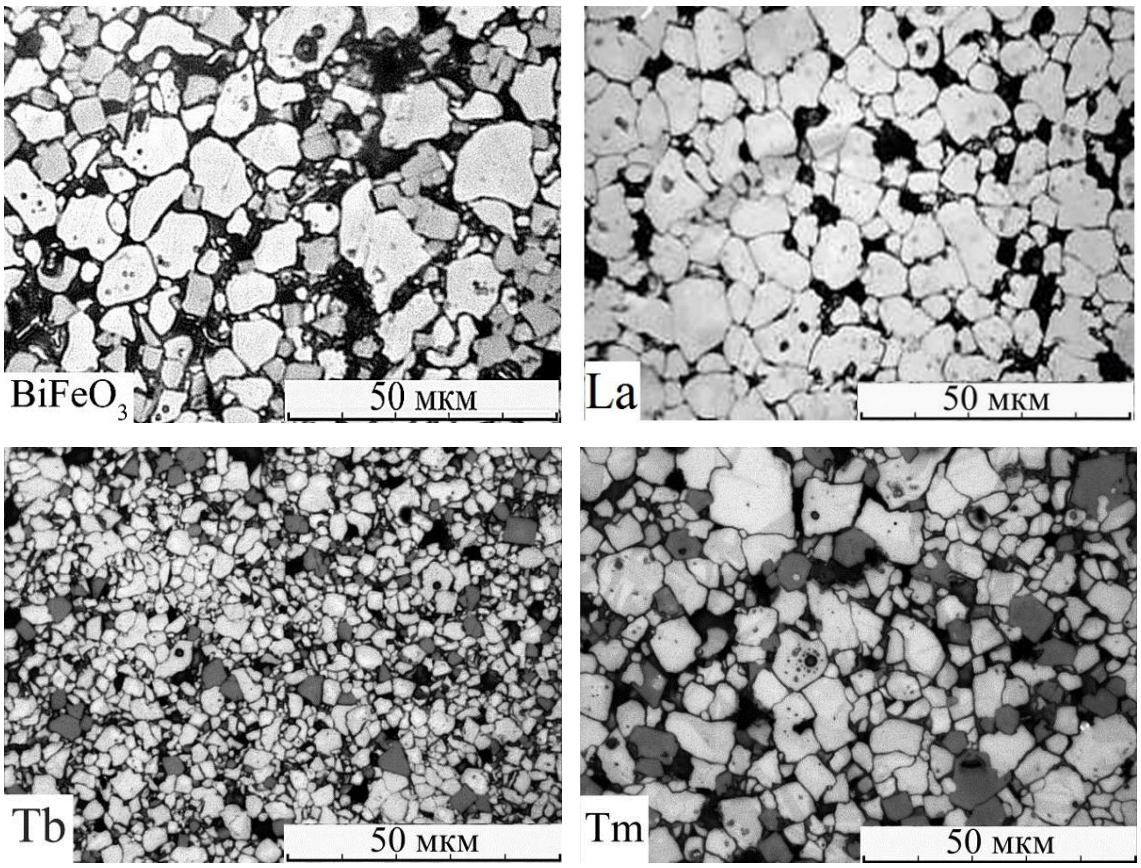



Рисунок 1. Микроструктуры образцов керамики $Bi_{1-x}РЗЭ_xFeO_3$ (РЗЭ – La, Tb, Tm) при комнатной температуре.

На рис. 2 показаны диэлектрические спектры изученных объектов, свидетельствующие о развитии в низкотемпературной области Максвелл-Вагнеровской релаксации, связанной с накоплением свободных зарядов на поверхности раздела компонентов в пространственно-неоднородных средах, коими являются исследуемые керамики.

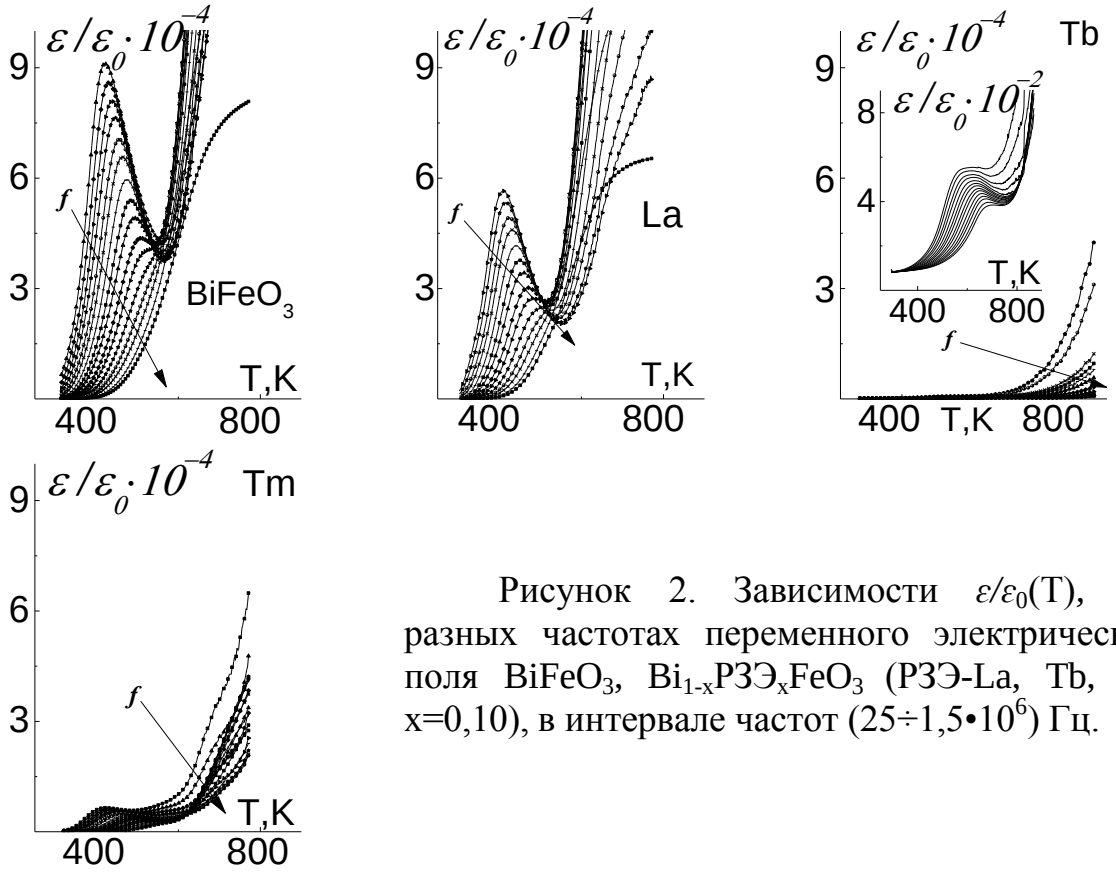



Рисунок 2. Зависимости $\varepsilon/\varepsilon_0$(T), при разных частотах переменного электрического поля $BiFeO_3$, $Bi_{1-x}РЗЭ_xFeO_3$ (РЗЭ-La, Tb, Tm, x=0,10), в интервале частот $(25 \div 1{,}5 \cdot 10^6)$ Гц.

## ВЫВОДЫ

На основе полученных данных выбраны ТР, перспективные для использования в микроэлектронике.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России: проекты №№ 3.6371.2017/8.9, 3.6439.2017/8.9, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики Южного федерального университета.

Список используемых источников

1. Смоленский Г.А., Чупис И.Е. Сегнетомагнетики // Успехи физических наук. 1982. Т. 137. N 3. С. 415 – 448.

2. D.V. Karpinsky, I.O. Troyanchukb, O.S. Mantytskaya, V.A. Khomchenko, A.L. Kholkin/ Structural stability and magnetic properties of Bi1−xLa(Pr)xFeO3 solid solutions. //Solid State Communications 2011. 151. PP. 1686–1689.

3. J. Zhang, Yu-Jie Wu, Xiao-Jia Chen. Structural evolution and enhanced magnetization of $Bi_{1-x}Pr_xFeO_3$//Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 382 PP. 1–6.

4. Урусов В.С. Теория изоморфной смесимости. М.: Наука, 1977. 251 с.

# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

**Лоскутова А.Д., Королев А.П.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов***

Одной из наиболее часто повторяющейся в процессе производства приборов контроля из полупроводников операцией является термическое окисление [1,2]. Существует два способа: выращивание окисла в сухой атмосфере и в парах воды. Окисление в сухом кислороде дает очень качественный диэлектрический слой, но очень тонкий. Тем не менее существует необходимость моделирования процесса окисления в сухом кислороде. При изготовлении опытных образцов необходимо рассчитать технологические режимы при производстве единичных экземпляров опытных образцов.

При выращивании тонкого и качественного диэлектрического слоя оксида кремния в лабораторных условиях для производства экспериментальных образцов разработана модель окисления кремния [3,4]. Для эксперимента была разработана установка для окисления с «открытой трубой» на воздухе. Процесс окисления моделировался для несерийного лабораторного случая. В основе модели окисления лежит эксперимент. Окисление проводилось при температуре 1180°С. Зависимость толщины окисла от времени окисления отслеживалась по цвету. Толщина окисла d пленки $SiO_2$ оценивалась окрашиванием пленок разных толщин в цвета за счет интерференции одной из составляющих белого цвета, длина волны которой кратна толщине пленки. Результаты эксперимента окисления кремния на воздухе по методу «открытой трубы» приведен на рисунке 1.

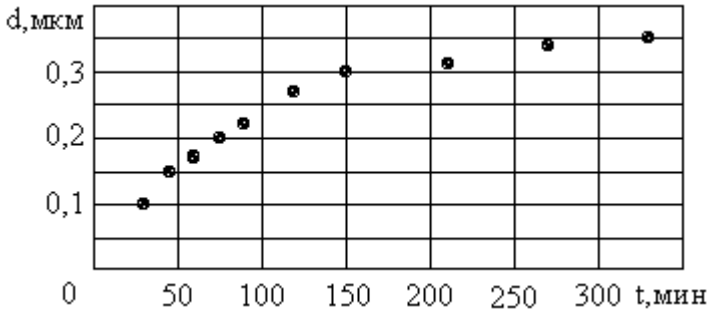



Рисунок 1. Зависимость толщины оксида кремния от времени окисления.

Экспериментальная зависимость позволяет получить аналитическое описание роста оксидной пленки на кремнии при термическом выращивании.

Рост пленки описывается выражением [5]:

$$d^m = Kt,$$

где – $K$ – константа, которая зависит от давления и температуры, $t$ – температура.

Степень m при температуре более $1000^O C$ равно 2.

Рост оксидной пленки происходит по параболическому закону [Королев]:

$$d^2 = K_1 t.$$

Здесь $K_1$ - параболическая константа скорости окисления.

Это выражение можно преобразовать:

$$d^2 = Ate^{-\frac{\Delta E}{kT}},$$

где $k$- постоянная Больцмана, эВ/°С; $A$ - коэффициент, зависящий от давления и температуры; ΔЕ – энергия активации процесса окисления.

При окислении в парах воды:

$$d^2 = 4{,}16 \cdot 10^3 \cdot P^{1,6} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{1{,}7}{kT}\right).$$

При окислении в сухой атмосфере:

$$d^2 = 1{,}4 \cdot 10^3 \cdot P^{0,8} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{1{,}7}{kT}\right).$$

В результате проведения эксперимента по полученным данным была выведена зависимость, в которой коэффициенты получены экспериментально:

$$d = K_2 t,$$

где $K_2$ - линейная константа скорости окисления.

Эксперимент проводили при температуре $1180\,℃$ . Для этих условий подходит выражение

$$d^2 = K_1 t.$$

Примем обозначения:

$$K_1 = a \text{ и } d^2 = y.$$

Тогда можно записать основное уравнение в виде $y = at$.

Определив методом наименьших квадратов

$$a \approx 4{,}4 \cdot 10^{-4} \frac{мкм^2}{мин}.$$

Тогда $d^2 = 4{,}4 \cdot 10^{-4} t$ или $d = 0{,}021\sqrt{t}$.

На рисунке 2 приведена вышеуказанная зависимость и экспериментальные точки.

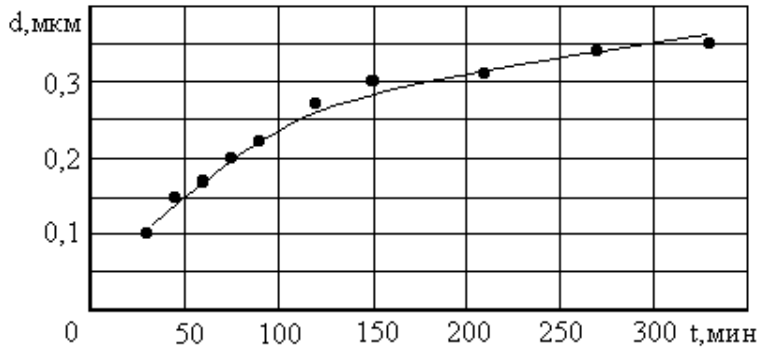



Рисунок 2. Экспериментальная и расчетная зависимости толщины слоя диэлектрика от времени окисления.

Из рисунка 2 видно, что значения, полученные экспериментально и расчетные, отличаются в пределах погрешности. Следовательно, можно пользоваться полученной математической моделью окисления кремния в сухом кислороде.

Список используемых источников

1. Korolev A.P. Porous silicon is for environmental monitoring sensors / A.P. Korolev, M.V. Makarchuk, N.B. Badirova // Материалы Международной научно-практической конференции «В.И. Вернадский: устойчивое развитие регионов», 2016 – С. 159-163.

2. Королев А.П. Эффективный подход в описании наноразмерных процессов в полевой структуре на монокристаллическом кремнии / А.П. Королев, М.В. Макарчук // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», 2015 – С. 132-133.

3. Korolev A.P. Solid State Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement / A.P. Korolev, V.P. Shelochvostov, V.N. Chernyshov // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -1999. - Т. 5, № 4. -С. 536 -542.

4. Макарчук М.В. Температурная зависимость электрофизических свойств образцов из монокристаллического и пористого кремния / М.В. Макарчук // сборник материалов IV международной конференции «Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии», 2017 – С. 79-80.

5. Пятибратов И.С. Исследование теплофизических характеристик полупроводниковой структуры / И.С. Пятибратов, М.В. Сертаков, А.П. Королев // Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», 2017 – С. 117-118.

# РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОАЛЮМИНИЯ

**Леушин И.О., Горохов П.А.**
***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева",***
***pavel_goroxov@mail.ru***

Развитие способов получения материалов с высокой прочностью и малым весом является крайне актуальной задачей. Традиционно, для достижения высокой прочности сплава в основной металл вводятся легирующие элементы, которые в структуре материала образуют упрочняющие фазы. Как известно, образующиеся фазы имеют определенную плотность, которая увеличивает массу материала. Одним из способов снижения плотности металла при сохранении высоких удельных механических характеристик является введение в его объем дефектов структуры, таких как поры. Пористые металлы имеют сложную макро и микроструктуру. Микроструктура и механические свойства материалов определяются способом получения пор. Макроскопические морфологические характеристики, такие как размер пор или кривизна стенок ячеек имеют явно выраженное влияние на механические свойства. Пористый алюминий может быть с открытой или закрытой (пеноалюминий) пористостью. Материалы с отрытой пористостью образуют пространственную сетку, т.е. сеть соединенных друг с другом полостей. Материалы с закрытой пористостью в своей структуре имеют поры, которые представляют собой замкнутую ячейку, в которой заперт газ [1].

Пеноалюминий является материалом с закрытыми порами, размер которых зависимости от параметров технологии может изменяться от долей миллиметра до 20-30 мм и более. Вспененный алюминий обладает высокой удельной прочностью, эффективно поглощает энергию удара, имеет высокий коэффициент звукопоглощения, пониженную теплопроводность. В настоящее время известны такие отрасли применения пеноалюминия, как автомобилестроение, бронетехника, аэрокосмическое производство, строительство. В автомобилестроении из пеноалюминия делают ударопоглощающие вставки в двери и кузов, бампер и облицовку капотов автомобилей; возможно производство разных крышек, поддонов картеров двигателей автомобилей [2].

Для получения пеноалюминиевых материалов в промышленности используется множество технологий:

- Пеноалюминиевые материалы, полученные методом литья, в общем, имеют закрытые поры. Основным компонентом для получения этого типа материала является расплавленное алюминиевое основание, а также материалы, обеспечивающие вязкость расплава, такие как натрий, кальций, оксид алюминия, карбид кальция или ряд других добавок.

- Продувка газом сквозь расплавленный Al—SiC или Al—$Al_2O_3$ сплав.

Этот метод применим для Al и Mg сплавов. Этот метод является наименее дорогостоящим, и с его помощью получают пену алюминия с относительной плотностью 0,03 ... 0,1 и диаметром пор 5 ... 20 мм.

- ALPORAS метод.

Суть метода заключается в воде порофора (например, гидрида титана (TiH2)) в расплавленный алюминиевый сплав с последующим динамическим перемешиванием, контролем нагрева и давления при охлаждении полученного материала. Аналогичный метод применим для сплавов Al. Объемные частицы кальция и титана, добавленные в расплав, в конечном счете определяют относительную плотность и, в сочетании с условиями охлаждения, размер пор. Размер пор может варьироваться от 0,5 до 5 мм, в зависимости от содержания $TiH_2$ и условий охлаждения.

- Смешивание в литейной форме песчанно - глинистой смеси и полимерного порошка с последующим выжиганием частичек полимера и наполнение под давлением литейной формы расплавленным металлом Аналогичный метод применим для сплавов Al, Mg, Ni-Cr и Cu.

Для этого в форму заливают смесь из песка, глины и полимерных компонентов, затем смесь тщательно перемешивают. Пресс-форма с формованной смесью начинает нагреваться, смесь песчано-глинистых компонентов затвердевает с дегидратацией и выделением двуокиси углерода. Затем расплавленный металл вводят в форму под давлением. После полного проникновения в расплав температура смеси слегка увеличивается. В результате полимерные компоненты расплавляются, и их объем занимает расплавленный металл. Кроме того, форму охлаждают, формованное изделие удаляют из него, и песок удаляется вибрацией. Этот метод напоминает метод литья по выплавляемым моделям в традиционных технологиях литья металлов и обеспечивает структуру с открытыми порами и размером пор 1 ... 5 мм в диаметре и относительной плотностью до 0,05 [3].

Данные способы получения пеноалюминия не идеальны, так как его пористая структура не упорядочена, а это значит свойства пеноалюминия напрямую зависит от способа получения. Применение пеноалюминия ограничено, за счет сложности технологии изготовления и высокой цены на сопутствующие расходные материалы.

Список используемых источников

1. Ершов М.Ю., Лепешкин И.А. Технологии получения автомобильных деталей из вспененного алюминия // Дизайн. Теория и практика. 2010. №4. С.77-88.

2. Бутарович Д.О., Смирнов А.А. Расчетное исследование механических свойств пеноалюминия. URL: www.niism-kb.narod.ru (дата обращения 10.11.2019).

3. Бутарович, Д.О. Пеноалюминий как энергопоглощающий материалиегомеханическиесвойства / Д.О. Бутарович, А.А. Смирнов, Д.М. Рябов // Машиностроение. – 2011. - №7. – С. 53 – 58.

# МЕТОДИКА МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛИ 03Х17Н11М3

**Новгородов А.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов,***
***mit@mail.nnn.tstu.ru***

Одним из широко применяемых методов изучения структуры является металлографический, связанный с выявлением особенностей строения материала на макро- и микро шлифах. Металлографический метод исследования позволяет решить такие задачи, как определение структурных составляющих металлов и сплавов, выявление особенностей диффузионных процессов, проходящих при сварке и пайке металлов и сплавов, изучение дислокационной структуры, выявление особенностей превращений при термической обработке [1-5].

В современном аппаратостроении широко применяется высоколегированная, коррозионностойкая сталь аустенитного класса – 03Х17Н11М3. При сварке такой стали возможно изменение ее структуры в зоне термического влияния.

Настоящая работа просвещена металлографическому изучению стали 03Х17Н11М3 и выбору реактива для эффективного выявления ее структуры.

Для исследования стали в соответствии с общепринятой методикой подготовлен металлографический шлиф путем последовательной шлифовки и полировки образца.

Следующим этапом подготовки шлифа к металлографическому исследованию является выявление его структуры путем химического травления. Сталь 03Х17Н11М3 относится к коррозионно- и кислотостойким, поэтому наиболее сложной и актуальной задачей является выбор травителя.

При выполнении исследований, с целью выбора состава для эффективного выявления структуры, нами применялось химическое травление шлифов стали 03Х17Н11М3 с помощью трех реактивов:

- состав № 1: реактив Круппа $HNO_3$ (10 мл); HCl (30 мл);
- состав № 2: $FeCl_3$ (10гр); HCl (30мл); $H_2O$ (120мл);
- состав № 3: $HNO_3$ (10 мл); HCl (100 мл); $H_2O$ (10мл).

Наиболее эффективным по результатам исследований, оказался состав №3, нагретый до температуры 60°С, при травлении которым с многократной переполировкой выявлена зеренная аустенитная структура, микрофотография которой представлена на рис. 1.

Наряду с выявлением границ зерен аустенита, выбранный реактив позволяет выявить специальные карбиды, которые на микрофотографии рис. 1 представлены в виде мелких точек округлой формы.

Таким образом, в результате проведенных исследований осуществлен выбор наиболее эффективного реактива для выявления структуры стали 03Х17Н11М3 и разработана методика его применения, состоящая в нагреве

реактива до 60°С, травлении отполированной поверхности шлифа, механизированной полировке протравленной поверхности с последующим повторным травлением. Экспериментально установлено, что для наиболее контрастного выявления структуры требуется не менее 4 переполировок.

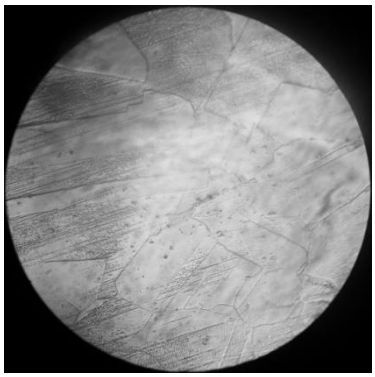


Рисунок 1. Микроструктура стали 03Х17Н11М3 (650×).

Результаты проведенных исследований будут использованы при изучении особенностей изменения структуры стали 03Х17Н11М3 при ее сварке под флюсом.

Список используемых источников

1. Мордасов М.Д. Определение неметаллических включений в высокопрочной броневой стали / М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов // Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. Сборник материалов конференции. В 3-х частях. 2018. - С. 470-472.

2. Зотов С.В. Особенности термической обработки сварных соединений из стали 10Х17Н10М2Т / С.В. Зотов, Д.А. Черных, Д.М. Мордасов // Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах Тезисы докладов 3-ей Международной конференции с элементами научной школы. 2016. - С. 181-183.

3. Зотов С.В. Повышение эксплуатационных свойств штампов из стали Х12МФ / С.В. Зотов, Д.М. Мордасов // Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах. Тезисы докладов 3-ей Международной конференции с элементами научной школы. 2016. - С. 76-77.

4. Королев А.П. Металлографические исследования алюминия А5N после технологических операций / А.П. Королев, А.М. Минаев, Д.М. Мордасов, Л.Н. Тялина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2015. Т. 1. № 1 (21). - С. 64-67.

5. Мордасов Д.М. Термоциклическая обработка штампов для работы в условиях горячего деформирования из стали Х12МФ / Д.М. Мордасов, С.В. Зотов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22. № 3. - С. 481-490.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИЭФИРА

**Макарчук М.В., Ельчищева Т.Ф., Преображенская Е.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,***
***energ-lab@yandex.ru***

В последнее время применение термопластичного полиэфира находит все более широкое применение в различных областях народного хозяйства. Данный полимер относится экологичным материалам, он устойчив к изменению температуры, не растворяется в ацетоне. Однако механические свойства этого материала еще изучены недостаточно [1, 2].

В данной работе проводились исследования предела прочности при растяжении образцов из термопластичного полиэфира на разрывной машине МР-0,5-1. Образцы изготавливались на 3D-принтерах PICASO 3D Designer PRO 250 и MakerBot Replicator Z18. Печать образцов производилась сплошной и ячеистой заливкой. Геометрические размеры образцов выполнялись в соответствии с рекомендациями ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) «Пластмассы. Образцы для испытания».

Для исследований было изготовлено по шесть образцов трех разных видов на каждом из 3D-принтеров (рисунок 1).

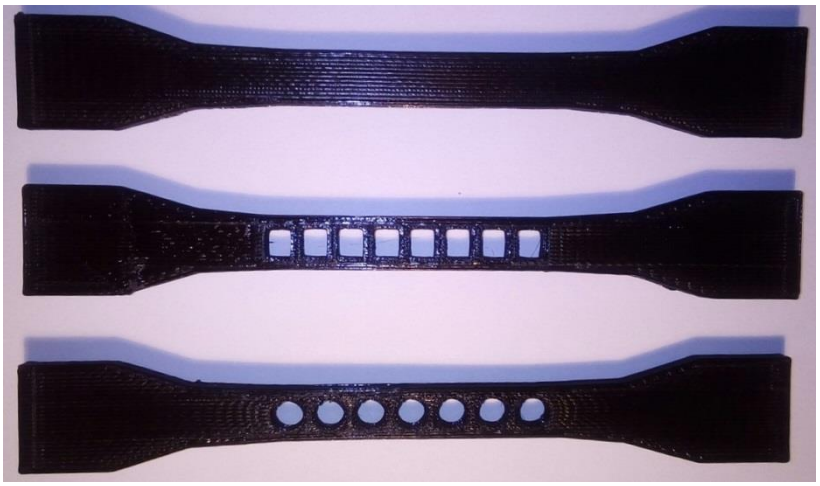


Рисунок 1. Изготовленные образцы.

Принтер PICASO 3D Designer PRO 250 позволяет изготавливать изделия с разной скоростью заливки. При большой скорости заливки *V* (30 мм/с) не происходит равномерного спекания материала, что видно по характеру разрушения при испытаниях на разрывной машине (рисунок 2).

При скорости заливки полимера *V*=15 мм/с образец, изготовленный на принтере PICASO 3D Designer PRO 250, спекся сплошно и равномерно, что было выявлено соответствующим характером разрушения.

На образцах, изготовленных на принтере MakerBot Replicator Z18, особенность влияния скорости заливки на равномерность спекания материала не наблюдалась.

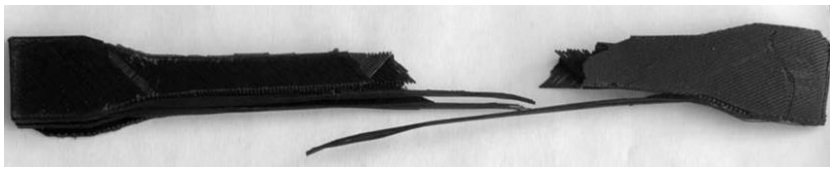


Рисунок 2. Образец после испытаний, *V*=30 мм/с

Испытание образцов с отверстиями в них разной формы и образцов сплошного сечения (рисунок 1) показало, что разрушение образцов происходит предсказуемым образом – быстрее разрушаются образцы с перфорацией. При этом на характер разрушения образцов форма отверстия в них не влияет. Разрыв всех образцов происходил в диапазоне 31 – 47 кгс. Удлинение образцов до разрушения находилось в пределах от 4,5 до 9,0 мм.

Разработанный подход позволяет испытывать механические свойства образцов, изготовленных из термопластичного полиэфира. Для дальнейших исследований целесообразно изготовить образцы с разным процентом заполнения ячеек и провести их механические испытания.

Список используемых источников

1. Макарчук, М.В. Исследование механических свойств материалов, используемых для изготовления изделий в промышленном дизайне / М.В. Макарчук, Е.М. Преображенская // В книге: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2019. С. 184-185.

2. Макарчук, М.В. Повышение прочностных характеристик ячеистой структуры в образцах из термопластичного полиэфира / М.В. Макарчук, Е.М. Преображенская // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор: У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2019. С. 186-187.

# СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОКСИДНОГО КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК*

**Неверова М.А., Бесперстова Г.С., Буракова Е.А.**
***ФГБОУ ВО «ТГТУ», elenburakova@yandex.ru***

Для синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) методом газофазного химического осаждения необходим катализатор - вещество, на активных центрах которого происходит формирование и рост наноструктур. Существуют разные методы получения катализаторов [1]: золь-гель, осаждения, пропитки, но наиболее простым является метод термического разложения солей. Обычно в состав катализатора входят активный компонент из группы железа (Fe, Co, Ni и др.) [2] и носитель (MgO, CaO, $Al_2O_3$, $TiO_2$). В качестве хелатообразующего агента, обеспечивающего равномерное распределение компонентов каталитической системы, могут использоваться лимонная или аминоуксусная кислоты. Иногда для повышения активности катализатора прибегают к использованию промоторов (W, V, Mo, Y и др.).

К настоящему моменту разработано огромное количество составов катализатора синтеза углеродных наноструктур и методик их получения, но, несмотря на это, данное направление по-прежнему актуально, так как позволяет получать новые знания о механизмах формирования катализаторов.

В данной работе исследован способ получения Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора методом термического разложения. В качестве предшественников катализатора использовали соответствующие нитраты. При взаимодействии носителя ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$), активного компонента ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) и промотора ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) происходит образование сложных оксидов типа $Me_xMe_yO_z$, восстанавливающихся при температуре выше 500 $^oC$. [3] Известно, что формирование металлоксидных каталитических систем при высокой температуре приводит к получению грубых частиц с невысокой удельной поверхностью. Поэтому термообработку предпочитают реализовывать при сравнительно невысоких температурах, позволяющих образовывать высокодисперсные частицы оксидов металлов. Стадия термообработки играет особую роль в процессе получения катализатора, так как именно на ней происходит формирование активных центров, но работ, посвященных изучению влияния условий термообработки на активность катализатора, недостаточно [4].

Процесс получения Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора синтеза УНТ заключался в приготовлении раствора исходных компонентов и его термообработке при более низких температурах, чем обычно, а именно при 350 $^oC$.

Продолжительность термообработки раствора предшественников катализатора варьировали в диапазоне от 15÷60 минут.

Полученные при таких условиях образцы Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора имели удельную поверхность ~5÷26 $м^2/г$. Наибольшей удельной поверхностью обладал катализатор, полученный в результате термообработки в течение 30 минут при 350 $^oC$. Морфология полученного Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора представлена на рис.1.

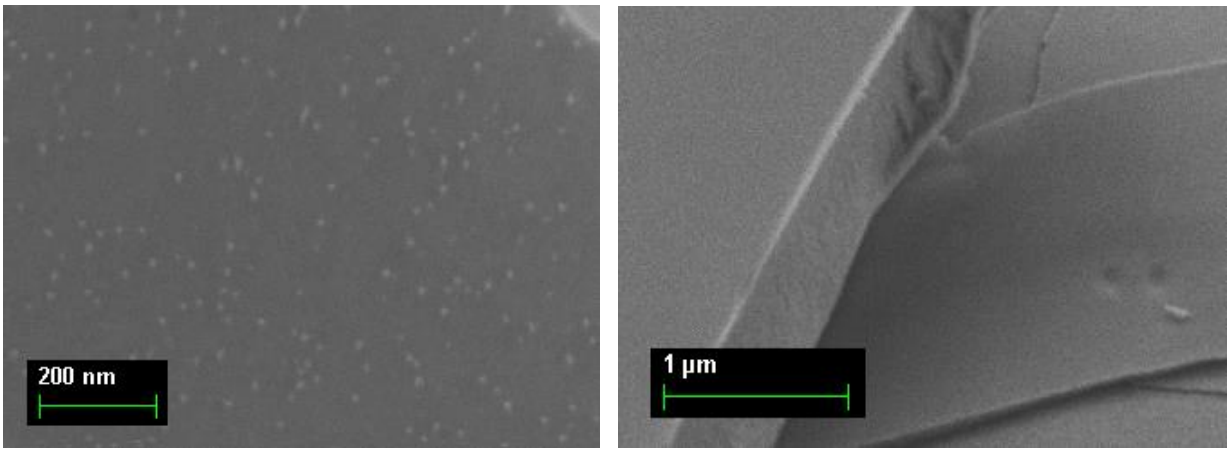



Рисунок 1. Морфология Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора, полученного в результате термообработки в течение 30 минут.

В качестве основного параметра, характеризующего эффективность полученного катализатора, был выбран удельный выход УНТ ($г_{угл}/г_{кат}$). Для оценки эффективности образцов Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора, полученных в результате низкотемпературной обработки раствора исходных компонентов, использовали лабораторный реактор периодического действия. Процесс синтеза УНТ осуществляли в течение 30 мин при температуре 650 °C, в качестве углеродсодержащего газа применяли этилен (ГОСТ 25070-2013). Полученные результаты представлены в табл.1

Таблица 1.

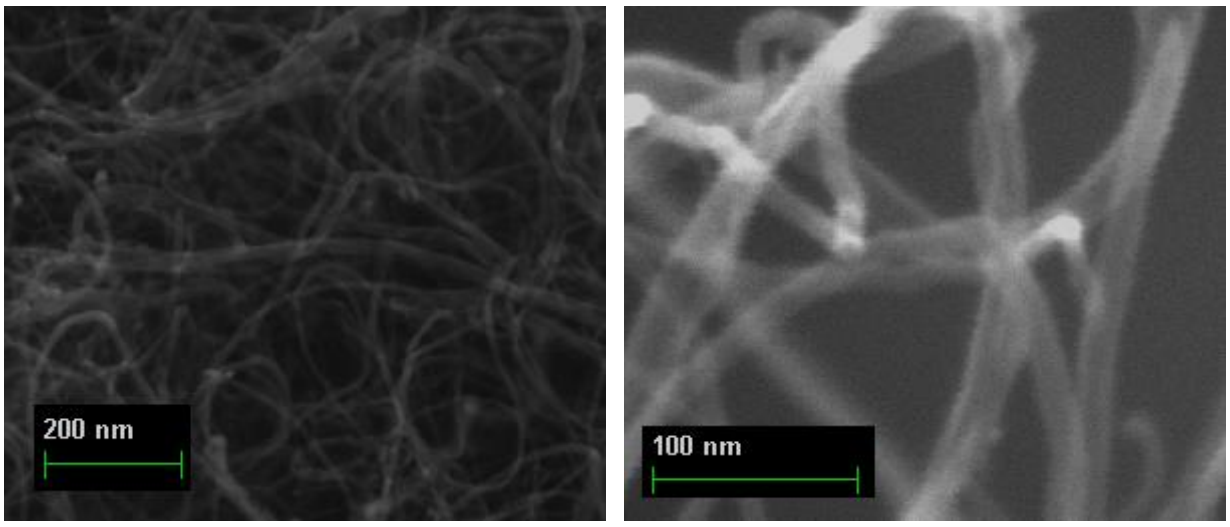
Эффективность Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатора.

| **№ образца** | **Продолжительность термообработки, мин** | **Среднее значение уд. выхода УНТ, $г_{угл}/г_{кат}$** |
|---|---|---|
| 1 | 10 | - |
| 2 | 15 | 1,64 |
| 3 | 25 | 2,46 |
| 4 | 30 | 9,35 |
| 5 | 60 | 3,02 |

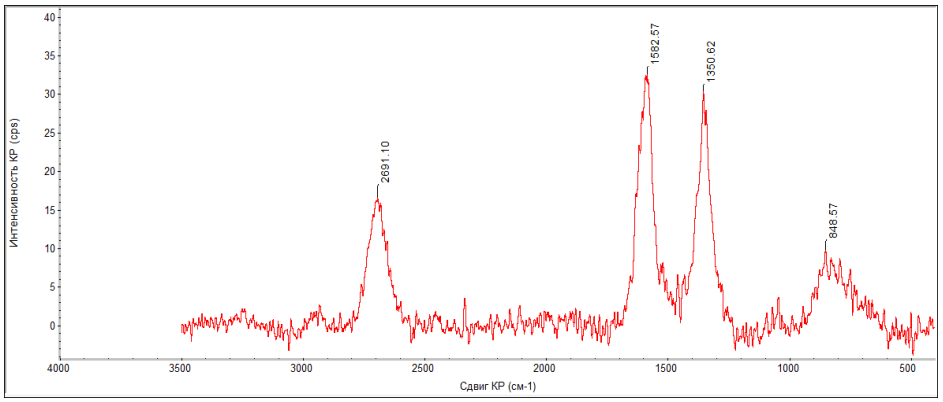
Анализ полученных результатов показал, что наиболее эффективный Co-Mo/$Al_2O_3$ катализатор формируется в результате термообработки раствора исходных компонентов катализатора (предшественников) в течение 30 минут

при 350 °С. Использование данного катализатора в процессе синтеза УНТ позволяет получать наноструктуры диаметром 10÷30 нм со степенью дефектности 0,882. Степень дефектности (D/G) синтезированных УНТ оценивали с помощью рамановской спектроскопии.

Морфология и рамановские спектры синтезированных УНТ представлены на рис.2(а) и 2(б) соответственно.




а




б

Рисунок 2. Морфология (а) и рамановские спектры УНТ (б), синтезированных на Co-Mo/$Al_2O_3$ катализаторе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что катализаторы, полученные в результате низкотемпературной термообработки (350 °С), также способны формировать в процессе синтеза углеродные нанотрубки.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-43-680005.*

Список используемых источников

1. Хаврусь В.А., Лемеш Н.В., Гордейчук С.В., Трипольский А.И., Иващенко А.И., Стрижак П.Е. Синтез многостенных углеродных нанотрубок путем пиролиза этилена на наночастицах металлов (Ni, Co, Fe) // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2008. 6(3). – С.919-929.

2. Hoyos-Palacio L.M., García A.G., Pérez-Robles J.F., González J. and Martínez-Tejada H.V. Catalytic effect of Fe, Ni, Co and Mo on the CNTs production. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 59(1). 2014.

3. Кунгурова О.А. Приготовление и физико-химические свойства кобальт-алюминиевых катализаторов синтеза Фишера-Тропша с добавками фосфат-анионов и оксида циркония или рутения: дисс. на соискание уч. степени к.х.н.: 02.00.04; 02.00.01/ Кунгурова Ольга Анатольевна. – Томск. 2017.

4. Siang-PiaoChai, Sh. Hussein Sh. Zein, A.R. Mohamed. The effect of catalyst calcination temperature on the diameter of carbon nanotubes synthesized by the decomposition of methane. Carbon. Vol. 45(7). 2007. P.1535-1541. DOI: 10.1016/j.carbon.2007.03.020.

# СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК МОЛИБДАТА НЕОДИМА $Nd_5Mo_3O_{16+\delta}$

**Аврамова А.Ю., Чебышев К.А.**
***Донецкий национальный университет, Донецк, Украина,***
***chebyshev.konst@mail.ru***

Молибдаты редкоземельных элементов находят применение как люминофоры, ионные проводники, катализаторы и др. Получение функциональных материалов требует не только определенного элементного и фазового состава, но и соответствующей морфологии прекурсоров и готовых материалов. В настоящее время актуальным является получение наноразмерных частиц для улучшения свойств веществ.

Кубические флюоритоподобные молибдаты редкоземельных элементов состава $Ln_5Mo_3O_{16+\delta}$ кристаллизуются в пространственной группе Pn-3n и имеют переменное содержание кислорода в зависимости от состава и условий синтеза. Возможность изменения степени окисления молибдена и некоторых РЗЭ (Pr, Ce, Tb) могут обеспечить как каталитические, так и бактерицидные свойства данных соединений.

Для синтеза золя били использованы оксиды неодима и молибдена. Перед взвешиванием оксид неодима был прокален при 900°С, оксид молибдена – при 500°С в течение двух часов. Оксид неодима был растворен в небольшом избытке азотной кислоты, оксид молибдена в холодном концентрированным растворе аммиака. К растворам неодима и молибдена была добавлена лимонная кислота в мольном соотношении 2:1 по отношению к содержанию металлов. Растворы были слиты вместе, величина pH лежала в диапазоне 3-4. К полученным растворам при нагревании и перемешивании добавлялся этиленгликоль. Растворы упаривались и

выдерживались в течение суток для полимеризации и образования прозрачного вязкого геля. Гель высушивался при ≈100°С и помещался на фарфоровой чашке в разогретый до 500°С муфель. Гель быстро разлагался с выделением большого количества газов и многократным увеличением объема.

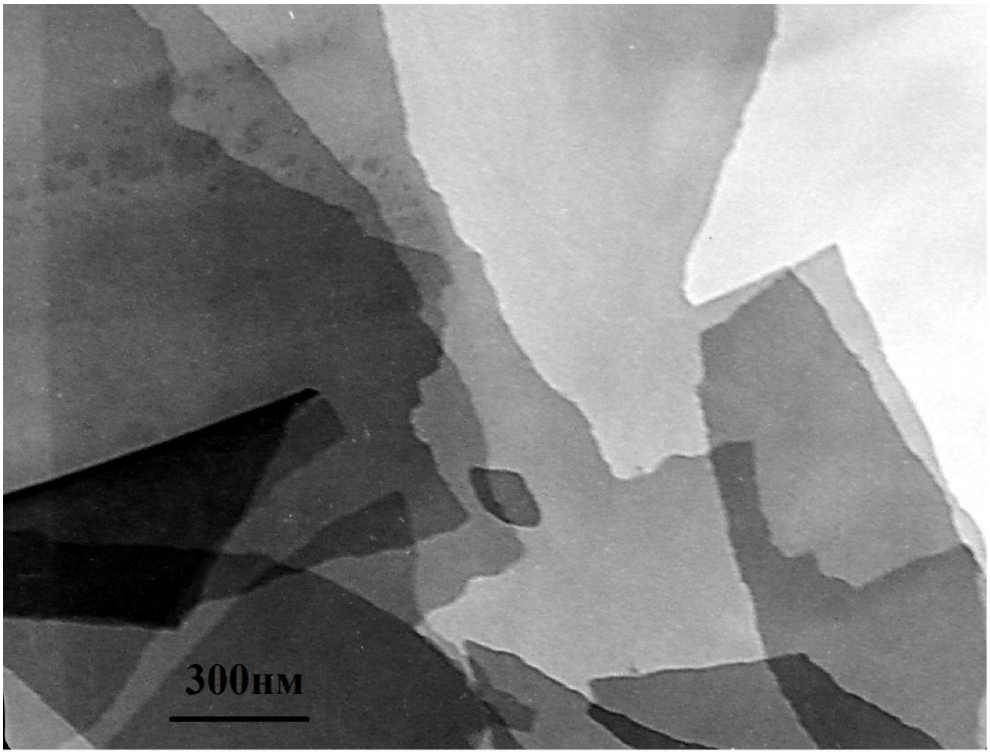



Рисунок 1. Изображение нанослоев молибдата неодима.

Полученный наноразмерный молибдат неодима был исследован методами термогравиметрического анализа, просвечивающей и сканирующей микроскопии, ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа.

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1) в данных условиях синтеза был получен наноразмерный молибдат неодима. Частицы представляют собой нанопластины шириной несколько микрон. Толщина слоя составляет примерно 1-3 нм. На дифрактограммах образцов наблюдается значительное уширение рефлексов, что подтверждает наноразмерность частиц. Методом рентгеноспектрального микроанализа был подтвержден элементный состав и равномерное распределение элементов по образцу.

# СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТОЙ

**Пасько А.А.[1], Кондаков А.И.[1], Чапаксов Н.А.[1], Дьячкова Т.П.[1], Мележик А.В.[1], Смирнова А.И.[2], Усольцева Н.В.[2]**

***[1]-ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, paskonastya2013@gmail.com***

***[2]-ФГБОУ ВО Ивановский государственный университет, г. Иваново***

Одной из областей применения применения углеродных нанотрубок (УНТ) являются гидрофобные покрытия. Смачиваемость поверхности твердого тела зависит от его химического состава и геометрической структуры его приповерхностного слоя. В некоторых источниках сообщается, что УНТ как материалы с высокой удельной поверхностью подходят для формирования неровной микроструктуры, обеспечивая так называемый «эффект лотоса» и значения краевого угла смачивания выше 150° [1-2]. Одним из способов увеличения гидрофобизирующих свойств углеродных наноматериалов является их предварительная функционализация [1, 3].

Целью настоящей работы явилось исследование изменения параметров многослойных углеродных нанотрубок «Таунит-М» (производства ООО «Нанотехцентр», г. Тамбов, Россия) при модифицировании стеариновой кислотой, а также изучение свойств гидрофобных электропроводящих покрытий полученных с использованием функционализированных данным способом УНТ.

В ходе проведения эксперимента определены условия подготовки УНТ к модифицированию стеариновой кислотой, а также температура, состав реагентов, продолжительность процесса и температура, обеспечивающие формирование на их поверхности качественного слоя $C_{17}H_{35}COOH$ (планируется подача заявки на патент).

Содержание модифицирующего реагента на поверхности УНТ можно определить по данным термогравиметрии (рис. 1). На ТГ-кривой отмечается снижение массы материала (2-10 масс.% в зависимости от условий получения образца) в температурном интервале 300-400°С, при котором на ДСК-кривой присутствует пик, отвечающий за деструкцию стеариновой кислоты.

По данным рамановской спектроскопии (рис. 2), в результате функционализации стеариновой кислотой наблюдается усиление интенсивности пика D, характеризующего наличие углерода в $sp^3$-состоянии, который содержится в алкильных группах стеариновой кислоты.

Для приготовления композитных покрытий УНТ диспергировали в *н*-гексане в ультразвуковой ванне. Полученную суспензию вводили в силиконовую матрицу. Подготовленные смеси наносили на поверхность подложки (пленка ПЭТ) при помощи распылителя. При каждом нанесении количество УНТ на единицу площади носителя оставалось одинаковым, тогда как количество полимерной матрицы варьировалось в зависимости от желаемой концентрации УНТ в образце. Полученные образцы сушили в сушильном шкафу при 60 ° С до постоянного веса.

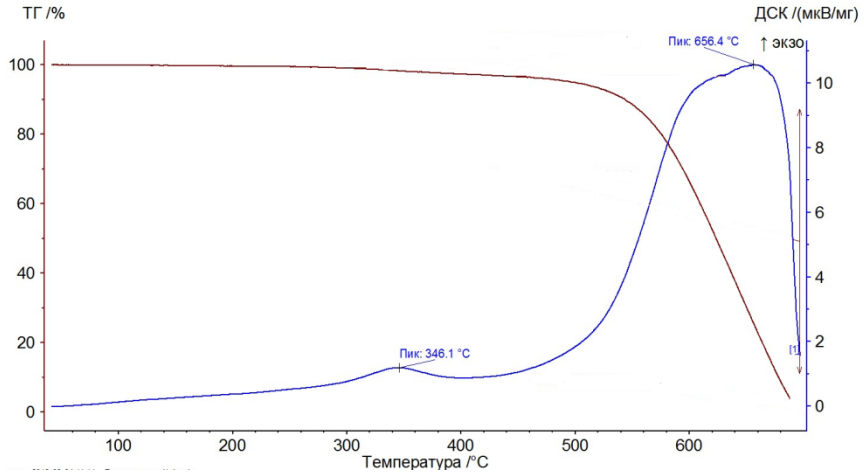



Рисунок 1. ТГ/ДСК-кривые УНТ «Таунит-М», модифицированных стеариновой кислотой.

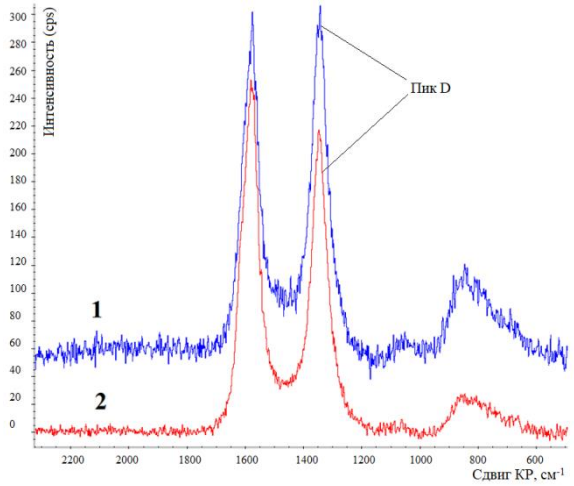



Рисунок 2. Рамановские спектры модифицированных стеариновой кислотой (1) и исходных (2) УНТ «Таунит-М».

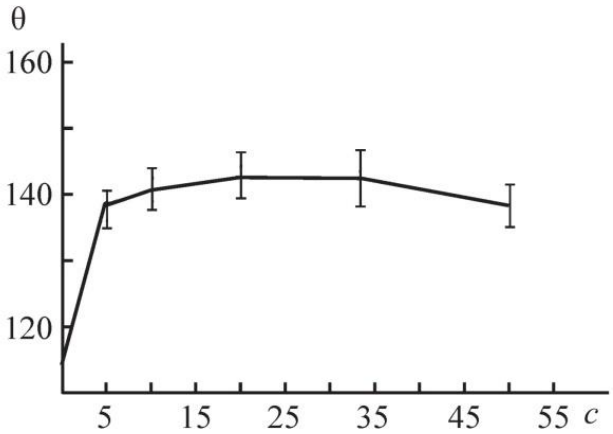



Рисунок 3.1 Зависимость краевого угла смачивания θ (град.) нанокомпозитных силиконовых покрытий от содержания *c* (масс. %) функционализированных стеариновой кислотой УНТ «Таунит-М».

Электропроводность образцов измеряли методом Ван-дер-Пау. Результаты приведены в таблице 1. Как видно, сопротивление композитных пленок изменяется в интервале 11,75–22,88 Ом×мм$^2$/м в зависимости от содержания функционализированных стеариновой кислотой УНТ.

Таблица 1.

Поверхностное электрическое сопротивление образцов покрытий, содержащих функционализированные стеариновой кислотой УНТ «Таунит-М».

| Содержание УНТ, мас% | Поверхностное сопротивление, Ом×мм$^2$/м |
|---|---|
| 5 | 22,88 ±4,06 |
| 10 | 12,05 ±0,22 |
| 20 | 17,52 ±0,18 |
| 33,3 | 11,75 ±0,34 |
| 50 | 22,70 ± 0,20 |

Для определения гидрофобных свойств полученных нанокомпозитных покрытий были измерены краевые углы контакта с водой (θ). Результаты показаны на рис. 3**Рисунок 3.1**. Как видно, для образцов с 5 масс.% функционализированных УНТ угол смачивания водой составляет около 138° по сравнению со 113,5° для исходной силиконовой матрицы. Дальнейшее увеличение соотношения УНТ/силиконовая матрица не приводит к значительным изменениям θ.

Были определены также углы скатывания капель воды с данных покрытий (таблица 2).

Таблица 2.

Значение углов скатывания капель воды с образцов.

| Содержание УНТ, мас% | Угол скатывания, град |
|---|---|
| 0 | не скатывается |
| 5 | не скатывается |
| 10 | 14,3±6,3 |
| 20 | <1 |
| 33,3 | <1 |
| 50 | <1 |

Для образцов, содержащих с 5 масс.% функционализированных стеариновой кислотой УНТ и для исходного образца силиконовой матрицы угол скольжения составляет более 90°, т.е. есть капли воды не скатываются с образцов. Для образцов с 10 масс.% УНТ угол скольжения составлял 14,3°. С покрытий, содержащих 20 и более масс.% УНТ, капли воды стекали под минимальными углами наклона.

Таким образом, на основе представленных результатов можно сделать вывод о целесообразности применения модифицированных стеариновой кислотой УНТ «Таунит-М» в составе полимерных покрытий, обладающих достаточно высокой электропроводностью и гидрофобными свойствами.

Список используемых источников

1. Yang, H.J. Efficient oxidation and rational reduction of long carbon nanotubes for multifunctional superhydrophobic surfaces / H.J. Yang, J.Y. Cho, J.H. Kim, H.Y. Kim et al. // Carbon. – 2019. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.11.006.

2. Yan, K.-K. Superhydrophobic electrospun nanofiber membrane ci=oated by carbon nanotubes network for membrane distillation / K.-K. Yan, L. Jiao, S. Lin, X. Ji, Y. Lu, L. Zhang // Desalination. – 2018. – Vol. 437. – P. 26-33.

3. Yang, Y. Reversible conversion of water-droplet mobility from rollable to pinned on a supherhydrophobic functionalized carbon nanotube film / J. Yang, Z. Zhang, X. Men, X. Xu, X. Zhu // Journal of Colloid and Interface Science. – 2010. – V. 346. – P. 241-247.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-19150 мк).*

# ЭКРАНИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СИЛИКОНОВЫЕ ПОКРЫТИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

**Чапаксов Н.А.[1], Столяров Р.А.[1], Дьячкова Т.П.[1], Матвеенцев А.В.[2]**
*[1]-Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, tchapaxov.nikolaj@yandex.ru*
*[2]-ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург*

Интерес к материалам, обладающих способностью к экранированию электромагнитного излучения (ЭИ), возрастает с каждым годом. Для придания таких свойств полимерным композитам широко применяются углеродные нанотрубки (УНТ). Они эффективно поглощают электромагнитное излучение. При этом применение многостенных УНТ так же эффективно, как и одностенных, при этом значительно более экономично. Среди полимерных матриц особое место занимают силиконы, ввиду их высокой химической стойкости и механической прочности, а также простоте формования покрытий.

В связи с чем, целью данной работы является получение композитов на основе силикона модифицированного многостенными углеродными нанотрубками для эффективного экранирования электромагнитного излучения.

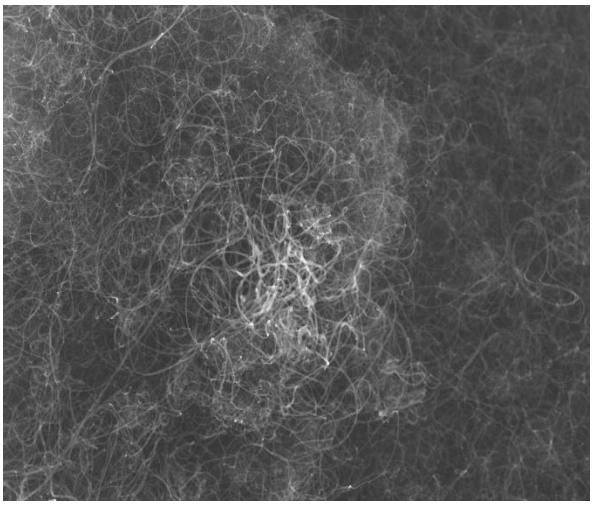


Рисунок 1. СЭМ-изображение УНТ «Таунит-М».

В качестве полимерной основы в работе использовалась силиконовая смесь холодной вулканизации марки Elastomould 115 фирмы «BMP Technology» Co. Ltd. (Moscow). Модификатором служили многостенные УНТ «Таунит-М» (производства ООО «Нанотехцентр», Тамбов) диаметром от 10 до 30 нм и длиной более 2 мкм. Их концентрации в изготовленных образцах композитов указаны в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики изготовленных материалов

| № образца | Концентрация УНТ, масс.% | Размер, мм | Толщина, мм |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 200x200 | 1,2 |
| 2 | 5 | | 1,9 |
| 3 | 10 | | 1,3 |

После внесения УНТ, смесь перемешивалась на механической мешалке (Witeg HT-50AX) в течение 10 мин. Далее полученный материал равномерно наносился на полиэтиленовую подложку и выдерживается при комнатной температуре до полного отверждения.

Измерения электромагнитных характеристик образцов проводились при помощи векторного анализатора электрических цепей ZVA67 фирмы Rohde&Schwarz в ближней зоне сверхширокополосных диафрагмированных линзовых рупорных антенн в диапазоне длин волн от 3 до 40 ГГц: в низкочастотном диапазоне длин волн от 3 до 24 ГГц, и в высокочастотном диапазоне длин волн от 23 до 40 ГГц. Настоящий метод измерений основан на измерении коэффициентов отражения квазиплоской электромагнитной волны при нормальном угле падения для образцов материалов в виде плоских листов.

Потери мощности электромагнитного излучения при прохождении через материал возникают в результате следующих явлений: отражения (и/или многократных отражений) и поглощения [1]. Коэффициент поглощения $A$, коэффициент отражения $R$ и коэффициент прохождения $T$ связаны соотношением:

$$A = 1 - R^2 - T^2, \tag{1}$$

Сумма всех потерь ЭИ называется эффективностью экранирования ($SE$). Она измеряется в единицах дБ и определяется с помощью следующих выражений:

$$SE_{TOTAL}(\partial Б) = SE_A + SE_R, \tag{2}$$

$$SE_{TOTAL}(\partial Б) = 10\log_{10}\left(1/T^2\right), \tag{3}$$

$$SE_R(\partial Б) = 10\log_{10}\left(1-R^2\right), \tag{4}$$

$$SE_A(\partial Б) = 10\log_{10}\left(T^2/\left(1-R^2\right)\right), \tag{5}$$

где $SE_A$ – эффективность экранирования, связанная с поглощением ЭИ, $SE_R$ – эффективность экранирования, связанная с отражением ЭИ [11].

На рисунке 2 изображены частотные зависимости радиофизических параметров. Увеличение концентрации МУНТ незначительно влияет на величину коэффициента отражения и повышает величину эффективности экранирования материала. Причем значение величины эффективности экранирования при введении в полимерную матрицу МУНТ в концентрациях, превышающих 2 масс.%, значительно возрастает (таблица 2).

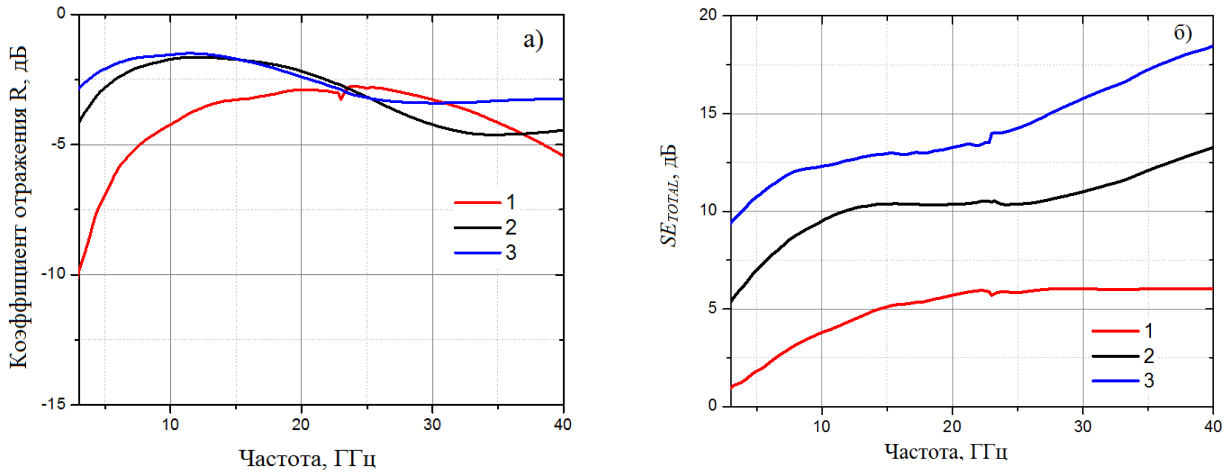



Рисунок 2. Частотные зависимости параметров материалов, номера образов соответствуют табл. 1: а) Коэффициент отражения R, б) Общая эффективность экранирования $SE_{TOTAL}$.

Для определения удельных параметров экранирования $SE_{TOTAL}$ – ослабление излучения (в дБ) материалом толщиной 1 мм, производили пересчет коэффициентов отражения и прохождения для толщины слоя 1 мм

В таблице 2 приведены значения радиофизических параметров материалов, полученных в данной работе.

Таблица 2.

Радиофизические параметры покрытий

| № образца | Частота, ГГц | $SE_{TOTAL}$, (дБ) | $SE_A$, (дБ) | $SE_R$, (дБ) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 8-12 | 3,77 | 1,71 | 2,06 |
| 2 | | 9,74 | 4,69 | 4,78 |
| 3 | | 12,31 | 7,1 | 5,21 |

Наибольшей величиной эффективности экранирования 12,3 дБ обладает образец материала № 3, содержащий – 10 масс.% МУНТ.

Таким образом, изготовленные покрытия демонстрируют высокую эффективность экранирования ЭИ. Однако, поскольку внести более 10 масс.% не удается, дальнейшее увеличение показателей экранирования возможно за счет изготовления покрытий большей толщины.

Список используемых источников

1. Kolanowska, A. From blackness to invisibility - Carbon nanotubes role in the attenuation of and shielding from radio waves for stealth technology / A. Kolanowska, D. Janas, A.P. Herman, R.G. Jedrysiak, T. Gizewski, S. Boncel // Carbon. – 2018. – Vol. 126. – P. 31-52.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО СИЛИКОНА С ЭФФЕКТОМ САМОРЕГУЛИРУЕМОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

**Ягубов В.С., Щегольков А.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,***
***vitya-y@mail.ru*.**

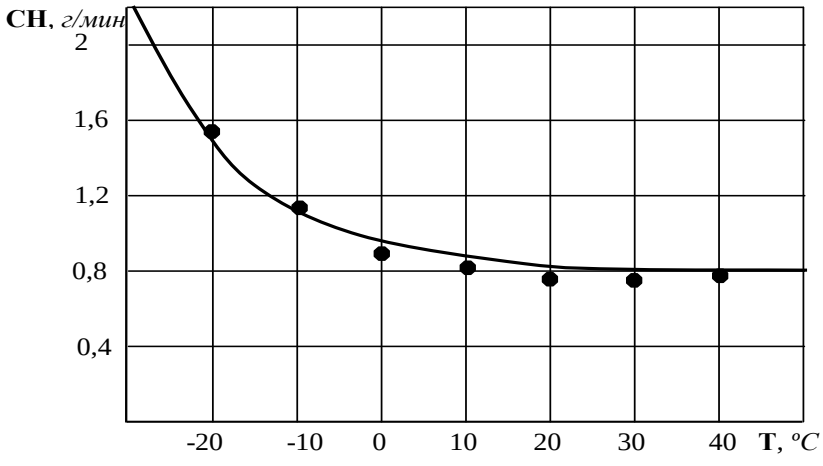
Функциональные свойства углеродных нананоматериалов активно изучаются в контексте их применения в качестве модификаторов полимеров. Применение в качестве дисперсного наполнителя углеродных наноматериалов позволяет создавать новые наномодифицированные композиты, обладающие различными функциональными свойствами по сравнению с исходным полимером.

Особый интерес для промышленности представляют собой исследования нагревательных элементов, изготовленных на основе наномодифицированных полимеров. К их преимуществам следует отнести, то, что они имеют малую толщину, намного легче аналогичных по мощности существующих нагревателей, в качестве модификаторов для которых использовались порошки металлов. Наноразмерные наполнители позволяют получать материалы, обладающие положительным температурным коэффициентом электрического сопротивления, что позволяет реализовывать саморегулируемые режимы электронагрева.

Представленные материалы для устройств электронагрева актуальны с учетом климатических условий на территории РФ в зимний период времени, так как имеются проблемы с запуском двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Стоит учитывать, что ДВС при отрицательных температурах работают с повышенной концентрацией токсичных составляющих в выхлопных газах (рис.1) по сравнению с выбросами при запуске прогретого, до рабочей температуры, ДВС [1].

Это является глобальной экологической проблемой, которую решают разными способами. Одним из них являются специальные устройства предпускового подогрева рабочих жидкостей ДВС [2-4].

Для исследований изготавливали наномодифицированные композиты, содержащие углеродный наноматериал - Таунит-М (ТМ) (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия). Для приготовления 15 г. эластомерного композита, содержащего 1 масс.% ТМ в лабораторный стакан емкостью 50 мл добавляли 0,15 г. ТМ. К навеске ТМ добавляли 7,425 г. основы силиконового компаунда и перемешивали с помощью механической мешалки «HT-120 DX» (DAIHAN Scientific, Южная Корея). К полученной смеси ТМ с основой добавляли 7,425 г. отвердителя и снова перемешивали.



10,

Рисунок 1. Зависимость содержания СН в выхлопных газах от температуры топлива.

Для исследований изготавливали наномодифицированные композиты, содержащие углеродный наноматериал - Таунит-М (ТМ) (ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия). Для приготовления 15 г. эластомерного композита, содержащего 1 масс.% ТМ в лабораторный стакан емкостью 50 мл добавляли 0,15 г. ТМ. К навеске ТМ добавляли 7,425 г. основы силиконового компаунда и перемешивали с помощью механической мешалки «HT-120 DX» (DAIHAN Scientific, Южная Корея). К полученной смеси ТМ с основой добавляли 7,425 г. отвердителя и снова перемешивали.

Для удаления воздуха наномодифицированный композит помещали в вакуумный термошкаф «UT-4686V» (ULAB, Китай) на 15 мин. при температуре 25 °С и значении давления -0.1 МПа. После чего композит формовали для получения лабораторного образца нагревателя. По данной технологии были приготовлены композиты, модифицированные ТМ.

Электрофизические параметры исследовали с помощью автоматизированного измерительного стенда, представленного на рисунке 2. В качестве двух мультиметров АКТАКОМ 1199 и WH 5000, подключенных к персональному компьютеру получили зависимость (рис.2) электрического тока от времени.

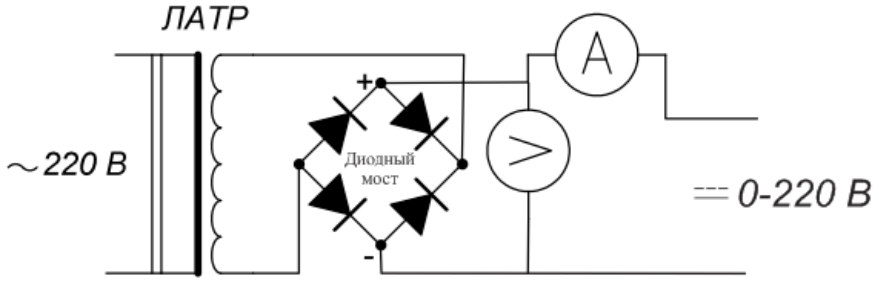



Рисунок 2.Схема автоматизированного измерительного стенда.

При разных значениях электрического напряжения, питающего нагреватель, наблюдалась стабилизация потребляемого тока (рис.3) и температуры.

Полученные данные указывают на то, что наномодифицированный композит на основе силиконового компаунда обладает эффектом саморегулирования тепловыделения с постоянной температурой в установившемся режиме.

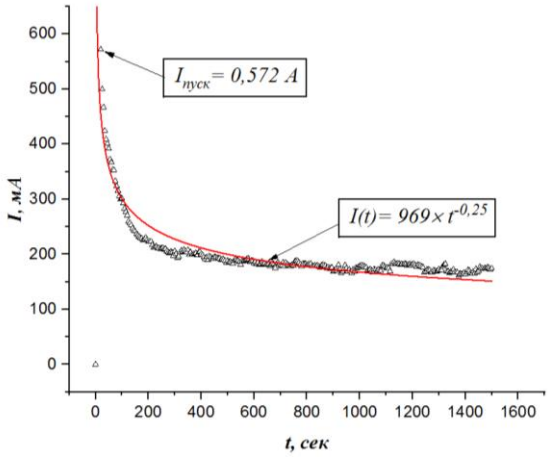



Рисунок 2. Зависимость потребляемого нагревателем тока от времени работы.

Силиконовые композиты, модифицированные ТМ, могут быть применены в качестве новых материалов для изготовления нагревателей с эффектом саморегулирования для ДВС, что способствует повышению экологической безопасности при эксплуатации автотранспортных средств в зимний период времени.

Список используемых источников

1. Вольнов А.С. и Третьяк Л.Н. О системном подходе к оценке влияния авто-транспортных средств в процессе эксплуатации на экологию городов // ВЕСТНИК ОГУ. 2014. №1: С. 161-166.

2. Щегольков А.В. Электро и теплофизические характеристики электрического теплоаккумулирующего нагревателя/ Щегольков А.В., Юдин А.С.// Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 3. С. 527-531.

3. Щегольков А.В. Влияние графеноподобных структур на эффект саморегулирования температуры в электропроводящем полимерном материале / А.В. Щегольков, Н.В Парамонова, А.В. Хробак, А.В. Щегольков, А.Г. Ткачев // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. Сильно коррелированные двумерные системы: от теории к практике. 2018. С. 615.

4. Щегольков А.В. ИК нагреватель на основе фторопласта, модифицированного углеродными нанотрубками/ Щегольков А.В., Щегольков А.В., Парамонова Н.В., Иконников В.С.// В сборнике: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции. 2017. С. 216-217.

# ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ГАБИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ ТРЕБОВАНИЯМ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ

**Борисова Н.В.[1], Устинова Т.П.[1], Нурмаш Н.К.[2]**
***Энгельсский технологический институт (филиал)***
***[1]-ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Энгельс***
***[2]-Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир Хана, г.Уральск, Казахстан***

Оценка соответствия в системе технического регулирования представляет собой сложный взаимоувязанный и взаимодополняющий конгломерат форм, схем, методов и инструментов, призванных доказать, что объект технического регулирования [1], в данной статье это геосинтетические материалы, соответствуют установленным требованиям, указанных в государственных стандартах.

Повышенный интерес геосинтетические материалы вызывают благодаря высокому технико-экономическому эффекту, который получается от использования в строительстве промышленных и инфраструктурных объектов, в строительстве дорожных одежд. Наибольшую популярность в настоящее время начинают набирать габионные конструкции.

Габион – это каркас из металлической сетки с ячейками в виде шестиугольника, которая может быть заполнена бутом, щебнем, галькой и др.

Габионные конструкции бывают двух типов: из габионной сетки двойного кручения с шестиугольными ячейкам и из сварной сетки с прямоугольными ячейками (рис.1) [2].

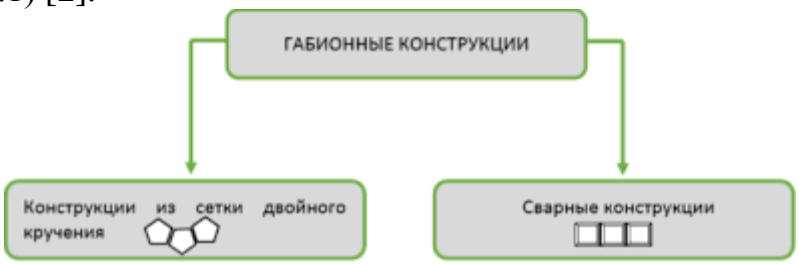



Рисунок.1. Виды габионых конструкций

Готовые коробчатые габионы – это надежные монолитные сооружения, с годами они становятся только прочнее: частицы почвы заполняют пустоты, корни прорастающих трав дополнительно скрепляют наполнитель. Сетчатый каркас гибок, нагрузки распределяются равномерно, даже легкий коробчатый габион 3х1х1 выдерживает сильнейшие нагрузки. Для защиты от коррозии проволока сетки габионов имеет цинковое покрытие. В агрессивных средах габион должен иметь дополнительное полимерное покрытие, которое изготавливают из ПЭНД. Известно, что ПЭНД в недостаточной мере обладают устойчивостью и долговечностью, а также приемлемыми механическими свойствами. В частности, при жестких условиях окружающей среды, особенно УФ-облучении, длительности и величины нагрузки снижение механических свойств ПЭНД не позволяет решить поставленные задачи.

В целях реализации в дорожном строительстве основных положений Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ "О техническом регулировании" был разработан целый перечень нормативной технической документации по проектированию и строительству габионных конструкций. К числу таких документов следует отнести государственные национальные стандарты, разработанные на основе европейских стандартов [3-5].

Целью данной работы являлось проведение оценки соответствия промышленных образцов габионных конструкций, которые представляли собой габионы коробчатые – объемные строительные конструкции из стальной сетки двойного кручения. Защиту от коррозии обеспечивает полимерное покрытие из ПЭНД со светостабилизатором 2,2,6,6-тетраметилпиперидин и без него.

Оценку соответствия образцов габионных конструкций, покрытых оболочкой из ПЭНД со светостабилизатором и без него проводили согласно ГОСТ 58074 оценивались основные характеристики, предъявляемые к габионной проволоке с покрытием из полиэтилена такие как, внешний вид, толщина полимерного покрытия, концентричность и прочность сцепления (табл. 1).

В результате оценки соответствия все показатели исследуемых образцов соответствовали требованиям стандарта.

Также весьма важны усталостные свойства как всей габионной конструкции, так и полимерной оболочки, которая должна выдерживать воздействие длительной нагрузки в присутствии УФ-облучения. Как известно, полиэтилен имеет низкую устойчивость к данному фактору. Поэтому были проведены испытания на УФ-устойчивость заводских образцов габионных конструкций, покрытых оболочкой из ПЭНД со светостабилизатором и без, которые проводили по изменению массы от времени воздействия (рис.2).

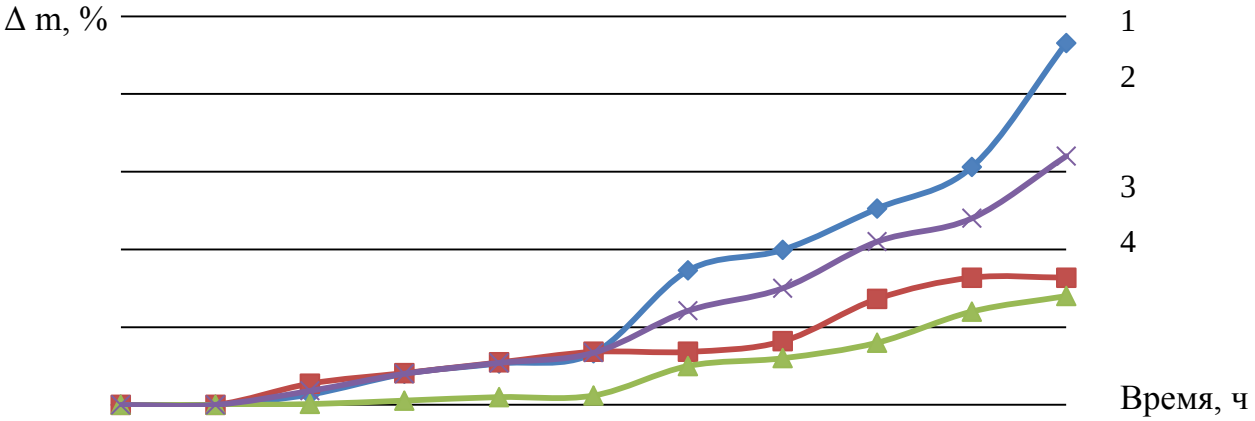



Рисунок 2. Изменение массы образцов габиона от времени воздействия УФ-излучения: 1,2 – ПЭНД без светостабилизатора; 3,4 – ПЭНД со светостабилизатором

Для оценки светостойкости композитов испытания проводились в устройстве для облучения (установке для УФ-облучения) при длине волны $\lambda \geq 300$ нм. При этом облучение образцов в течение 100 ч в установке для облучения эквивалентно приблизительно одному году экранирования их в природных условиях. Анализ светостойкости испытуемых образцов рис. 2. Было установлено, что по истечению 200 часов облучения образцов габиона со светостаблизатором потеряли массу в 3 раза меньше, чем без светостабилизатора, при этом были замечены повреждения и изменение цвета, заводских образцов. Очевидно, при

введении светостабилизатора происходит реорганизация структуры в сторону ее совершенствования.

Таблица 1.

Технические требования к габионной контрукциям с полимерным покрытием

| № п/п | Наименование показателя | Ед. изм. | Метод испытания (обозначение НД) | Обозначение образца | Результат | Норма |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Внешний вид | - | ГОСТ 58074-2018 по п. 6.2.1 | $ГБ_1$ | Поверхность покрытия гладкая, блестящая однородная по цвету | Должна быть гладкой, блестящей ровной и одинаковой по цвету |
| | | | | $ГБ_2$ | | |
| 2. | Толщина | мм | ГОСТ 58074-2018 по п. 6.2.4 | $ГБ_1$ | 1,0 | Не более 1 мм |
| | | | | $ГБ_2$ | 0,98 | |
| 3. | Концентрич-ность | % | ГОСТ 58074-2018 по п. 6.2.5 | $ГБ_1$ | 95,24 | Не менее 60 % |
| | | | | $ГБ_2$ | 91,18 | |
| 4. | Прочность сцепление | баллы | ГОСТ 58074-2018 по п. 6.2.7 | $ГБ_1$ | 3 | Не менее 2 балла |
| | | | | $ГБ_2$ | 2 | |
| 5. | Плотность | $г/см^3$ | ГОСТ 58074-2018 по п. 5.1.3 | $ГБ_1$ | 0,961 | 0,941-0,965 |
| | | | | $ГБ_2$ | 0,963 | |

Таким образом, исследованы показатели качества габионной конструкции, установлено, что все показатели исследуемых образцов соответствовали требованиям стандарта. Габионы с полимерным покрытием из ПЭНД и светостабилизатором отличаются высокой стойкостью к воздействию УФ-облучения.

Список используемых источников.

1. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь - Введ. 2015-11-01. – 63 с. – [Электронный ресурс]. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200124393. – <16.12.18.>.

2. ГОСТ Р 51285-99 Сетки проволочные крученые с шестиугольными ячейками для габионных конструкций. Технические условия (с Изменением N 1) – Введ. 2000-01-: – М.: Росстандарт России:– М.: Изд-во стандартов, 2019. – 15 с.

3. ГОСТ Р 58072-2018 (EN 10245-1:2011) Проволока стальная и изделия из нее. Покрытия органические. Общие правила [Текст]. – Введ. 2019-01-01: – М.: Росстандарт России:– М.: Изд-во стандартов, 2019. – 15 с.

4. ГОСТ Р 58073-2018 (EN 10245-2:2011) Проволока стальная и изделия из нее. Покрытия органические. Проволока с покрытием из поливинилхлорида – Введ. 2019-01-01: – М.: Росстандарт России:– М.: Изд-во стандартов, 2019. – 15 с.

5. ГОСТ Р 58074-2018 (EN 10245-3:2011) Проволока стальная и изделия из нее. Органические покрытия. Проволока с покрытием из полиэтилена – Введ. 2019-01-01: – М.: Росстандарт России:– М.: Изд-во стандартов, 2019. – 8 с.

# ФОРМИРОВАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ АТОМНО-СЛОЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ

**Климин В.С., Прокофьева В.В., Резван А.А.**
***Южный федеральный университет, г. Таганрог,***
***vprokofeva@sfedu.ru***

Наноразмерные автоэмиссионные структуры являются перспективными элементами, которые нашли широкое практическое применения в устройствах вакуумной микро- и наноэлектроники.

Для повышения стабильности и эффективности работы автоэмиссионных структур в настоящее время используется широкий спектр материалов, одним из перспективных материалов для катодов – это графен. Графен, помимо уникальных электрофизических свойств, имеет возможность интеграции в стандартные процессы микроэлектроники. В настоящее время существует достаточное количество технологий получения графена, однако для получения графена на поверхности одним из наиболее технологичных является метод деструкции кремния из карбида кремния. Данный метод позволяет повысить подвижность носителей заряда и устойчивость к ионизационному воздействию [1].

Метод термического разложения карбида кремния имеет ряд преимуществ для получения графеновых пленок: низкая стоимость, высокая однородность параметров пленок, высокая технологичность процесса. Однако, этот способ имеет существенный недостаток – необходимость отжига при высоких температурах, что может привести к образованию высоких механических напряжений в конструкции [2].

В данной работе были проведены экспериментальные исследования по использованию комбинации методов фокусированных ионных пучков и плазмохимического травления для получения пленок графена на SiC [3].

На начальном этапе, сфокусированным ионным пучком были сформированы структуры для последующего травления. Экспериментальные образцы, представляющие собой пластины из очищенного карбида кремния, помещали в вакуумную камеру модуля сфокусированных ионных пучков и ориентировали так, чтобы поток ускоренных ионов падал на подложку в направлении нормали. На этом этапе на поверхности SiC формировался массив в виде остроконечных катодов.

Затем с помощью атомно слоевого травления, были удалены верхние дефектные слои, для более качественного формирования слоя графена. Травление проходило во фтор кислородной плазме.

Углеродный наноразмерный слой был сформирован методом травления атомного слоя во фтористой плазме. Гексафторид серы использовался в качестве фторсодержащего газа, благодаря чему удалось травить приповерхностный слой SiC. В то же время из их кристаллической решетки

удалялся только Si и формировался тонкий углеродный слой на поверхности образцов.

В результате экспериментальных исследований были сформированы структуры с высотой 900 нм и минимальным размером структуры 280 нм. РЭМ-изображение этой структуры представлено на рис. 1.

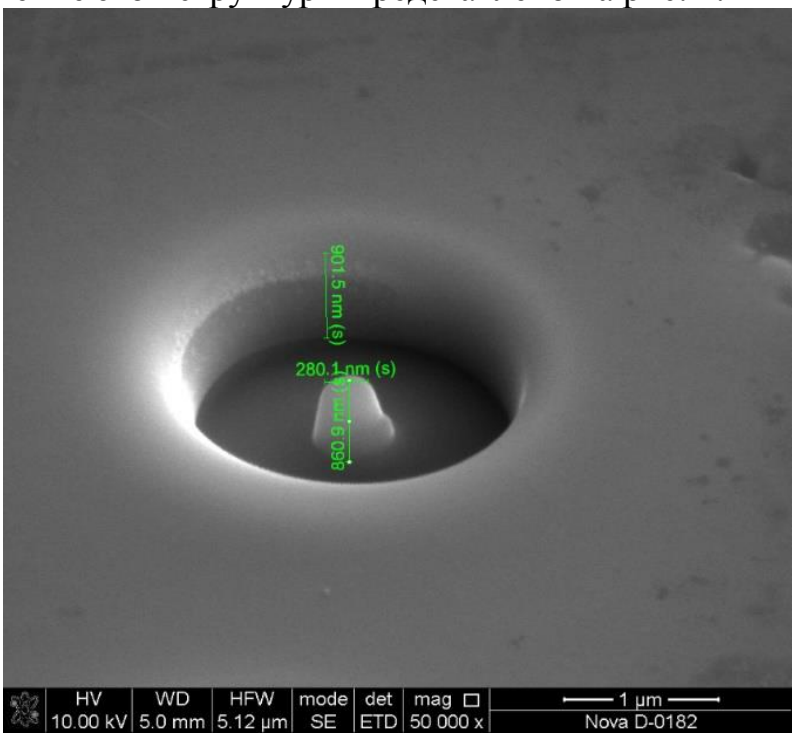



Рисунок 1. РЭМ - изображение полученной автоэмиссионной структуры на поверхности SiC.

Структуры, полученные в ходе экспериментов, исследовали с помощью зондового микроскопа. Было выявлено, что увеличение напряжения с 5 до 20 В приводит к увеличению тока с 0,15 ± 0,03 нА до 6,3 ± 0,4 нА, а увеличение электрического поля с 60 до 180 МВ/см приводит к увеличению плотности тока с 96,32. ± 8,81 А/см$^2$.

При исследовании характеристик эмиссионной ячейки было показано, что использование углеродных наноструктур в качестве активного элемента эмиссионной ячейки является перспективным. Эта технология может применяться для формирования современных вакуумных микроэлектронных устройств, а также для формирования датчиков давления и газа.

**Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МК-3512.2019.8. Исследования проведены в научно-образовательном центре «Нанотехнологии» Южного федерального университета.*

Список используемых источников

1. Климин В.С., Агеев О.А., Ильин О.И., Федотов А.А. Исследование режимов получения каталитических структур из пленки Ni для выращивания

углеродных нанотрубок // Известия ЮФУ. Технические науки – 2011 – № 4 (117) – С. 222-225.

2. V S Klimin, R V Tominov, A V Eskov, S Y Krasnoborodko and O A Ageev The influence of the chemical and physical component of the plasma etching of the surface of gallium arsenide on the etching rate in the chloride plasma of the combined discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V.917.– P. 092005.

3. Klimin V.S., Solodovnik M.S., Smirnov V.A., Eskov A.V., Tominov R.V., Ageev O.A. A study of the vertical walls and the surface roughness GaAs after the operation in the combined plasma etching // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Сер. "International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016" 2016 – P. 102241Z.

# НАНОКОМПОЗИТЫ КАРБОНАТГИДРОКСИАПАТИТА, ГИДРОСИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ И КАЛЬЦИТА

**Солоненко А.П.**[1,2]

[1]*- Омский государственный медицинский университет, Омск,* annsolonenko@gmail.com

[2]*- Омский государственный технический университет, Омск*

Фосфаты, карбонаты и силикаты кальция входят в состав ряда медицинских материалов, предназначенных для восстановления целостности костной ткани. Как правило, основным компонентом таких препаратов является одна из названных солей. Ввиду различия свойств данных соединений представляет интерес получение их смесей, поскольку в этом случае свойства материала могут быть скорректированы при изменении пропорций компонентов.

В данной работе изучена возможность синтеза композитов нанокристаллических фосфатов, силикатов и карбонатов кальция осаждением в водном растворе. Из расчета содержания апатита в продукте кристаллизации 0 ÷ 100 масс.% (остальное - $CaSiO_3$) задавали исходные концентрации реагентов в растворах (табл. 1).

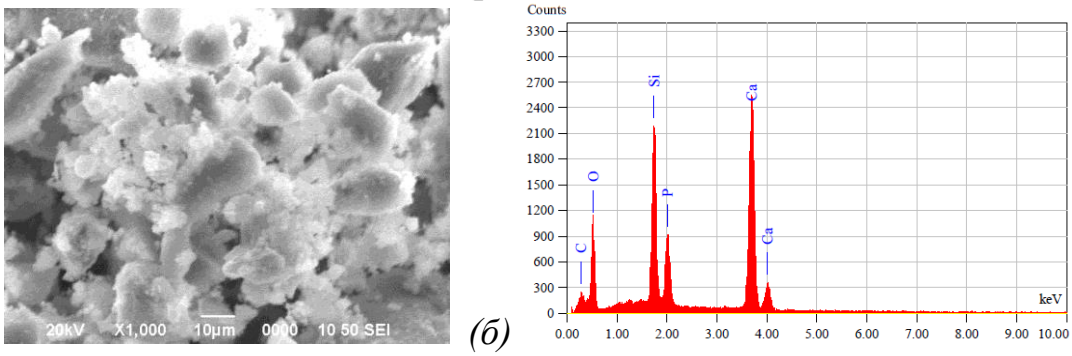
Таблица 1.

Условия синтеза образцов.

| Компонент | Концентрация, моль/л |
|---|---|
| $Ca(OH)_2$ | 0.086 ÷ 0.100 |
| $H_3PO_4$ | 0 ÷ 0.060 |
| $Na_2SiO_3$ | 0 ÷ 0.086 |
| pH | 12.00 ± 0.05 |
| t, °C | 23 ± 2 |

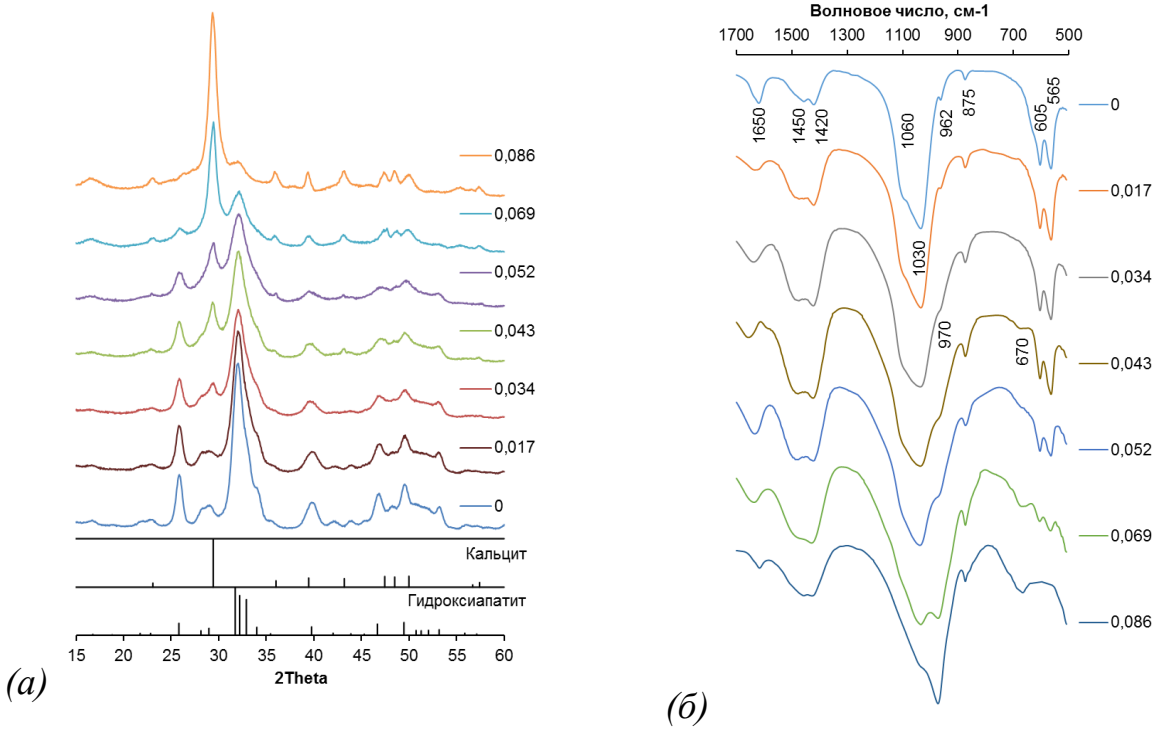
Твердые фазы, образовавшиеся в открытой системе, изучены с применением методов РФА, ИК-Фурье-спектроскопии, РЭМ, ЛДА и БЭТ.

Во всех исследуемых системах получены осадки белого цвета. Анализ элементного состава образцов, позволил установить, что свежеосажденные фазы включают Ca, P, Si, C и O (рис. 1).




*(а)* *(б)*

Рисунок 1. Микрофотография *(а)*, ЭДС спектр *(б)* порошка, полученного в системе, содержащей 0.052 моль/л $Na_2SiO_3$.




*(а)* *(б)*

Рисунок 2. Дифрактограммы *(а)* и ИК-спектры *(б)* образцов.

*Подписи справа от кривых - концентрация $Na_2SiO_3$ (в моль/л) в реакционных средах.

Методом РФА в составе свежеосажденных образцов зафиксированы плохо окристаллизованный апатит и карбонат кальция. Рефлексы апатита на дифрактограммах слабо разрешены и их интенсивность убывает по мере уменьшения расчетного содержания данной соли в материалах (рис. 2а). Одновременно с этим более выраженными становятся рефлексы кальцита. Последний появляется в составе осадков, по-видимому, в результате вытеснения силикатов из первоначально образовавшейся фазы гидросиликата кальция карбонат-ионами, которые появляются в растворе в

результате поглощения $CO_2$ из воздуха.Силикатная составляющая обнаруживается при исследовании порошков методом ИК-Фурье-спектроскопии. На спектрах композитов проявляются полосы поглощения связей в силоксановых мостиках и силанольных группировках, входящих в структуру гидросиликата кальция (рис. 2б). Также спектры содержат полосы колебаний $CO_3$-групп, которые включены в состав кальцита и частично замещают позиции фосфатов в апатите.

Согласно расчету по данным рентгеновской дифракции, компоненты смесей имеют нанометровые размеры (табл. 1). Это обусловливает фиксируемые высокие значения площадей удельной поверхности свежеосажденных образцов. Однако, по результатам лазерного дисперсионного анализа и РЭМ твердые фазы включают частицы с диаметрами от 1 до 400 мкм. Такая разница размеров частиц, зафиксированная разными методами, указывает на высокую степень объединения кристаллитов апатита, гидросиликата кальция и кальцита в агрегаты.

Таблица 2.

Дисперсный состав образцов.

| $C(Na_2SiO_3)$, моль/л | $ОКР_{апатит}$, нм | $ОКР_{кальцит}$, нм | $D_{median}$, мкм | $S_{уд.}$, $м^2/г$ | $d_{пор}$, нм |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 8.4 | - | 94.3 | 90 | - |
| 0.017 | 7.9 | - | 68.9 | 67 | 8.6 |
| 0.034 | 6.7 | 3.2 | 63.5 | 101 | 10.5 |
| 0.043 | 6.0 | 4.6 | 80.4 | 100 | 10.7 |
| 0.052 | 5.2 | 4.1 | 88.1 | 117 | 8.4 |
| 0.069 | 6.4 | 8.2 | 99.3 | 123 | - |
| 0.086 | - | 6.9 | 62.2 | 101 | 8.6 |

В результате исследования установлено, что композиты на основе плохоокристаллизованного апатита, гидросиликата кальция и кальцита могут быть получены путем совместного осаждения в водном растворе. Частицы порошков представляют собой агрегаты равномерно смешанных наноразмерных кристаллитов данных солей.

Полученные материалы могут быть использованы в качестве минеральной основы при изготовлении керамик, матриксов, имплантантов и покрытий на них, предназначенных для восполнения дефектов костей и зубов в стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, травматологии, ортопедии.

# ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В РАЗВИТИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

**Попова А.А., Алиев Р.Э.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, alyona.popova.93@list.ru***

Основой успешного выхода на рынок продуктов машиностроительной отрасли и их стабильной конкурентоспособности в настоящее время является использование высоких технологий, к которым, безусловно, относятся нанотехнологии, позволяющие создать продукт с необходимыми физико-химическими характеристиками [1].

Современные научные разработки доказывают значимость и преимущество применения нанотехнологий в различных отраслях, в том числе и в машиностроении. Они не требуют больших энергетических затрат, дорогих материалов и не нуждаются в производственных и складских помещениях большой площади. Но несмотря на это, требуют высококвалифицированных специалистов: ученых, инженеров и технических работников [2]. Кроме того, не стоит забывать о новизне используемого оборудования и инновационности организации того или иного производственного процесса и управления производством в целом [3].

Разберемся в этом вопросе более подробно, ведь развитие и внедрение нанотехнологий в производственный процесс машиностроительной отрасли является достаточно актуальной задачей и несет в себе ряд преимуществ и недостатков.

На сегодняшний день в машиностроении известно немало разработок и решений, основанных на использовании нанотехнологий. Примерами практической реализации можно считать следующие разработки: подшипники повышенной долговечности [4,5], противоизносные и антифрикационные покрытия [6]. А также целый ряд конструкционных металлических и полимерных материалов с повышенными механическими и термическими характеристиками. Достаточно перспективным являются разработки сверхтвёрдых материалов, изделий из металлокерамики, производство оборудования для изготовления деталей с нанометрической структурируемой поверхностью, сверхвысокопрочных пружин и т.д. [7,8].

Говоря об этих и других изделиях машиностроения с использованием наноматериалов, можно выделить их основные преимущества [9,10]:

- возможность значительно увеличить функционал конечных продуктов машиностроения;
- реализация безотходного производства за счет «расщепления» на мелкие частицы одних объектов и создания из них других, с минимальными энергетическими потерями и отвечающих другим качественным характеристикам;

- возможность миниатюризировать громоздкие продукты, при этом не нарушив их термо- и радиационную стойкость;

- увеличение ресурса режущих и обрабатывающих инструментов с помощью специальных покрытий и эмульсий;

- адаптивное управление режущего инструмента в ходе технологического процесса, благодаря использованию нанотехнологий в методах измерений и позиционирования;

- повышение энергетической эффективности существующего оборудования и развития альтернативной энергетики.

Среди явных преимуществ использования продуктов с использованием наноматериалов в машиностроении есть и ряд недостатков, к которым относятся следующие [11]:

- длительная и трудоемкая работа над формированием базы перспективных потребителей, деятельность которых сможет положительно повлиять на развитие экономики, техники, экологии и др.;

- сложности в поиске источников финансирования инновационного проекта, в основе которого лежат нанотехнологии;

- высокая себестоимость наноматериалов по сравнению с другими менее эффективными материалами;

- приобретение наноматериалов, соответствующих необходимым стандартам, рекламируемым характеристикам;

- доведение продукта с использованием наноматериалов до промышленного производства;

- нехватка высококвалифицированных инженерных и научных кадров.

В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что изделия машиностроения с улучшенными физико-механическими характеристиками, за счет использования наноматериалов, и отвечающие современным потребностям рынка, должны занимать все большее место в экономике страны, являясь локомотивом ее развитие. Для чего необходимо вести инновационный продукт от лабораторных исследований до его конкурентоспособного выхода на рынок.

Список используемых источников

1. Попова, А.А. Исследование свойств перспективных материалов, модифицированных функционализированными углеродными нанотрубками / А.А. Попова, А.А. Глушкова, И.Н. Шубин // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы IX Международной научно - инновационной молодежной конференции: 09 - 10 ноября 2017. Под общей редакцией оргкомитета. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2017. – С. 185-187.

2. Ткачев, А.Г. Промышленные технологии и инновации. Оборудование для наноиндустрии и технология его изготовления/ А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин, А.А. Попов - Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 132 с.

3. Шубин, И.Н. Диагностика физико-механических характеристик наноматериалов. Ч1 / И.Н. Шубин и др. - Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 96с.

4. Балабанов, В.И. Нанотехнологии и нанопрепараты для автотракторной техники / В.И. Балабанов // Применение нанотехнологий и наноматериалов в АПК: сб. докл. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. - С.77 - 81.

5. Гаджиев, А.А. Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.20.03. М., 2005. 34 с.

6. Дегтярев, М.Г. Антифрикционные покрытия с твердыми смазками при восстановлении деталей машин / М.Г. Дегтярев, Поликарпов А.В. / Инновации в эксплуатации сельскохозяйственных машин: вестник ОрелГАУ, 1 (10). – 2010. – С. 9 – 10.

7. Меньшутина, Н.В. Наноструктурированные материалы на основе диоксида кремния: аэрогель, ксерогель, криогель / Н.В. Меньшутина, А.М. Каталевич, А.Е. Лебедев / Естественные и технические науки. 2013. № 2 (64). С. 374-376.

8. Глушкова, А.А. Инновации и рынок перспективных материалов / Глушкова А.А., Попова А.А., Шубин И.Н./ Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Том II - Кемерово: ЗапСибНЦ, 2018 – С – 342-344

9. Попова, А.А. Нанотехнологии в машиностроении, как важнейший элемент научно-технической революции / Попова А.А., Шубин И.Н./ Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы X Международной научно - инновационной молодежной конференции: Под общей редакцией оргкомитета. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2018. – С. 264-266.

10. Попова, А.А. Характеризация свойств наномодифицированных материалов функционализированными углеродными нанотрубками / Попова А.А., Таров Д.В., Шубин И.Н. / Эл. журнал Современные научные исследования и разработки. Выпуск №11 (28). Том 1. Ноябрь 2018. С 545-548.

11. Каталевич, А.М. Процессы получения высокопористых материалов в сверхкритическом флюиде / А.М. Каталевич / автореферат дис. ... кандидата технических наук / Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева. Москва, 2013.

# ВЛИЯНИЕ ПРОКАЛИВАНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КАТАЛИЗАТОРА

**Бесперстова Г.С., Буракова Е.А.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, bes.galina@mail.ru***

Углеродные нанотрубки (УНТ) – это популярный объект для исследований. Подобный интерес обусловлен уникальными свойствами данного наноматериала [1], благодаря которым круг приложений, применяющий УНТ увеличивается, к ним можно отнести катализ, строительную промышленность, медицину и т.д. [2]. Каждая область применения требует индивидуального подхода к выбору УНТ, свойства которых напрямую зависят от их характеристик.

В процессе синтеза катализаторы влияют на характеристики углеродных нанотрубок [3]. Обычно, авторы уделяют внимание компонентному составу и способу получения катализатора. В случае компонентного состава изучают влияние природы активного компонента [4], носителя [5] и промотора [6] на синтезируемый наноматериал. К наиболее распространенным способам получения катализатора относят: метод термического разложения, осаждение, прокаливание и золь-гель метод.

Актуальным становится исследование фазового состава катализатора [7, 8], что обусловлено простотой варьирования характеристиками каталитической системы в промышленном масштабе. Данное исследование направлено на исследование связи фазового состава активного компонента кобальтсодержащего катализатора с условиями прокаливания.

Образцы катализатора получали методом термического разложения. Для этого готовили раствор-расплав смеси исходных компонентов (нитратов), лимонной кислоты и воды при нагревании. Полученный раствор-расплав подвергали первой стадии термической обработки, именуемой «разложение», которую проводили в муфельной печи при температуре 500 С в течение 15 минут. В результате образовывалась хрупкая вспененная структура, которую подвергали второй стадии термической обработки, именуемой «прокаливание». Прокаливание проводили при различных условиях, а именно, температуре, времени и расходе подаваемого окислителя в муфельную печь.

Определить фазовый состав катализатора, позволила специально разработанная методика, основанная на избирательном растворении компонентов катализатора. На образцах катализатора были синтезированы УНТ в токе этилена при 650 °С, благодаря чему был рассчитан удельный выход углерода, который позволил оценить эффективность катализатора. Удельную поверхность синтезированных УНТ определяли на анализаторе «Сорбтометр-М» (ЗАО «Катакон», г. Новосибирск). Структура УНТ исследовалась по СЭМ изображениям, полученных со сканирующего

электронно-микроскопического комплекса Neon 40, Carl Zeis. Внешний и внутренний диаметры УНТ определяли при помощи обработки СЭМ изображений в программе JMicroVision. Дефектность Анализ УНТ на дефектность проводили на приборе DXR Raman Microscope (TermoScientific).

В итоге, благодаря проведенному исследованию была установлена зависимость характеристик катализатора от фазового состава активного компонента. Так же была выявлена линейная зависимость удельного выхода углерода от фазового состава активного компонента катализатора.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-43-680005.*

Список используемых источников

1. Jorio, A. Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications / A. Jorio, G., M. Dresselhaus // Springer Verlag Berlin Heidelberg. - 2008 – P. 720.
2. Раков, Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи Химии – 2001 – Т.70 - №10. – С. 734-774.
3. Красников, Д.В. Формирование активных центров катализаторов в процессах синтеза многослойных углеродных нанотрубок с контролируемыми свойствами / Д.В. Красников // Новосибирск. – 2015. – с. 156.
4. Willems, I. Control of the outer diameter of thin carbon nanotubes synthesized by catalytic decomposition of hydrocarbons / I. Willems, Z. Konya, J.-F. Colomer // Chemical Physics Letters. – 2000. – 317. – p. 71-76.
5. Suwen Li. Catalyst design for high-density and low-temperature CNT synthesis on conductive Ti silicide substrate / Suwen Li, Changjian Zhou, Salahuddin Raju // Diamond & Related Materials. – 2017. – 75. – p. 39–43.
6. Wang, G. Preparation and evaluation of molybdenum modified Fe/MgO catalysts for the production of single-walled carbon nanotubes and hydrogen-rich gas by ethanol decomposition / G. Wang, J. Wang, H. Wang // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2014. - №2. – p. 1588–1595.
7. Wirth, C.T., Bayer, B.C., Gamalski, A.D. et al. The phase of iron catalyst nanoparticles during carbon nanotube growth //Chemistry of Materials. – 2012. – V. 24. – №. 24. – P. 4633-4640.
8. Красников, Д.В. Исследование состояние активного компонента Fe – Co – катализаторов роста многослойных углеродных нанотрубок методом рентгенофазового анализа на синхротронном излучении / Д.В. Красников, А.Н. Шмаков, В.Л. Кузнецов // Известия РАН. Серия физическая, - 77. - №2.– с. 177–180.

# ГИБРИДНЫЕ АЭРОГЕЛИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

**Кузнецова Т.С., Пасько Т.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация***

Загрязнение водоемов нефтепродуктами вследствие аварийных ситуаций довольно распространенное явление, которое представляет опасность для экологической обстановки. Существует множество способов ликвидаций последствий нефтяных разливов, однако механическое извлечение по механизму сорбции является одним из самых эффективных. Актуальным направлением исследований является создание и апробирование новых сорбентов, обладающими большим сорбционным потенциалом, а так же экологичностью и доступностью.

Существует три основные группы сорбирующих материалов, используемых для очистки от разливов нефти: синтетические, органические и неорганические материалы. Ключевыми характеристиками, по которым оценивается сорбент, являются: высокая сорбционная емкость, гидрофобность, олеофильность, простота использования, а так же его стоимость. Известные синтетические материалы, такие как полистирол и бутилкаучук, являются гидрофобными и олеофильными, но их медленная разлагаемость является основным недостатком. Органические материалы, такие как кукурузный стебель, нетканая вата и хлопковое волокно, обычно имеют низкую сорбционную способность и в основном гидрофильны. Неорганические материалы – терморасширенный графит, цеолиты, вермикулит – более экологичны по сравнению с синтетическими материалами и гидрофобны, что позволяет их использовать в качестве сорбирующих материалов.

Аэрогели относятся к группе неорганических материалов и представляют интерес благодаря развитой поверхности, гидрофобности и олеофильности. Огромный потенциал их использования связан с тем, что они являются самыми легкими из твердых материалов. Наиболее популярные гибридные аэрогели, состоящие из нескольких исходных материалов, - аэрогели на основе графена с внедрёнными углеродными нанотрубками (УНТ). Использование двух и более исходных компонентов позволяет сохранить уникальные свойства аэрогелей, такие как: низкая плотность, высокие пористость и площадь удельной поверхности, при этом ограничить возможные недостатки, такие как хрупкость или чувствительность к влаге.

Благодаря внедрению нанотрубок, слои графена не сшиваются между собой, а образуют каркас, что производит синергетический эффект [1]. Такое сочетание приводит к тому, что графеновые листы не сдвигаются относительно друг друга при нагрузке и не слипаются, а нанотрубки не

деформируются и не спутываются, являясь ребрами жесткости в данной конструкции (рисунок 1).

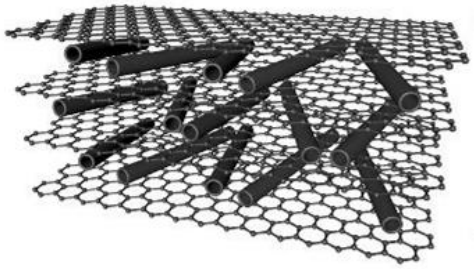


Рисунок 1. Схематическое расположение трубок и графена в аэрогеле [2].

Сорбционная способность данных материалов обусловлена развитой внутренней поверхностью. Исследования в данной области популярны по всему миру, наилучшие показатели были достигнуты в Китае [3]. Авторами [3] был получен аэрогель на основе графена и углеродных нанотрубок, показавший улучшенные показатели, по сравнению с аналогами (Таблица 1).

Сравнение сорбционной способности различных материалов чаще всего производится по трем группам веществ: нефти или нефтепродуктам (в т.ч. дизельному топливу), ионам тяжелых металлов (в т.ч. $Cd^{2+}$ ), а так же органическим красителям (в т.ч. метиленовый синий).

Таблица 1.

Сравнение сорбционной способности аэрогеля с аналогами.

| Загрязнитель | Сорбционная емкость, г/г | | |
|---|---|---|---|
| | Аэрогель | Аэрогель на основе графена | Пена оксида графена |
| Дизельное топливо | 421 | 300 | 154 |
| $Cd^{2+}$ | 0,235 | 0,96 | - |
| Метиленовый синий | 0,685 | 0,125 | 0,397 |

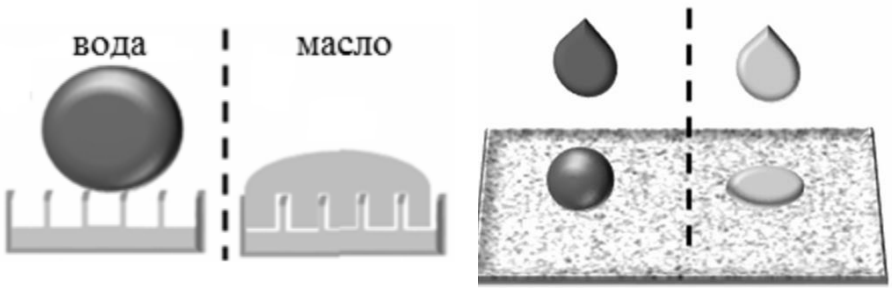



Рисунок 2. Наглядное изображение гидрофобности и олеофильности [4].

Помимо сорбционной емкости, важными показателями являются гидрофобность и олеофильность. Специальная термообработка аэрогелей позволяет достигать угла контакта более 150º, что позволяет материалу быть супергидрофобным и при этом олеофильным. Обработка газом при большой

температуре и давлении способствует увеличению поверхностных дефектов и создает большую шероховатость поверхности, что в свою очередь увеличивает угол контакта воды с аэрогелем. Наглядное изображение свойств гидрофобности и олеофильности представлено на рисунке 2.

Практическая значимость данных свойств представлена на рисунке 3. Авторы работы использовали материал на основе графена для разделения смеси масло-вода в качестве модельной ситуации, требующей разделения нефтепродуктов и воды [5].

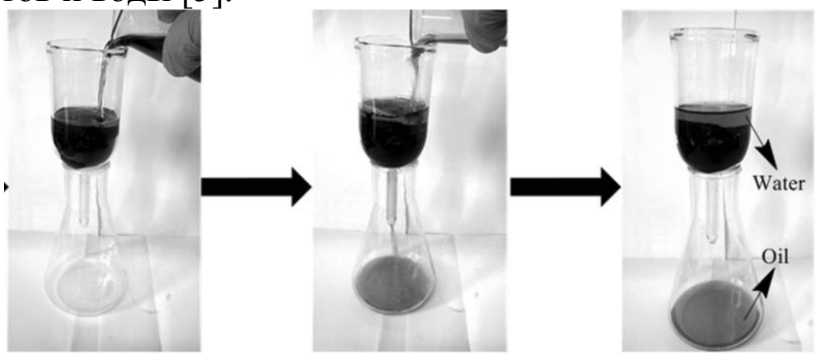



Рисунок 3. Процесс разделения смеси масла и воды [5].

Важным аспектом производства и дальнейшего применения аэрогеля является его повторное использование. Установлено, что сорбционная способность аэрогель сохраняется до 90% от первоначального значения после 10 циклов сорбции и десорбции [1].

Гибридный аэрогель на основе графена и нанотрубок обладает всеми свойствами, чтобы быть потенциальным сорбентом для очистки водоемов от загрязнения нефтепродуктами: развитой внутренней поверхностью, высокими сорбционными показателями, гидрофобностью, олеофильностью, экологичностью.

Список используемых источников

1. Recyclable 3D graphene aerogel with bimodal pore structure for ultrafast and selective oil sorption from water/ M.A. Riaz, etc.// RSC Advances.-2017.-№7(47), P. 29722-29731.

2. Flexible free-standing 3D porous N-doped graphene–carbon nanotube hybrid paper for high-performance supercapacitors/ W. Fan, ect.//RSC Adv.- 2015.-№ 5, P. 9228 - 9236.

3. Synergistic effects of 2D graphene oxide nanosheets and 1D carbon nanotubes in the constructed 3D carbon aerogel for high performance pollutant removal/ Y. Shen, ect.// Chemical Engineering Journal . – 2017.- №314 . – P. 336-346.

4. Sodium silicate based aerogel for absorbing oil from water: the impact of surface energy on the oil/water separation/ Z. Mazrouei-Sebdani, etc.// Materials Research Express.-2019.-№6 (8).

5. A robust and cost-effective superhydrophobic graphene foam for efficient oil and organic solvent recovery/H. Zhu , etc.// Small.-2015.-№11(39).- P. 5222-5229.

# ГИДРОСТАТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ КАК СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТА НИКЕЛЬ-ГРАФЕН

**Сафина Л.Р.[1], Баимова Ю.А.[1,2]**
*[1]-Башкирский государственный университет, г. Уфа, saflia@mail.ru;*
*[2]-Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа.*

Графен и углеродные нанотрубки считаются идеальным материалом для будущих электронных транзисторов, солнечных батарей и т.д. В настоящее время наноматериалы, такие как графен и углеродные нанотрубки, становятся все более и более популярными в качестве армирующих материалов для металлических композитов [1]. Структуры графен-металл особенно интересны тем, что могут отображать не только отдельные свойства графена, но приобрести качественно новые.

Методом молекулярной динамики (МД) исследовалось формирование композита никель-графен с применением гидростатической деформации при повышенных температурах. Метод МД, используемый в данной работе, позволяет исследовать поведение достаточно больших структур на атомарном уровне, а также производить расчет всех необходимых механических характеристик. Численные эксперименты проводились в свободно распространяемом пакете МД моделирования LAMMPS.

При рассмотрении композита на основе скомканного графена и частиц никеля, в системе необходимо задать три типа взаимодействия: взаимодействие между атомами никеля, между атомами углерода и между атомами никеля и углерода. В результате, потенциал системы C-Ni может определяться как сумма трех потенциальных энергий:

$$U_{system} = U_{C-C} + U_{C-Ni} + U_{Ni-Ni}, \quad (1)$$

где $U_{C\text{-}C}$ – потенциал взаимодействия атомов углерода (потенциал AIREBO); $U_{C\text{-}Ni}$ – потенциал взаимодействия атомов никеля и углерода (потенциал Морзе); $U_{Ni\text{-}Ni}$ – потенциал взаимодействия атомов никеля (потенциал Морзе).

Межатомный потенциал AIREBO, который был разработан для изучения углеродных систем с различными типами ковалентных связей в рамках пакета моделирования LAMMPS хорошо апробирован и активно применяется для изучения углеродных структур [2, 3]. В настоящей работе используются параметры взаимодействия графена с атомами Ni, полученные из расчетов *ab-initio* [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], а для описания взаимодействия атомов никеля между собой параметры из работы [5].

В работе исследуются объемные структуры, состоящие из свернутых чешуек графена, заполненные наночастицами никеля из 21, 47 и 78 атомов (рис. 1а-в). Диаметр наночастиц Ni составил 5.5, 8.4 и 9.5 Å соответственно. Трехмерная структура создавалась повторением 4×4×4 структурных единиц вдоль направлений *x*, *y* и *z* соответственно. Чешуйки, заполненные наночастицами, были ориентированы в пространстве случайным образом. Во всех случаях использовались периодические граничные условия вдоль направлений *x*, *y* и *z*.

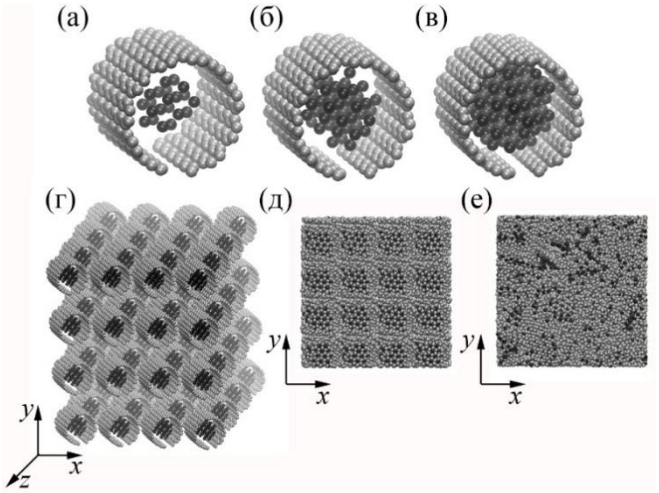



Рисунок 1. Свернутый лист графена, заполненный наночастицей никеля с (а) $Ni_{21}$(Ø5.5 Å), (б) $Ni_{47}$ (Ø8.4 Å) и (с) $N_{78}$ (Ø9.5 Å). (в) Начальный вид структуры графен-никель (Ø8.4 Å). (д) Структура композита $Ni_{47}$ (Ø8.4 Å) после гидростатического сжатия при $T$ = 0 K и (е) $T$ = 2000 K.

Для того, чтобы сформировать прочный композитный материал, к начальной (рис. 1г), довольно рыхлой структуре, прикладывается гидростатическое сжатие до максимально возможных плотностей при разных температурах от 0 до 2000 К. Постоянство температуры поддерживалось термостатом Носе-Хувера.

После того как было проведено сжатие исходной рыхлой структуры при разных температурах (рис. 1д-е), были исследованы их прочностные характеристики, что позволит установить был ли сформирован композитный материал в процессе сжатия. На рис. 2 показана зависимость напряжения от деформации при растяжении композита, полученного при 0 K, а также сжатого при 1500 и 2000 K. Из графика видно, что при нулевой температуре получены нетипичные кривые напряжение-деформация. Отсюда можно заключить, что при 0 K композитная структура не формируется, чешуйки остаются отдельными составными элементами, не образуя связей между собой. В случае, когда применялась повышенная температура, кривые имеют характерный вид: напряжения достигают максимума и затем постепенно понижаются, причем для 2000 K это выражено более явно.

При сжатии с повышенной температурой происходит формирование единой композитной структуры, что особенно ярко выражено для композита $Ni_{21}$ и $Ni_{47}$, где перемешивание атомов углерода и никеля происходит легче

вследствие малого размера наночастиц. В структуре с количеством атомов никеля 78 чешуйка графена плотно облегает наночастицу никеля, мешая формированию смешанной никель-углеродной структуры.

В работе было показано, что гидростатическая деформация при повышенных температурах способствует формированию композита никель-графен. Чтобы происходили структурные перестройки необходимы повышенные температуры. Сравнение кривых давление-деформация демонстрирует, что повышение температуры облегчает формирование химических связей, атомы соседних чешуек образуют новые соединения, что свидетельствует о формировании композитной структуры.

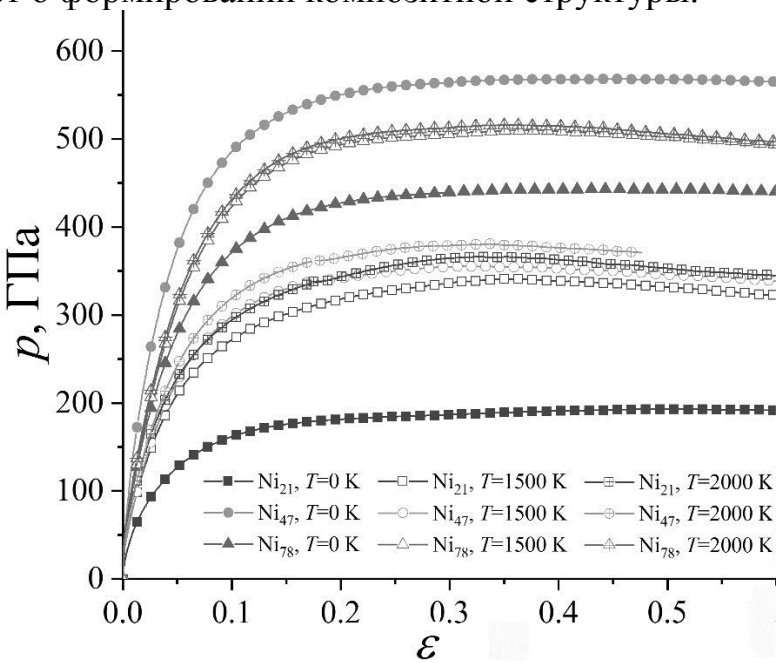



Рисунок 2. Зависимость напряжения от деформации для всех четырех структур при гидростатическом растяжении композита, полученного при 0, 1500 и 2000 К.

Список используемых источников

1. Potential and challenges of metal-matrix-composites reinforced with carbon nanobers and carbon nanotubes. / E. Neubauer, M. Kitzmantel, M. Hulman, P. Angerer. // Composites Science and Technology. Elsevier BV. – 2010. – V. 70.– P. 2228-2236.

2. Упругие свойства фуллерита / Л.Х. Рысаева, Ю.А. Баимова, Д.С. Лисовенко и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т. 13(1). – С. 105-109.

3. Механические свойства объемных углеродных материалов / Ю.А. Баимова, Р.Т. Мурзаев, С.В. Дмитриев // ФТТ. – 2014. – Т. 56(10). – С. 1946-1952.

4. Molecular dynamics simulation of nickel-coated graphene bending / K.P. Katin, V. S. Prudkovskiy, M. M. Maslov // Micro and Nano Letters. – 2018. – V. 13. – P. 160-164.

5. Application of the Morse potential function to cubic metals / L. A. Girifalco, V. G. Weizer // Physical Review. – 1959. – V. 114 – P. 687-690.

# ХИМИЧЕСКАЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОРИСТОСТИ УГЛЕРОДНОГО СОРБИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЦЕССА

**Попова А.А., Шубин И.Н.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов,***
***i.shubin77@yandex.ru***

Стремительное развитие промышленности на территории нашей страны является причиной увеличения выбросов, приводящих к значительному загрязнению окружающей среды. При этом, к каждому промышленному предприятию предъявляются обязательные требования по очистке отходящих газов от токсичных веществ и соединений. Но качество очистки не всегда позволяет добиться соответствия состава выбросов нормативному уровню, что полностью не исключает их отрицательного влияния на окружающую среду.

Сегодня, ученые ведут активную работу по минимизации вредного воздействия отходящих газов [1,2]. Одним из наиболее перспективных и экологичных решений видят в использовании сорбирующего материала [3,4]. При этом, ряд научных решений требуют доработки и имеют отрицательные стороны, связанные в своем большинстве с недостаточной пористостью сорбирующего материала.

Так, в работе [5] рассмотрен сорбент, для очистки газов имеющий высокую степень очистки, устойчивость к обработке острым водяным паром, способность к многократной химической регенерации и др. Но за счет отсутствия у представленного сорбента пористости, он имеет низкую степень очистки отходящих газов от эмульгированных нефтепродуктов.

Авторы работ [6,7] показывают, что качественное устранение вредных примесей из отходящих газов, возможно лишь с помощью сорбента, имеющего развитую высокопористую поверхность, при этом затраченное время на очистку будет минимальным.

Ряд ученых считают, что пористость сорбирующего материала возможно увеличить за счет термической или химической активаций. В связи с эти встает вопрос о том, применение какой активации будет более эффективно. Мнение исследователей расходятся. Авторы работ [8,9] доказывают, что химическая активация исходного сырья, с осуществлением подбора оптимальных условий позволяет получить нанопористые углеродные сорбенты с высокой удельной поверхностью (2000–2900 $м^2$ /г)

В свою очередь, авторы работ [10,11] приводят результаты исследований, где установлено, что при использовании термической активации, наблюдается увеличение пористости исходного материала, проявляющееся в росте удельной поверхности и общего объема пор.

Однако, из результатов представленных в работах [12-14] можно сделать вывод, что одновременное или последовательное использование химической и термической активации является наиболее эффективным для получения более развитой поверхности материала и значительного увеличения пористости. Например, в работе [12] доказано, что в результате химической и термической обработки углеродного сорбирующего наноматериала был получен макропористый материал с удельной поверхностью более 2000 $см^3/г$. Автор работы [13] показал, что использование многостадийной обработки, включающую в себя химическую и термическую активацию, способствует увеличению таких показателей как площадь удельной поверхность и, соответственно, пористость.

Механически прочные сорбенты с развитой структурой пор, по мнению авторов работы [14], можно получить в результате определения оптимального темпа нагрева исходного материала и выбора конкретного вида используемого сырья, с заданными свойствами для химической активации.

Исходя из вышесказанного, следует, что для решения острой проблемы вредных выбросов в окружающую среду, в настоящее время необходимо разработать единую технологию создания высокоэффективного сорбента, способного быстро и качественно справиться с очисткой отходящих газов от различного вида примесей.

Список используемых источников

1. Жакишева, А.А. Пути предотвращения воздействия нефтегазовых производств на окружающую среду / А.А. Жакишева / Вестник Челябинского государственного университета. 2011. № 32 (247). С. 142-149.

2. Суржиков, Д.В. Загрязнение окружающей среды промышленного центра металлургии как фактор риска для здоровья / Д.В. Суржиков / автореферат дис…доктора биологических наук / Иркутский государственный медицинский университет. Иркутск, 2007. – 364 с.

3. Горшкова, А.Р. Исследование сорбционной емкости перспективных сорбентов, модифицированных углеродными нанотрубками / А.Р. Горшкова, М.М. Москова, И.Н. Шубин / Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение. Материалы II Международной научно-практической конференции. 2017. С. 226-228.

4. Горшкова, А.Р. Исследование свойств перспективных сорбентов, модифицированных углеродным наноматериалом / А.Р. Горшкова, М.М. Москова, И.Н. Шубин / Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции. 2017. С. 192-194.

5. Дворник, С.В. Фильтрационные свойства фторопластового сорбента для очистки от нефтепродуктов сточных вод различного уровня загрязненности / С.В. Дворяк, Г.В. Маврин, И.А. Насыров, Д.Д. Фазуллин / Научно-технический вестник Поволжья. - Казань, 2012. - № 1. - С. 59-62.

6. Ляпков, А.А. Техника защиты окружающей среды / А.А. Ляпков, Е.И. Ионова. Издание 2-ое, переработанное. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 317 с.

7. Маунг, К.К. Экспериментальное исследование сорбционных технологий для очистки сточных вод от нефтепродуктов на тепловых электростанциях Мьянмы / К.К. Маунг/ дис. ... кандидата технических наук / Национальный исследовательский университет «МЭИ». Москва, 2018.–134 с.

8. 06.20-19Б2.517 Роль химической активации в развитии пористости углеродных материалов. РЖ 19Б-2. Физическая химия (Кристаллохимия. Химия твердого тела. Газы. Жидкости. Аморфные тела. Поверхностные явления. Химия коллоидов). 2006. № 20.

9. Чесноков, Н.В. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы / Н.В. Чеснокова, Н.М. Миковаб, И.П. Иванов, Б.Н. Кузнецова / Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 1 (2014 7). С. 42-53.

10. Буянтуев, С.Л. Исследование процессов термической активации углейв плазме электрического разряда с получением сорбентов и углеродных наноматериалов / С.Л. Буянтуев, Д.М. Могнонов, А.С. Кондратенко, С.Ю. Шишулькин, С.С. Бадмаев, Д.В. Доржиев / Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2018. № 2-3. С. 82-91.

11. Атанова, А.С. Термические методы переработки многотоннажных полимерных отходов с получением сорбентов экологического назначения / А.С. Атанова, Д.В. Докучаева, И.С. Глушанкова, Е.Е. Гарибзянова, А.К. Шутова / Химия и инженерная экология XVI международная научная конференция, посвященная 15-летию реализации принципов Хартии Земли в Республике Татарстан. 2016. С. 93-96.

12. Микова, Н.М. Влияние условий химической и термической модификации на свойства углеродных материалов, получаемых из древесины березы / Н.М. Микова, И.П. Иванов, В.А. Парфёнов, О.Ю. Фетисова, Н.В. Чесноков / Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 4 (2011 4). С. 356-357.

13. Еремин, И.С. Разработка сорбирующего материала на основе растительного сырья / И.С. Еремин / дис. ... кандидата технических наук / Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина. Москва, 2018. – 133 с.

14. Олонцев, В.Ф. Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологического производства / В.Ф. Олонцев, Е.А. Фарберова, А.А. Минькова, К.Н. Генералова, К.С. Белоусов / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2015. № 4. С. 9-23.

# СОВРЕМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЕТЕКЦИИ ГАЗА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ*

**Климин В.С., Резван А.А., Зубова Т.А.**
***Южный федеральный университет, г. Таганрог,***
***arezvan@sfedu.ru***

В настоящее время углеродные наноструктуры и наносистемы вносят огромный вклад в развитие области инновационных технологий. С каждым годом увеличивается количество возможных сфер применения данных структур в сфере микро- и наноэлектроники. Однако, остро стоит вопрос об интеграции данного материала и его изготовления в широкую линейку технологического процесса в массовом масштабе на производствах. Анализ литературных источников в области применения современных углеродных нанотехнологий для создания устройств мониторинга и контроля экологического состояния окружающей среды, показывает, что качество и функционал технологических решений различен. Это связано с применением различных конфигураций параметров формирования массива углеродных наносистем, а именно различных газовых смесей, температуры и времени роста и др. [1-3]. В связи с чем актуально исследование технологии изготовления устройств на основе углеродных наноматериалов с использованием стандартных операций.

Для формирования устройства для детекции газа в качестве подложки использовался Si с кристаллографической структурой (100) [4]. Напыление пленки материала слоя Ni производилось на установке AUTO 500, методом магнетронного распыления. При этом производится параллельное формирование верхнего контакта. Формирование боковой изоляции и каркаса сенсора производится при помощи стандартных методов фотолитографии и последующего плазмохимического травления. После чего проводилось нанесение слоя диэлектрика с последующей «взрывной» литографии. В качестве диэлектрика наносился слой $Si_3N_4$. Осаждение проводилось плазмохимическим методом [5]. Цикл обратной фотолитографии завершается проведением «взрыва» напыленных пленок в диметилформамиде. Далее производится создание области формирования массива вертикально ориентированных никелевых вискеров с применением стандартных операций фотолитографии и метода плазмохимического травления [6]. Для изготовления основной части чувствительной ячейки, которой является углеродная наноструктура, применяется метод плазмохимического осаждения из газовой фазы. После этого над чувствительным слоем формировались электрические контакты, которые подключались к устройству обработки сигналов.

По окончании экспериментальной сессии был сформирован макет конструкции и была оформлена лабораторно-технологическая инструкция по

изготовлению устройства детекции газа на основе углеродных наносистем для мониторинга состояния окружающей среды. Итоговым результатом является то, что изготовленный макет высокотехнологичного газоанализатора с чувствительным элементом, выполненным из углеродной наноструктуры обладает чувствительностью к акцепторным молекулам газа $NO_2$ и донорным молекулам газов $NH_3$, CO, парам $H_2O$ с различной степенью коэффициента чувствительности зависящего от концентрации. Основываясь на данные проведенных экспериментов, было установлено, что для $CH_4$, $CO_2$, CO, при рабочей температуре 300 К и концентрации 0,01 моль/литр, чувствительность составила 63, 135, 5468. Кроме этого было получено, что у разработанного макета время срабатывания и время восстановления равняется 0,1 сек и 1,0 сек, соответственно.

**Данная исследовательская работы была выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации (МК-3512.2019.8). Результаты были получены с помощью научного и образовательного центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.*

Список используемых источников

1. Shiraishi K and Ito T 1998 Phys. Rev. B 57 6301
2. Foxon C T and Joyce B A 1977 Surf. Sci. 64 293
3. Jeong H E, Lee S H, Kim P and Suh K Y 2008 Colloid Surface A 313-314 359
4. Rezvan A.A., Klimin V.S. Research of the resistive gas sensor's sensing element based on graphene films // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications (PHENMA 2017) 2017. - P. 199.
5. Rezvan A.A., Klimin V.S. Application of carbon nanostructures for formation of a sensitive element of a vacuum gauge by means of plasma // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications (PHENMA 2018) 2018. – P. 200.
6. Rezvan A.A., Klimin V.S. Sensitive element of detector gas sensor based on carbon nanostructures // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications (PHENMA 2018) 2018. – P. 200.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МОЛОЧНУЮ СЫВОРОТКУ, С ПОСЛЕДУЮЩИМ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫМ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕМ

**Родионов Д.А., Лазарев С.И., Ромашкина Л.В., Богомолов В.Ю.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация***

Молочная сыворотка является вторичным продуктом производства творога и различных видов сыров. Так как рост молочной промышлености с каждым годом увеличивается, соответственно объемы сыворотки пропорционально увеличиваются. Из-за не высокого срока хранения молочной сыворотки ее чаще всего сливают в сточные воды, что несет значительный вред окружающей среде, из-за активной загрязняющей способности молочной сыворотки. При переработке молока в сыр, в молочную сыворотку переходит более половины сухих веществ молока, процент перехода сухих веществ представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Степень перехода основных компонентов молока в сыворотку [1].

| Компоненты молока | Степень перехода в сыворотку, % | Степень перехода в сыр, % |
|---|---|---|
| Сухие вещества | 50,8 | 49,2 |
| Белки | 27,0 | 73,0 |
| Лактоза | 96,0 | 4,0 |
| Жир | 8,5 | 91,5 |
| Минеральные вещества | 79,2 | 20,8 |

Из таблицы 1 видно, какой процент полезных веществ переходит в сыворотку, можно сделать вывод, что слив молочной сыворотки не только экологически не безопасен, но и экономически не выгоден. Для получения молочного белкового концентрата есть несколько путей, первый - это классический с применением химических реагентов, когда в разогретую сыворотку добавляют кислоты, после чего она скисает и формируется белок. Вторым вариантом концентрирования является применение мембранных технологий [2]. Для наших исследований мы использовали ультрафильтрационную установку трубчатого типа, общий вид, технологическая схема, а так же работа установки, методика расчета экспериментальных данных представлена в работе [3].

После проведенных исследований мы получили следующую зависимость, представленную на рисунке 1.

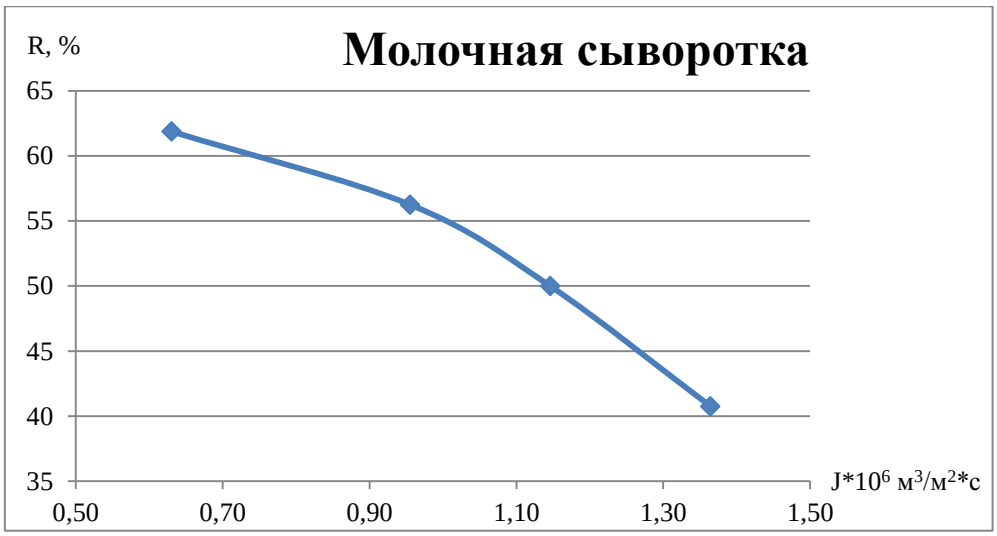



Рисунок 1. Зависимости коэффициента задержания (R) растворенных веществ от выходного удельного потока (J, м3/м2с) для ультрафильтрационной мембраны.

Из рисунка 1 видно, что с ростом выходного удельного потока снижается коэффициент задержания, это связано с тем, что образовавшиеся пограничные слои затрудняют дальнейшему прохождению жидкости.

Для того что бы ускорить процесс коагуляции молекул белка, применяется электромагнитная установка с мощность 15мТл. За счет воздействия электромагнитного поля на молочную сыворотку, происходит укрупнение молекул белка без применения химических реактивов. Во время процесса электромагнитной установки отбирались образцы каждые 30 минут и сливались в измерительные колбы, далее эти же образцы выдерживались в течение 24 часов и повторно изучались под микроскопом, результаты электромагнитной обработки представлены на рисунке 2.

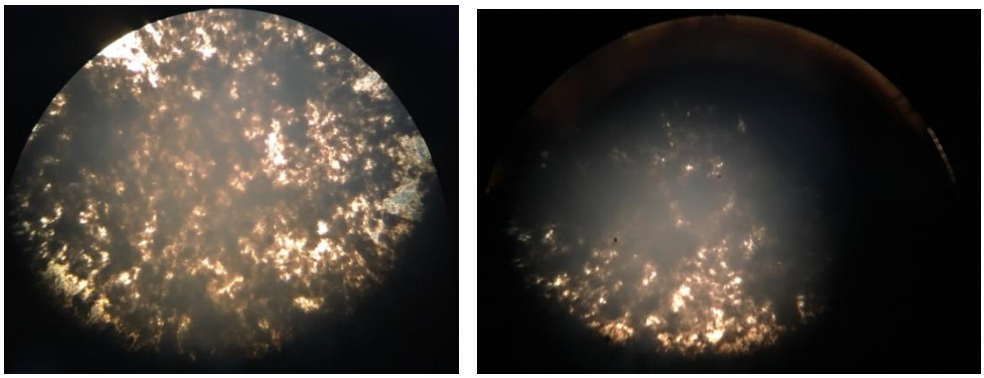


Рисунок 2 Молочная сыворотка под микроскопом без обработки (слева), и после обработки 90 минут (справа) с выдержкой в течение 24 часов.

Как видно из рисунка 2, образец с электромагнитной обработкой в течение 90 минут, а так же выдержкой в сутки имеет самую плотную структуру.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что влияние электромагнитного поля ускоряет процесс коагуляции молочной сыворотки, что позволяет эффективнее концентрировать молочный белок.

Список используемых источников

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 45-2017 «Производство напитков, молока и молочной продукции». М.: Росстандарт, 2017.

2. Лазарев С. И., Родионов Д. А., Полянский К. К. Эффективность баромембранной очистки технологических растворов при производстве сливочного масла и сыров // Сыроделие и маслоделие. – 2019. – №. 1. – С. 46-48.

3. Родионов Д.А. Полупромышленная установка трубчатого типа для концентрирования технологических растворов молокоперерабатывающих производств // Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья – Тамбов, 2019. – 206-209.

# О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗАТОРА С ОХЛАЖДАЮЩИМИ ТРУБКАМИ

**Хохлов П.А., Шестаков К.В., Лазарев Д.С.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, geometry@mail.nnn.tstu.ru***

В настоящее время одним из основных направлений развития в области электрохимических мембранных систем выступает разработка современных аппаратов и устройств для разделения, концентрирования и очистки различных промышленных растворов и сточных вод [1-4]. Поэтому целью данной работы стало представление разработанного и запатентованного электродиализатора с охлаждающими трубками [5] (рис. 1).

Разработанный и представленный в работе электродиализатор состоит из двух плит корпуса и прижимных металлических пластин, пакета чередующихся мембран и прокладок определенной конфигурации (рис. 2). Сквозь всю конструкцию электродиализатора проложены двенадцать охлаждающих трубок. Центры восьми из них распределены по кругу радиусом 75 мм от центра профильной проекции электродиализатора под углом 45 градусов относительно друг друга, а центры оставшихся четырех отверстий образуют равносторонний ромб с диагоналями длиной 30 мм, пересечение которых так же лежит в упомянутом выше центре.

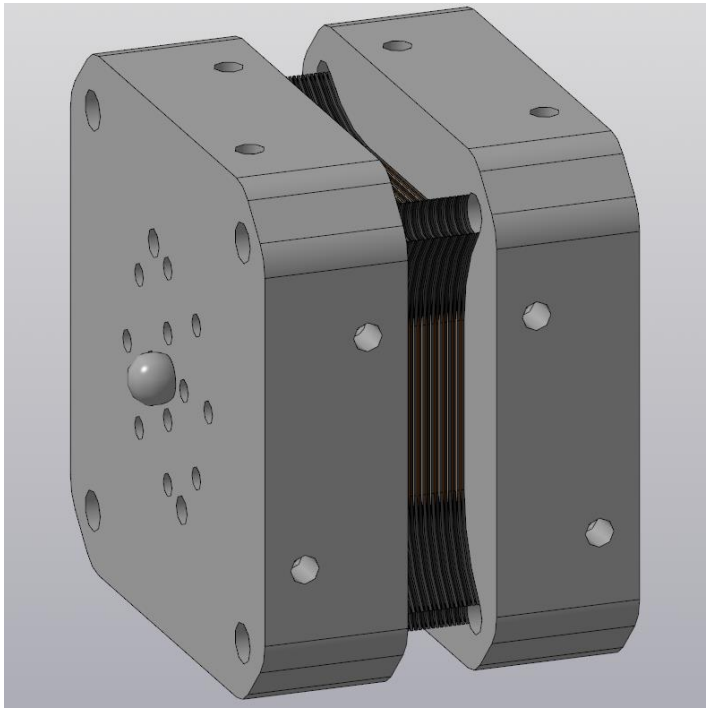


Рисунок 1. 3D-модель разработанного электродиализатора (болтовое соединение и охлаждающие трубки не изображены).

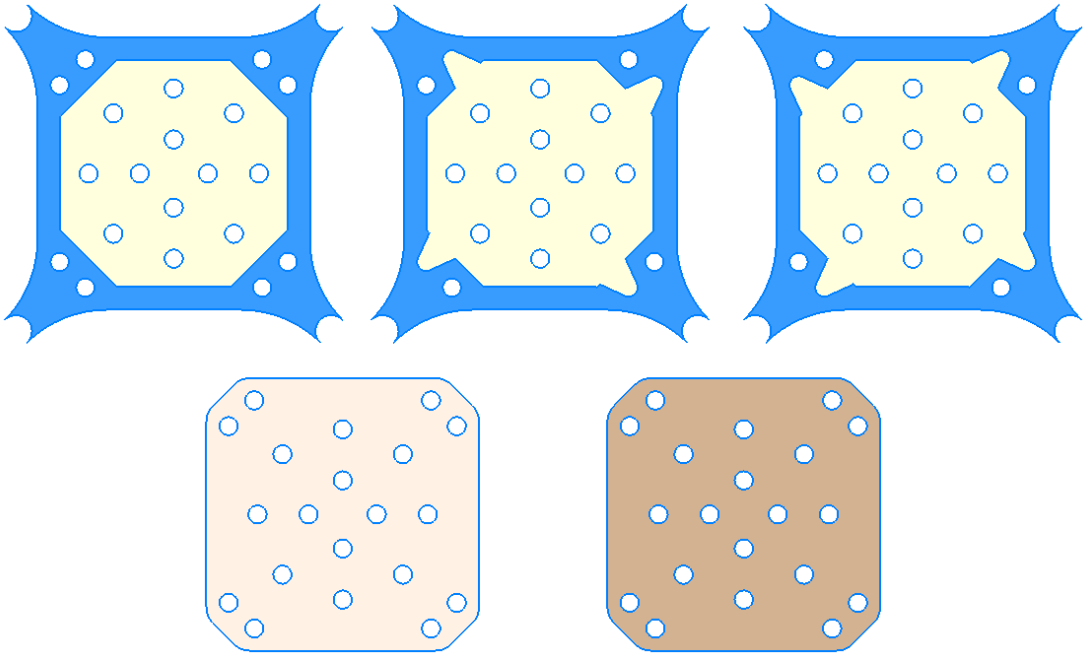


Рисунок 2. Конфигурации используемых в электродиализаторе прокладок (верхний ряд) и анионообменных и катионообменных мембран (нижний ряд).

Работа электродиализатора с охлаждающими трубками происходит в следующем порядке. Исходный раствор раздельными потоками через четыре штуцера и четыре канала подачи разделяемого раствора (концентрата) и параллельно им через четыре штуцера и четыре канала для подачи разделяемого раствора (дилюата) в первой плите корпуса электродиализатора подается к пакетам чередующихся ионообменных мембран и прокладок.

Далее, проходя по всем межмембранным каналам, потоки разделяемого раствора за счет строго направленного движения анионов и катионов в сторону анода и катода сквозь анионообменные и катионообменные мембраны превращаются в потоки с концентрированным содержанием веществ и потоки, обеденные солями. В итоге в виде концентрата и дилюата они с помощью четырех каналов и четырех штуцеров вывода концентрата, а также четырех каналов и четырех штуцеров для вывода дилюата во второй плите корпуса электродиализатора выводятся из него. Параллельно этим потокам через другие входные и выходные штуцеры в обеих частях корпуса электродиализатора поступают и выводятся приэлектродный раствор (анолит или католит в зависимости от электрода).

Охлаждение всех движущихся потоков жидкости в электродиализаторе осуществляется непосредственно внутри нее за счет проложенных сквозь всю конструкцию двенадцати охлаждающих трубок проточной водой или другой охлаждающей жидкостью. Герметичность межмембранных каналов обеспечивается выполнением соединения двенадцати охлаждающих трубок с ионообменными мембранами в виде соединения с натягом.

Технический результат данной разработки заключается в снижении температурной нагрузки на ионообменные мембраны за счет снижения температуры разделяемого раствора, а также в увеличении турбулизации разделяемого раствора за счет изменения конструкции электродиализатора.

В ближайшее время планируется изготовление лабораторного и полупромышленного образцов для выполнения серии экспериментальных исследований по разделению, концентрированию и очистке различных промышленных растворов и сточных вод.

Список используемых источников

1. Шестаков К.В., Лазарев С.И., Хорохорина И.В., Лазарев Д.С. Возможности применения мембранных методов в процессе очистки промышленных сточных вод производства печатных плат // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. – №1. С. 290-296.

2. Сайт Роспатента [Электронный ресурс]. URL: http://www.fips.ru/ (дата обращения: 15.10.19).

3. Freepatent [Электронный ресурс]. URL: http://www.freepatent.ru/ (дата обращения: 15.10.19).

4. Потехина Л.Н., Седелкин В.М. Технология и свойства ультрафильтрационных мембран на основе модифицированных ацетатов целлюлозы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т.1. № 1(52). С. 110-116.

5. Патент на изобретение 2690339 RUS, МПК B01D61/42. Электродиализатор с охлаждением разделяемого раствора / Лазарев С.И., Ковалев С.В., Шестаков К.В., Хохлов П.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТГТУ. № 2018137145; заявл. 22.10.2018; опубл. 31.05.2019. Бюл. № 16.

# ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ДЕВУЛКАНИЗАЦИИ РТИ НА СМЕСИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

**Архипов Р.С., Просветов А.Е., Павлинов В.В., Шашков И.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация,***
***dfyj10@yandex.ru***

Технически наиболее совершенный по сравнению с другими применяемыми в настоящее время методами регенерации резин является термомеханический метод. Он включает в себя несколько основных стадий, таких как подготовка резиновой крошки (например, дробление шин), смешивание крошки с химическими компонентами, непосредственная переработка на оборудовании [1-3].

К преимуществам термомеханического метода по сравнению с другими методами девулканизации РТИ можно отнести относительную простоту и компактность технологической схемы, отсутствие загрязненных сточных вод, меньшие удельные капитальные затраты, лучше условия и более высокую производительность труда, меньшую себестоимость регенерата, возможность получения регенерата, модифицированного различными добавками (мономерами, полимерами, смолами и т.д.).

Преимущества термомеханического метода заключаются также и в снижении содержания влаги и летучих веществ и повышении однородности свойств регенерата.

К недостаткам термомеханического метода относятся выделение летучих веществ при девулканизации, которые необходимо обезвреживать путем сжигания, и довольно интенсивный износ рабочих органов девулканизаторов, приводящий к снижению производительности оборудования. Термомеханический метод предъявляет значительно более высокие требования к культуре производства, особенно в части строгого поддержания регламентированных температурных режимов процесса.

Экспериментальная установка, на которой проводились исследования, состоит из смесителя с приводом от электродвигателя переменного тока и системы управления обогревом смесительной камеры.

Технологические режимы получения регенерата и химические реагенты выбираются таким образом, чтобы обеспечить девулканизацию резины, то есть максимально разрушить поперечные связи, чаще всего C-S и S-S, при этом максимально сохраняя от термодеструкции молекулу каучука. Это позволяет получить высокомолекулярную резиновую смесь (регенерат), обладающую пластичностью, с широким спектром применения [4-6].

Исследования проводились следующим образом. Резиновая крошка смешивалась с мягчителем (мазут) и активатором (стеариновая кислота) в различных пропорциях и подвергалась предварительному набуханию при температуре 160 ºС. Затем смесь поступала в предварительно нагретую до

160 ºС рабочую камеру Z–образного смесителя периодического действия, в котором осуществлялось перемешивание в течение 2,5–6 часов при той же температуре, а также при температуре 180 ºС.

После чего полученный регенерат выгружался из смесителя и выдерживался при комнатной температуре в течение суток, после чего проводилась оценка количества мягчителей и степени девулканизации.

В таблице 1 представлены результаты исследований.

Таблица 1.

Содержание растворимой части в регенерате в зависимости от условий девулканизации в Z-образном смесителе.

| Тип регенерата | | Содержание компонентов, % | | Тем-ра девул-канизации, $^0$C | Содержание растворимой части, % | Степень девул-канизации, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Мазут | Стеариновая кислота | | | |
| Регенерат | 1 | 20 | 3 | 160 | 31,0 | 24,3 |
| | 2 | | 5 | | 39,1 | 33,1 |
| | 3 | | 7 | | 37,3 | 31,7 |
| | 4 | 20 | 3 | 180 | 44,1 | 37,2 |
| | 5 | | 5 | | 46,2 | 38,6 |
| | 6 | | 7 | | 43,0 | 35,8 |
| | 7 | 30 | 3 | 160 | 35,8 | 27,6 |
| | 8 | | 5 | | 42,3 | 34,3 |
| | 9 | | 7 | | 40,1 | 32,2 |
| | 10 | 30 | 3 | 180 | 42,4 | 36,2 |
| | 11 | | 5 | | 45,0 | 38,3 |
| | 12 | | 7 | | 42,7 | 35,4 |
| | 13 | 50 | 3 | 160 | 43,2 | 37,1 |
| | 14 | | 5 | | 44,6 | 38,4 |
| | 15 | | 7 | | 43,7 | 37,8 |
| | 16 | 50 | 3 | 180 | 46,5 | 38,5 |
| | 17 | | 5 | | 48,0 | 38,6 |
| | 18 | | 7 | | 44,3 | 38,5 |

Проанализировав полученные данные можно сказать, что при добавлении до 5 % стеариновой кислоты в процесс девулканизации идет увеличение растворимых фракций, что говорит об увеличении степени девулканизации смеси, далее наблюдался небольшой постоянный спад.

Это можно объяснить доступом кислорода в процесс девулканизации, окисление идет быстрее при использовании активаторов.

Эксперименты проведенные с увеличенным количеством активаторов (с 3% до 5 %) показали увеличение количества растворимой в хлороформ-ацетоновой смеси фракции регенерата. Можно сделать вывод, что в условиях, реализованных в смесителе незначительное увеличение количества активаторов приводит к увеличению фракции регенерата растворимого в хлороформ-ацетоновой смеси.

Увеличение температуры (от 160$^0$C до 180$^0$C) при проведении процесса в смесителе приводит к увеличению растворимой части до 48 % что

свидетельствует об увеличении интенсивности, и как следствие, степени девулканизации смеси.

Так же можно заключить, что содержание мягчителя (мазута) не оказывает существенного влияния на степень девулканизации получаемого регенерата.

Несмотря на то, что периодическая технология реализованная в смесителе с Z-образными лопастями подразумевает длительное воздействие на резиновую крошку, сам характер незначительных механических воздействий приводит к низкой степени девулканизации. В то же время, короткое но интенсивное воздействие на эту же резиновую крошку с одинаковыми девулканизирующими группами, может привести к гораздо большим разрушениям пространственный сетки и химических связей и как правило к увеличению степени девулканизации.

Интенсификация технологических процессов, заключающаяся в повышении их скорости и сокращении продолжительности, уменьшении удельных энергетических и трудовых затрат, необходимых для их осуществления, а также улучшение некоторых качественных показателей готовых изделий - тот технический эффект, который в той или иной степени может сопровождать применение регенерата в резиновой промышленности и служить дополнительным источником экономической эффективности.

Список используемых источников

1. Беляев П.С., Маликов О.Г., Забавников М.В., Соколов А.Р. Повышение качества нефтяных битумов путем модификации продуктами переработки изношенных автомобильных шин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2003. Т. 9. № 1. С. 63-69.

2. Беляев В.П., Клинков А.С., Беляев П.С., Полушкин Д.Л. Утилизация резиновой крошки из изношенных шин в контексте решения проблемы повышения качества дорожных покрытий // Глобальный научный потенциал. 2012. № 10 (19). С. 169-171.

3. Беляев В.П., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Фролов В.А. Повышение энергоэффективности процесса модификация битума регенератом резиновой крошки // Components of Scientific and Technological Progress.- 2013, № 1 (16) – с. 75 – 77.

4. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22. № 2. С. 264-271.

5. Рециклинг и утилизация тары и упаковки._Клинков А.С., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В., Однолько В.Г.: учебное пособие / м-во образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО "Тамбовский гос. технический ун-т". Тамбов, 2010.

# КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОНАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ $Zn^{2+}$, $Cu^{2+}$

**Михайлин М.И., Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Жирков В.В.**
***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов***

В гальванической промышленности только 30-40% использованных металлов фактически наносятся на изделия, в то время как остальные остаются в технологической воде в форме ионов [1-3].

С точки зрения экологических проблем, необходим процесс очистки сточных вод, который позволит полностью возвращать очищенную воду в производственные линии. По сравнению с другими процессами электромембранные характеризуется высокой эффективностью, высокой надежностью и низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Поэтому целью данной работы является исследование кинетических и структурных характеристик электронанофильтрационной регенерации сточных вод процесса латунирования.

В качестве объектов исследования были выбраны сточные воды от процесса латунирования предприятия ОАО «Электроприбор», г. Тамбов, содержащие ионы меди в концентрации 1030 мг/л и ионы цинка в концентрации 460 мг/л, модельные растворы с такими же концентрациями ионов и нанофильтрационные мембраны, производство ЗАО «Владипор», г. Владимир.

Для изучения кинетических характеристик нанофильтрационных мембран исследовался коэффициент задержания [4].

$$R = 1 - \frac{C_{пер}}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где: $R$ – коэффициент задержания; $C_{пер}$ – концентрация растворенного вещества в пермеате, кг/м$^3$;

$C_{исх}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м$^3$.

Образцы нанофильтрационных мембран отрабатывались в электробаромембранной установке при их трансмембранном давление P = 1,6 МПа, при нормальных условиях в течении 120 минут в рабочем растворе.

Экспериментальные зависимости по задерживающей способности мембраны ОПМН-П и ОПМН-К при проведении процесса электробаромембранного разделения растворов гальванических стоков представлены на рисунке 1 по ионам: $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ при варьировании трансмембранного давления и при постоянной плотности тока.

Электробаромембранное разделение гальванического раствора на мембранах ОПМН-П и ОПМН-К показало, что наблюдается миграционный перенос к прикатодной мембране преимущественно катионов $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ , и отталкивание этих ионов от прианодной мембраны. Из графиков видно, что при незначительном повышении трансмембранного давления коэффициент задержания для исследуемого раствора почти не изменяется. А при увеличении трансмембранного давления выше 15 атмосфер идет резкий спад по коэффициенту задержания. Это вероятно связано с изменением структуры

мембраны. Также при проведение электронанофильтрационного процесса разделения исследуемый раствор нагревается, снижается его вязкость, что также ведет к увеличению удельного выходного потока, что отмечается в [5].

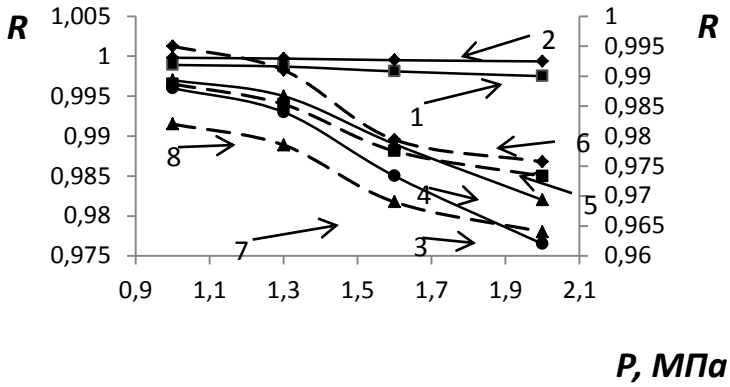



Рисунок 1. Зависимость коэффициента задержания от давления при постоянной плотности тока 12,8 А/м$^2$ для технологического раствора, содержащего ионы Cu в концентрации 1,030 кг/м$^3$, ионы Zn в концентрации 0,460 кг/м$^3$ для прианодной (ПА) и прикатодной (ПК) мембран типа ОПНМ-П (сплошная), ОПМН-К (штриховая): 1,5- ионы Cu, ПА; 2,6- ионы Cu, ПК; 3,7- ионы Zn, ПА; 4,8-ионы Zn, ПК.

Экспериментальные зависимости задерживающей способности мембран ОПМН-П и ОПМН-К при проведении процесса электронанофильтрационного разделения растворов гальванических стоков представлены на рисунке 2 по ионам: $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ при варьировании плотности тока и при постоянном трансмембранном давлении.

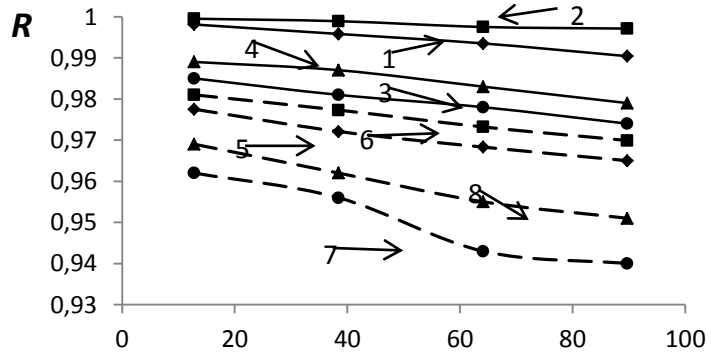



Рисунок 2. Зависимость коэффициента задержания мембраны от плотности тока при постоянном тарнсмембранном давлении мембраны Р=1,6 МПа для технологического раствора, содержащего ионы Cu в концентрации 1,030 кг/м$^3$, ионы Zn в концентрации 0,460 кг/м$^3$ для прианодной (ПА) и прикатодной (ПК) мембран типа ОПНМ-П (сплошная), ОПМН-К (штриховая): 1, 5- ионы Cu, ПА; 2, 6- ионы Cu, ПК; 3, 7- ионы Zn, ПА; 4, 8- ионы Zn, ПК.

Из графиков, изображенных на рисунке 2, видно, что с увеличением плотности электрического тока коэффициент задержания падает как для прианодных, так и для прикатодных мембран по обоим видам исследуемых ионов. В начальные моменты времени вещество в растворе интенсивно

диссоциирует на ионы, анион активно переносятся сквозь поры мембраны и в виде кислоты отводится в растворе прианодного пермеата, далее при постепенном нагреве раствора за счет разогрева прикатодного электрода происходит электрохимическая реакция образования гидроксида цинка на этом электроде в виде нерастворимого осадка. Постепенный нагрев оставшегося в тракте ретентата заставляет его диссоциировать на ионы, далее выделяя через прианодную мембрану анион в виде раствора кислоты [5].

В таблице 1 приведено сравнение коэффициента задержания по ионам меди и цинка для нанофильтрационных мембран при разделении реального стока после процесса латунирования и модельного раствора, содержащего такие же концентрации ионов меди и цинка, как и в реальном стоке.

Таблица 1.

Сравнение коэффициента задержания для реального и модельного раствора.

| Мембрана | ***R*** для реального стока | | ***R*** для модельного раствора | |
|---|---|---|---|---|
| | $Cu^{2+}$ | $Zn^{2+}$ | $Cu^{2+}$ | $Zn^{2+}$ |
| ОПМН-П | 0,971 | 0,954 | 0,997 | 0,982 |
| ОПМН-К | 0,946 | 0,928 | 0,973 | 0,964 |

Из таблицы 1 видно, что расхождение по коэффициенту задержания не превышает 4%.

Выполненный комплекс экспериментальных и теоретических исследований кинетических характеристик мембран электронано-фильтрационной очистки, позволяет сделать следующие вывод: анализ зависимостей по коэффициенту задержания и удельному выходному потоку разделения растворов латунирования от трансмембранного давления и плотности тока отмечает, что прианодная мембрана в результате наложения на систему «мембрана-раствор» постоянного электрического потенциала начинает закупориваться и на ее поверхности образуется слой осадка из-за протекания электрохимического процесса.

Список используемых источников

1. Павлов Д. В., Колесников В. А. Очистка сточных вод гальванического производства: новые решения. Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 6. С. 66-69.

2. Хранилов Ю.П. Экология и гальванотехника: проблемы и решение. Киров: изд. ВятГТУ. 2000. 97 с.

3. Makisha N., Gogina E. Methods of biological removal of nitrogen from waste water and ways to its intensification. Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 587–589. P. 644–647.

4. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. М.:Мир. 1999. 513 с.

5. Ковалева О.А. Расчет технологических и конструктивных характеристик нанофильтрационного и электронанофильтрационного аппарата плоскокамерного типа. Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. 2017.Т. 22. Вып. 5. С. 1154.

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ ХИМИЧЕСКИХ И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Луа П., Лазарев С.И.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, geometry@mail.nnn.tstu.ru***

Актуальной задачей в химической, машиностроительной и других отраслях промышленности является разработка перспективных и оптимизированных вариантов конструкций аппаратов для разделения промышленных растворов и сточных вод с выделением из них ценных компонентов (в виде потоков подщелоченных и подкисленных растворов, которые затем легче перерабатывать в общих схемах очистки, утилизировать или возвращать обратно в технологический цикл производства). Для выделения веществ на заключительных и финишных этапах очистки растворов применяются баромембранные и электробаромембранные методы [1-7].

Целью настоящей работы является совершенствование конструктивного оформления процессов электробаромембранного разделения растворов химических и машиностроительных производств, для достижения которой предлагается методический подход.

Общий методический подход к разработке математического описания конструктивно-технологических характеристик электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа для разделения промышленных растворов гальванических производств и производств минеральных удобрений базировался на следующих этапах:

1. Разработка перспективных конструктивных решений в области электробаромембранного и баромембранного разделения технологических растворов гальванических производств;

2. Математический расчет общей (с учетом экранирующих элементов) и эффективной площади (без учета экранирующих элементов), а также площади прикатодных и прианодных мембран для электробаромембранного разделения технологических растворов исследуемых производств, основанный на геометрических характеристиках конструкции аппарата;

3. Математический расчет объема камер для электробаромембранного разделения технологических растворов исследуемых производств и несущих нагрузку элементов, основанный на геометрии аппарата;

4. Расчет общей массы заготовки конструкционного материала для проектирования эффективной конструкции электробаромембранного аппарата для разделения исследуемых растворов и экономическое обоснование применения.

Для реализации общего методического подхода предлагается разработанная конструкция оптимизированного варианта электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа [8] с увеличенной эффективной площадью разделения растворов (рисунок 1). В аппарате предусмотрены два контура разделения раствора.

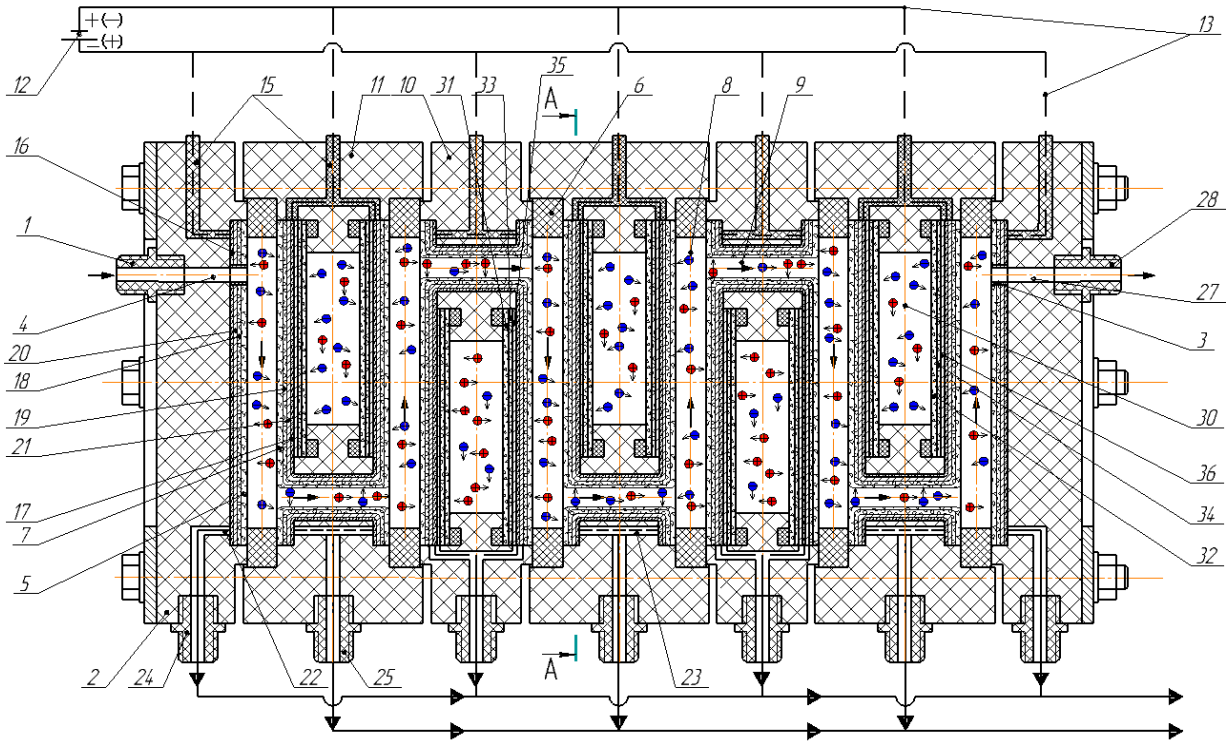
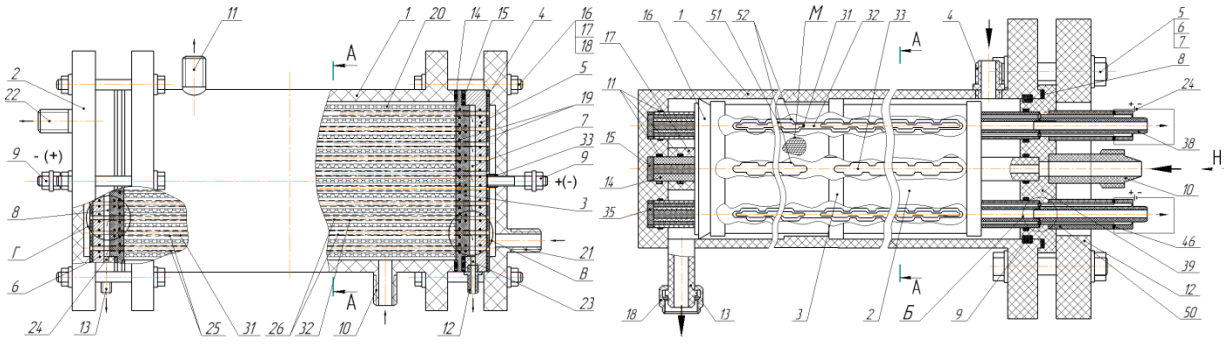



Рисунок 1. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа.

Также в работе представлены оптимизированные варианты электробаромембранных аппаратов трубчатого [9] и рулонного [10] типа (рисунок 2).




а б

Рисунок 2. Электробаромембранный аппарат трубчатого (а) и рулонного (б) типа.

На разработанных конструкциях электробаромембранных аппаратов (плоскокамерного, трубчатого, рулонного типа) без наложения электрического поля можно проводить баромембранные процессы (обратный

осмос, ультрафильтрация, нанофильтрация, микрофильтрация), например, при разделении растворов химических, машиностроительных и др. производств.

Список используемых источников

1. Дытнерский, Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю.И. Дытнерский. - М.: Химия, 1978. - 352 с.

2. Дытнерский, Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю.И. Дытнерский. - М.: Химия, 1986. - 272 с.

3. Структурные и проницаемые характеристики ацетатцеллюлозных мембран при очистке промышленных стоков гальванических производств // О.А. Абоносимов, С.И. Лазарев, К.В. Шестаков, А.А. Левин // Химическая технология. - 2018. - Т. 19, № 2. - С. 74-80.

4. Ковалев, С.В. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа с дифференцированным выделением ионов / С.В. Ковалев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - № 4. - С. 27-29.

5. Ковалев, С.В. Экспериментальные исследования кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения сульфатсодержащих растворов / С.В. Ковалев, С.И. Лазарев, А.В. Эрлих // Конденсированные среды и межфазные границы. - 2010. - Т. 12, № 2. - С. 128-132.

6. Москвин, Л.Н. Методы разделения и концентрирования в аналитической химии / Л.Н. Москвин, Л.Г. Царицина. - Л.: Химия, 1991. – 256 с.

7. Кинетика электробаромембранного разделения водных сульфатсодержащих растворов / С.И. Лазарев, А.С. Горбачев, Г.С. Кормильцин, О.А. Абоносимов // Конденсированные среды и межфазные границы. - 2008. - Т. 10, № 1. - С. 29-34.

8. Пат. 2689617 Российская Федерация МПК B01D 61/42, B01D 61/14. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа / С.И. Лазарев, С.В. Ковалев, Д.Н. Коновалов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». - № 2018128895; заявл. 06.08.2018; опубл. 28.05.2019, Бюл. № 16. - 16 с.: ил.

9. Пат. 2689615 Российская Федерация МПК B01D 61/46. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа / С.И. Лазарев, С.В. Ковалев, Д.Н. Коновалов, С.В. Мищенко, И.В. Хорохорина, О.А. Ковалева, П.А. Хохлов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». - № 2018135805; заявл. 09.10.2018; опубл. 28.05.2019, Бюл. № 16. - 19 с.: ил.

10. Пат. 2700379 Российская Федерация МПК B01D 61/46, B01D 63/10. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / С.И. Лазарев, С.В. Ковалев, Д.Н. Коновалов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». - № 2019101766; заявл. 23.01.2019; опубл. 16.09.2019, Бюл. № 26. - 22 с.: ил.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЯЖУЩЕГО МОДИФИЦИРОВАННОГО РЕГЕНЕРАТОМ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ

**Павлинов В.В., Просветов А.Е., Архипов Р.С., Шашков И.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,***
***dfyj10@yandex.ru***

В России одной из основных проблем считается качество автомобильных дорог.

В большинстве случаев плохое качество дорожных покрытий связано с низкими показателями дорожного вяжущего, входящего в состав асфальтобетонных смесей. Поэтому именно с улучшением качества дорожного вяжущего можно рассчитывать на улучшение эксплуатационных показателей дорожных покрытий [1-3].

Одним из перспективных методов решения этой проблемы является использование вторично переработанных материалов из РТИ и автомобильных покрышек. Это позволяет улучшить показатели дорожного вяжущего и решить проблемы с утилизацией изношенных автомобильных покрышек, поскольку их складирование и захоронение экономически не эффективно и экологически не безопасно, т. к. при длительном хранении они могут выделять в окружающую среду вещества, способные привести к нарушению экологического равновесия.

Шины выходят из эксплуатации главным образом вследствие износа, расслоения и разрыва деталей. Кроме резины изношенные шины содержат текстильные и металлические армирующие материалы. Следовательно, изношенные шины являются источником ценного вторичного сырья.

Наиболее полно первоначальная структура и свойства каучука, содержащихся в отходах шин и РТИ, сохраняются при механическом измельчении. Установление взаимосвязи между размерами частиц материала, их физико-химическими и механическими характеристиками и затратами энергии на измельчение и параметрами измельчающего оборудования необходимо для расчета измельчителей и определения оптимальных условий их эксплуатации.

После измельчения резиновая крошка подвергается девулканизации термическим и термомеханическим способами (таблица 1) с целью получения регенерата, с последующим введением его в дорожное вяжущее.

Технологические режимы получения регенерата и химические реагенты выбираются таким образом, чтобы обеспечить девулканизацию резины, то есть максимально разрушить поперечные связи, чаще всего C-S и S-S, при этом максимально сохраняя от термодеструкции молекулу каучука. Это позволяет получить высокомолекулярную резиновую смесь (регенерат), обладающую пластичностью, с широким спектром применения [4-6].

Таблица 1.

Результаты экспериментов получения регенерата термическим и термомеханическим способами.

| № | Содержание компонентов в резиновой крошке, % | | Режимы обработки резиновой крошки в термошкафу | | Режимы при обработке на вальцах, | | Время образования шубы, мин. | Степень девулканизации после | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Стеариновая кислота | Мазут | °С | Время, мин. | °С | Время, мин. | | термо-шкафа, % | вальцев, % |
| 1 | 5 | 30 | 160 | 90 | 45 | 20 | 13 | 22,96 | 5,48 |
| 2 | 5 | | | 120 | | | 7 | 24,56 | 13,21 |
| 3 | 5 | 30 | 160 | 90 | 45 | 40 | 13 | 22,96 | 9,26 |
| 4 | 5 | | | 120 | | | 7 | 24,56 | 15,76 |
| 5 | 5 | 30 | 200 | 90 | 45 | 20 | 7 | 30,29 | 10,11 |
| 6 | 5 | | | 120 | | | 5 | 31,84 | 20,82 |
| 7 | 5 | 30 | 200 | 90 | 45 | 40 | 7 | 30,29 | 14,67 |
| 8 | 5 | | | 120 | | | 5 | 31,84 | 22,74 |

Для модификации дорожного вяжущего регенератом была разработана конструкция лабораторного лопастного смесителя.

Процесс модификации осуществлялся при температуре 160 °С и скорости вращения перемешивающего устройства 800 об/мин в течение 60 минут по следующей схеме: дорожный битум разогревался до заданной температуры в термошкафу и в разогретом состоянии битум выливался в рабочую камеру лопастного смесителя, после чего в него добавляли регенерат. После осуществления процесса смешения битума с регенератом, его пробы подвергались лабораторным испытаниям для оценки физико-механических показателей: температуры размягчения дорожного вяжущего, пенетрации, растяжения и эластичности.

Результаты оценки физико-механических показателей дорожного вяжущего на основе битума 60/90 с модифицированным регенератом резиновой крошки после дополнительного вальцевания на вальцах 160х320 приведены в таблице 2.

Процесс регенерации, описанный выше, отличается от подобных тем, что при его использовании применяется минимум химических компонентов, при этом затрачивается достаточно мало энергии и аппаратурное оформление не занимает больших площадей. Все вышеописанные качества положительно влияют как на экологическую составляющую процесса, так и экономическую. При этом дорожное вяжущее модифицированное полученным регенератом имеет удовлетворительное качество.

Таблица 2.

Физико-механические показатели дорожного вяжущего, модифицированного регенератом шинной крошки.

| № | Содержание компонентов в резиновой крошке, % | | Режимы обработки резиновой крошки в термошкафу | | Режимы при обработке на вальцах, | | Температура размягчения | Растяжение | Пенетрация | Эластичность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Стеариновая кислота | Мазут | $^{o}$C | Время, мин. | $^{o}$C | Время, мин | | | | |
| 1 | 5 | 30 | 160 | 90 | 45 | 20 | 48 | 125 | 89 | 37 |
| 2 | 5 | | | 120 | | | 50 | 145 | 92 | 37 |
| 3 | 5 | 30 | 200 | 90 | 45 | 20 | 53 | 155 | 58 | 36 |
| 4 | 5 | | | 120 | | | 58 | 195 | 62 | 37 |
| 5 | 5 | 30 | 160 | 90 | 45 | 40 | 50 | 142 | 90 | 37 |
| 6 | 5 | | | 120 | | | 52 | 215 | 92 | 38 |
| 7 | 5 | 30 | 200 | 90 | 45 | 40 | 59 | 160 | 50 | 49 |
| 8 | 5 | | | 120 | | | 61 | 220 | 54 | 46 |

Список используемых источников


1. Беляев П.С., Маликов О.Г., Забавников М.В., Соколов А.Р. Повышение качества нефтяных битумов путем модификации продуктами переработки изношенных автомобильных шин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2003. Т. 9. № 1. С. 63-69.

2. Беляев В.П., Клинков А.С., Беляев П.С., Полушкин Д.Л. Утилизация резиновой крошки из изношенных шин в контексте решения проблемы повышения качества дорожных покрытий // Глобальный научный потенциал. 2012. № 10 (19). С. 169-171.

3. Беляев В.П., Маликов О.Г., Меркулов С.А., Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Фролов В.А. Повышение энергоэффективности процесса модификация битума регенератом резиновой крошки // Components of Scientific and Technological Progress.- 2013, № 1 (16) – с. 75 – 77.

4. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22. № 2. С. 264-271.

5. Рециклинг и утилизация тары и упаковки. Клинков А.С., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В., Однолько В.Г.: учебное пособие / м-во образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО "Тамбовский гос. технический ун-т". Тамбов, 2010.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ОТ ХЛОРИДА ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА

**Левин А.А., Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Котенев С.И.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, geometry@mail.nnn.tstu.ru***

Черная металлургия – один из крупнейших потребителей воды. Её водопотребление составляет 15-20% общего потребления воды промышленными предприятиями страны. Современное металлургическое предприятие на производство 1 т стального проката расходует180-200м$^3$ воды. Сточные воды ферросплавного производства характеризуются наличием взвешенных веществ, обладают щелочной реакцией, содержат фенолы, цианиды, роданиды, марганец, железо, хром, мышьяк, ванадий и др. Более 70% сточных вод металлургических заводов сбрасываются загрязненными с превышениями норм ПДК. Современные требования к сбросу промышленных сточных вод обуславливают поиск и разработку более эффективных решений в области очистки вод [1, 2]. Наиболее рациональный путь для достижения этих целей – создание локальной системы очистки с возможностью извлечения ценных компонентов и использования очищенных вод в оборотном цикле [3].

Наибольший успех в отношении эффективности и технологичности выделения тяжелых металлов из сточных вод достигнут при использовании методов мембранного разделения, в частности обратного осмоса, ультра- и нанофильтрации [4–6]. Для расчета процесса обратноосмотического разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам и характеристикам процесса. Одними из основных параметров, характеризующих эффективность процесса при обратноосмотическом разделении, являются выходная удельная производительность и коэффициент задержания мембраны [6].

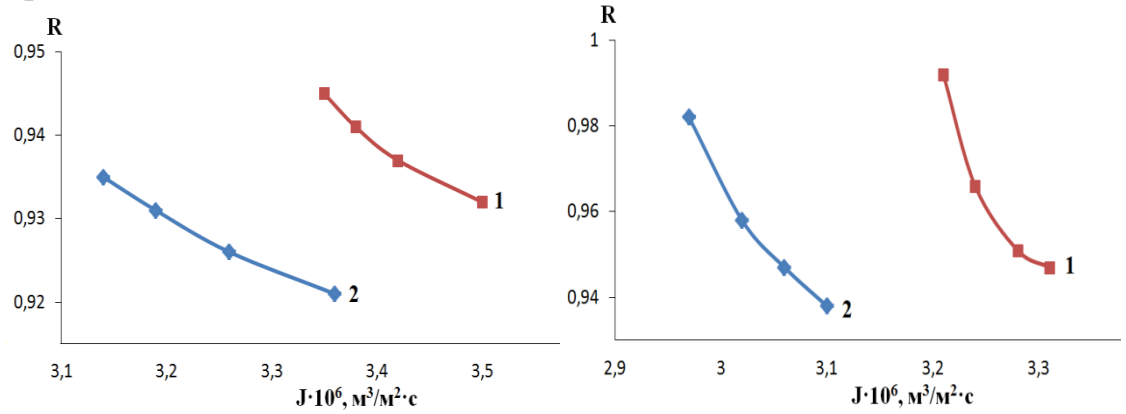
Цель настоящей работы состояла в исследовании эффективности обратноосмотической очистки технологических растворов от хлорида железа и марганца.

В данной работе определяли зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока мембран МГА-95, ОПМ-К при обратноосмотической очистке технологических растворов от хлорида железа и марганца. Исследования проводили на лабораторной обратноосмотической мембранной установке по методике, подробно рассмотренной в работе [4]. Полученные зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока мембран представлены на рисунках 1,2.

Из приведенных данных следует, что при увеличении выходного удельного потока растворителя через мембрану коэффициент задержания снижается для всех представленных зависимостей. Это явление объясняется

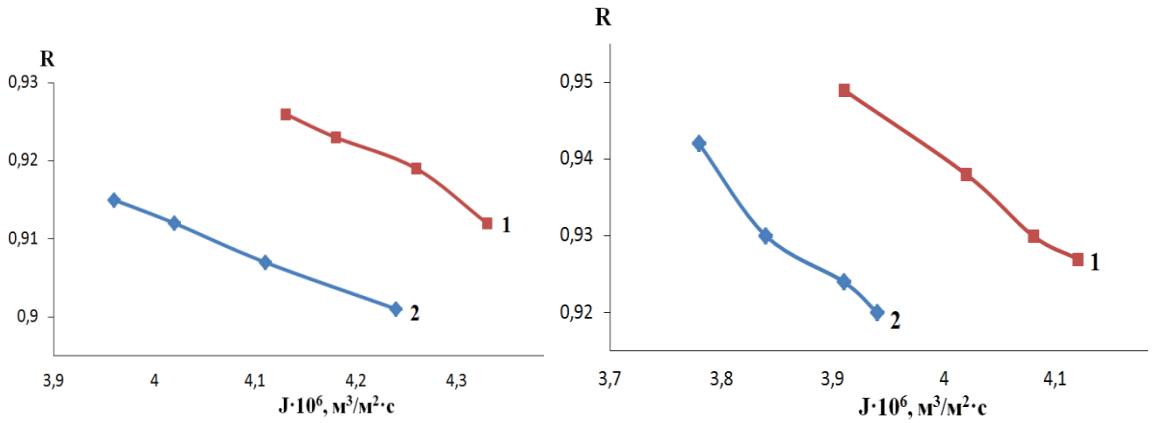
тем, что перенос растворенного вещества через мембрану обусловлен в основном конвективным потоком растворителя.

С ростом концентрации исходного раствора коэффициент задержания снижается, что объясняется преимущественным переносом растворителя относительно растворенного вещества. На величину *R* большее влияние оказывает концентрация, чем давление [4,5], а также природа матрицы полупроницаемых мембран, что подтверждается нашими экспериментальными данными.




*а* *б*

Рисунок 1. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя мембраны МГА-95П для растворов: *а* - хлорида железа $C_{исх}$ = 0,04 кг/м$^3$ (***1***) и 0,08 кг/м$^3$ (***2***); *б* - хлорида марганца $C_{исх}$ = 0,02 кг/м$^3$ (***1***) и 0,04 кг/м$^3$ (***2***).




*а* *б*

Рисунок 2. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя мембраны ОПМ-К для растворов: *а* - хлорида железа $C_{исх}$ = 0,04 кг/м$^3$ (*1*) и 0,08 кг/м$^3$ (*2*); *б* - хлорида марганца $C_{исх}$ = 0,02 кг/м$^3$ (*1*) и 0,04 кг/м$^3$ (*2*).

Так же можно заметить, что мембрана ОПМ-К обладает большим удельным потоком растворителя и коэффициентом задержания по сравнению с МГА-95П (при прочих равных условиях). Это объясняется разным видом взаимодействия растворённого вещества и активного слоя мембраны, а также различной пористой структурой мембран [4].

Для теоретического расчета коэффициента задержания применялось выражение [6].

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_1 \cdot C^n} - 1 \right) \left[ 1 - \exp\left( - J \cdot k_2 \right) \right] \cdot \exp\left( - \frac{J \cdot k_3}{C^m} \right)}, \quad (1)$$

где $k_1$, $n$, $k_2$, $k_3$, $m$ – эмпирические коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1.

Значения эмпирических коэффициентов для выражения (1).

| Наименование | Мембрана | $k_1$ | $n$ | $k_2$ | $k_3$ | $m$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Хлорид железа | МГА-95П | $8{,}7 \cdot 10^{-8}$ | 0,29 | 0,99 | 0,80 | 3,34 |
| | ОПМ-К | $9{,}4 \cdot 10^{-8}$ | 0,09 | 0,99 | 0,86 | 0,019 |
| Хлорид марганца | МГА-95П | 0,08 | 0,30 | 1,0 | 93537 | 3,36 |
| | ОПМ-К | 0,1 | 0,10 | 1,0 | 90709 | 0,021 |

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-38-90117).*

Список используемых источников

1. Gogina E., Makisha N. Information technologies in view of complex solution of waste water problems//Appl. Mech. Mater. 2014. Vol. 587-589. P. 636–639.

2. Сажия В.В., Полковников А.Б., Селдиас И. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России//Успехи в химии и химической технологии. 2009. No. 12(105). С. 94–108.

3. Колесников В.А., Ильин В.И., Кучеров А.А. Очистка сточных вод на металлургических предприятиях //Экология производства. 2010. No. 3. С. 31–36.

4. Акулинчев А.М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Ca, Fe/ А.М. Акулинчев, О.А. Абоносимов, С.И. Лазарев // Вестник ТГТУ, Тамбов, 2017.-Т.23. - №1. – С. 120-128.

5. Абоносимов О.А., Кузнецов М.А., Ковалева О.А., Поликарпов В.М., Дмитриев В.М. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях// Вестн. ТГТУ. 2017. Т. 23. No. 4. С. 641–655.

6. Lazarev S.I., Abonosimov O.A., Ryabinsky M.A., Gorbachev A.S. Model for calculating the mass transfer in electro-barreled devices of a roll type]. Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tehnologiya. 2008. Vol. 51. Vol. 5. P. 109–.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ Р6М5 ПОСЛЕ ИПД И ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

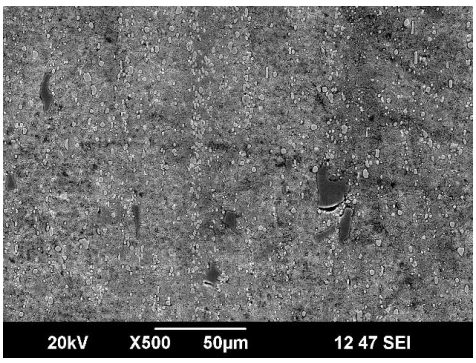
**Шайхутдинова Л.Р., Хайретдинов Э.Ф., Хусаинов Ю.Г.**
***Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия***
***uldash990@mail.ru***

Исследования влияния ионного азотирования на структуру и механические свойства проводили на инструментальной стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73) следующего химического состава, % (масс.): 0,80-0,88 C; 3,8-4,4 Cr; 5,5-6,5 W; 1,7-2,1 V; 5,0-5,5 Mo. Образцы диаметром 20 мм и толщиной 2,2 мм изготовляли методом ИПД путем осадки в холодном состоянии на 43 % с кручением на 1,5 оборота при гидростатическом давлении 4 ГПа [1]. Последующая термическая обработка материала состояла из закалки с 1200°С и однократного отпуска при 560°С.

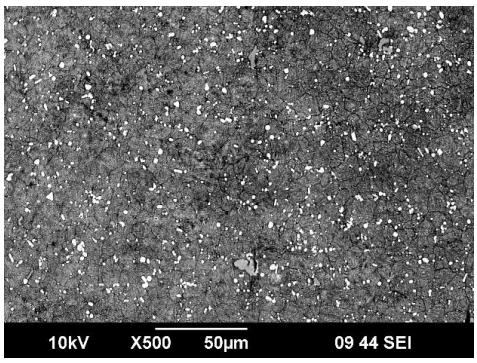
Эксперименты по влиянию ионного азотирования на структурно-фазовый состав и механические свойства инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 после ИПД проводили на модернизированной установке ЭЛУ-5, предназначенной для термической и химико-термической обработки в вакууме. Перед азотированием осуществляли ионную очистку образцов в течение 10 мин при давлении $P$=10 Па в среде аргона $Ar$, температура поверхности при этом не превышала 250°С. Последующий процесс диффузионного насыщения проводили в течение 6 часов в смеси азота $N_2$, аргона $Ar$ и водорода $H_2$ в рабочей камере при напряжении 500 В, давлении 150±5 Па, температуре 550±10°С.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После традиционной горячей термомеханической обработки (ТМО) в процессе последующей закалки от 1220°С и трехкратного отпуска 560°С в исходной структуре стали присутствуют грубые строки и карбидная полосчатость, расположенные в продольном направлении вдоль оси деформации (рис. 1), а также включения крупных, средних и мелких карбидов [2]. Ориентация карбидных фаз вдоль оси деформации приводит к анизотропии объемных изменений при закалке и увеличению термических напряжений, вызванных явлением фазового наклепа. В связи с этим структурная однородность является важной характеристикой инструментальных сталей [2]. На рис. 1, б представлена структура инструментальной стали Р6М5 после ИПД, закалки от 1200°С и однократного отпуска при 560°С. Анализ структурного состояния полученных образцов показал, что в центральной зоне наблюдается более равномерное распределение карбидов, также отсутствует строчечность и полосчатость.



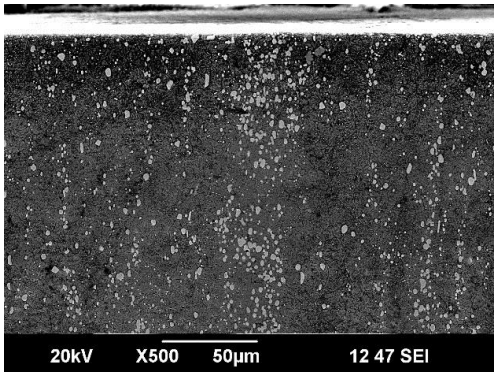

а)



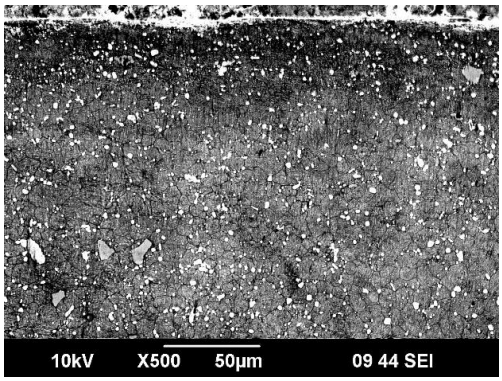

б)

Рисунок 1. Микроструктура образцов Р6М5: а – исходный образец до ИПД; б – образец после ИПД и последующей термической обработки.

Твердость поверхности образца составила 67 HRC. В результате детального анализа структуры центральной зоны образца установлено, что карбидные включения в стали распределены преимущественно по границам зерен и близки к правильной сферической форме. При этом наблюдается частичное дробление крупных карбидов. Средний размер карбидов ~1,5 мкм.




а)




б)

Рисунок 2. Микроструктура образцов Р6М5: а – образец после азотирования; б – образец после ИПД и последующего азотирования.

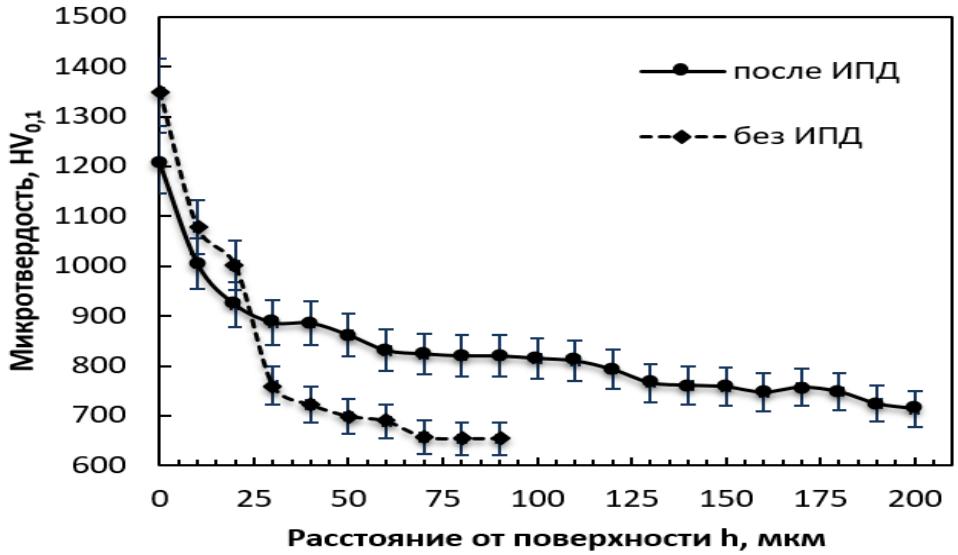



Рисунок 3. Изменение микротвердости по толщине диффузионной зоны.

Анализ структуры образцов после ионного азотирования в тлеющем разряде (рис. 2, а) показывает наличие сильно травящейся диффузионной зоны, представляющей собой α-фазу – азотистый феррит с ОЦК-решеткой, период которой изменяется в зависимости от содержания азота [3].

Структура образцов из стали Р6М5 после ИПД и ионного азотирования в тлеющем разряде (рис. 2, б) имеет более развитую темную диффузионную зону, чем у образцов, азотированных без предварительного ИПД.

Результаты измерения микротвердости по толщине диффузионной зоны на поперечном шлифе приведены на рис. 3.

Анализ результатов измерения микротвердости показал (рис. 3), что у образца после ИПД и последующего ионного азотирования прирост поверхностной микротвердости составил ~1,7 раза, а у образца без ИПД ~2 раза. Такое увеличение микротвердости обусловлено формированием в поверхностном слое нитридных фаз с высоким содержанием азота. Высокое содержание азота в поверхностных слоях обусловлено низким коэффициентом диффузии азота у стали, не прошедшей ИПД. Толщина диффузионного слоя у азотированного после ИПД образца в ~2 раза выше, чем после азотирования без предварительной ИПД.

## ВЫВОДЫ

1. Холодная ИПД инструментальной стали Р6М5 методом кручения устраняет полосчатость и строчечность, полученную при прокатке, и способствует дроблению и более равномерному распределению карбидов.

2. Азотирование с предварительным ИПД способствует получению азотированного слоя с наибольшей толщиной – в ~2 раза большей, чем при азотировании без ИПД, но приводит к некоторому снижению твердости слоя вследствие интенсивного протекания диффузионных процессов.

Список используемых источников

1. Хайретдинов Э.Ф., Рааб Г.И., Набиуллин А.А. и др. Формирование структуры и свойств в инструментальной быстрорежущей стали методом холодной интенсивной деформации и последующей термической обработкой // Material Physics and Mechanics. 2016. V.27, No.2. С.205-214.

2. Шайхутдинова Л.Р., Хайретдинов Э.Ф., Ситдиков В.Д. и др. Исследование влияния ионного азотирования на структуру и механические свойства инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 после ИПД // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21,. №4(78). С. 50-56.

3. Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Вафин Р.К., Хусаинов Ю.Г. Азотирование инструментальной стали Р6М5 в тлеющем разряде в скрещенных.

# ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТРЕПЕЛА КРАСНОСЛОБОДСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

**Мордасов Д.М., Мордасов М.Д., Лазутин А.В.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов,***
***mit@mail.nnn.tstu.ru***

Одной из основных целей государственной программы «Охрана окружающей среды, воспроизводство и использование природных ресурсов Тамбовской области» на 2013 - 2020 годы является обеспечение экономического роста и улучшение жизни населения области за счет развития и использования минерально-сырьевой базы региона.

Развитие промышленности строительных материалов и индустриального домостроения тесно связано с обеспечением строительного рынка области в достаточных объемах высококачественными, конкурентоспособными строительными материалами, изделиями и конструкциями местного производства. Следует отметить, что наличие и рациональное использование местных ресурсов является определяющим фактором регионального развития производства конкурентоспособных строительных материалов, изделий и конструкций на основе современных наукоемких технологий.

В настоящее время повышенным спросом пользуются отделочные, ремонтные и герметизирующие полимер-минеральные составы, эксплуатационные и функциональные свойства которых во многом определяются компонентным составом минеральной составляющей [1].

Одним из перспективных минеральных материалов, использующимся в составе строительных смесей, является трепел.

Трепел представляет собой опаловую породу осадочного происхождения с рыхлой структурой. Природный трепел используется для производства пеностекла, в качестве активной добавки в бетоны, а также при производстве теплоизоляционных изделий. Особенности кристаллической структуры трепела и его хорошая способность к измельчению позволяют ускорить процесс структурообразования в цементной системе и уменьшить время начала и конца схватывания цементного теста.

Следует отметить, что в отечественных работах приводятся исследования с использованием трепелов соответствующих конкретных регионов. В силу того, что в зависимости от места залегания, трепелы имеют различный химический состав, разработка технологий их использования в качестве добавок к строительным материалам требует дифференцированного подхода, основанного на всесторонних исследованиях состава, структуры и свойств [2-4].

В настоящей работе с целью обеспечения возможности применения трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области при создании композиционных материалов строительного назначения, осуществлен анализ его химического состава. Исследования проведены на базе ЦКП БГТУ им. В.Г. Шухова «Центр высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова» с использованием

рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. В табл. 1 представлены результаты анализа.

Таблица 1.

Результаты анализа химического состава трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области.

| Температура обработки, °С | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $K_2O$ | MgO | CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| без обработки | 79,01 | 10,79 | 3,83 | 2,09 | 1,38 | 0,92 |
| 200 | 82,16 | 8,55 | 3,57 | 2,01 | 1,42 | 0,57 |

Результаты исследований показывают, что доля диоксида кремния, представленного преимущественно аморфной фазой, превосходит его содержание в трепелах многих Российских месторождениях и месторождениях стран ближнего зарубежья. Термическая обработка трепела, как показывают данные табл. 1, позволяет снизить содержание большинства примесей и повысить долю $SiO_2$.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 19–43–680003.*

Список используемых источников

1. Мордасов Д.М. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д.М. Мордасов, П.В. Макеев, Д.Л. Полушкин, М.Д. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2019. Т. 25. № 1. - С. 136-141.

2. Мордасова Н.А. Особенности микроскопического исследования минеральных порошковых материалов / Н.А. Мордасова, Д.М. Мордасов // Современные технологии композиционных материалов. Материалы IV Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. - Уфа, 2019. - С. 68-70.

3. Мордасов М.Д. Особенности структурных изменений трепела при его термической обработке / М.Д. Мордасов, А.В. Никитин, Д.Л. Полушкин // XVII Всероссийская с международным участием школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова. Сборник материалов. - Черноголовка, ИСМАН. – 2019. – С. 139-141.

4. Мордасова Н.А. Изучение микроструктуры трепела Краснослободского месторождения Тамбовской области / Н.А. Мордасова, Д.О. Завражин, Д.М. Мордасов // XVII Всероссийская с международным участием школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова. Сборник материалов. - Черноголовка, ИСМАН. – 2019. – С. 142-144.

# ДАВЛЕНИЕ КАК СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТА Cu-Al: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

**Полякова П.В.[1], Баимова Ю.А.[1,2]**
*[1]-Башкирский государственный университет, г. Уфа, polina.polyakowa@mail.ru;*
*[2]-Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа.*

В последнее время внимание исследователей привлекают композиты на основе алюминия (Al) и меди (Cu), обладающие улучшенными механическими характеристиками. Механические свойства подобных систем в значительной степени зависят от формирования прочных интерметаллидных фаз, что происходит уже на стадии обработки. Особое значение для практического применения данного композита имеет высокая прочность. Особый вид композитов – это *in-situ* композиты, формирование которых происходит в процессе обработки, поэтому такие композиты считаются естественно сформированными. Получение *in-situ* композитов можно наблюдать при кручении под высоким давлением (КГД) с последующим отжигом [1-4]. Интенсивная пластическая деформация приводит к уменьшению зерна до наноразмеров, ускоряет диффузию, влияя на формирование интерметаллидных фаз.

В ходе экспериментов особенности структурных и фазовых превращений проанализировать довольно трудно, однако различные методы моделирования, например, метод молекулярной динамики (МД) позволяют исследовать фазовые превращения на атомарном уровне. В данной работе методом МД исследована динамика фазовых превращений в системе Cu-Al. На рис. 1 показана исходная структура системы Al-Cu в перспективе. Размер кристаллов во всех направлениях выбран одинаковым, при этом Al и Cu имеют гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку с параметром решетки соответственно $a_{Al}$ = 4,05 Å и $a_{Cu}$ = 3,615 Å. Такая атомная структура формируется путем непосредственного объединения двух совершенных кристаллов. Периодические граничные условия применяются во всех направлениях. Размеры кристаллов металлов выбраны таким образом, чтобы деформации, приложенные к ним, свести к минимуму, а также обеспечить периодические граничные условия и равновесие структуры. Для кристалла Cu $L_x = 55a_{Cu}$, $L_y \approx 100a_{Cu}$ и $L_z = 8a_{Cu}$; для кристалла Al - $L_x = 49a_{Al}$, $L_y \approx 100a_{Al}$ и $L_z = 7a_{Al}$. Расстояние между двумя кристаллами составляет 2,8 Å. Структура изначально была отрелаксирована при 300 К, в результате чего была найдена структурная конфигурация с минимальной потенциальной энергией.

Моделирование осуществляется с использованием бесплатного программного пакета LAMMPS. Для описания взаимодействия между атомами использовался межатомный потенциал EAM (embedded atom

method) [5]. В системе поддерживалось постоянство температуры 300 К с помощью термостата Носе-Хувера. К системе было приложено сжимающее давление вдоль $z$ в сочетании с деформацией сдвига $\sigma_{xy}$ при скорости деформации: $\dot{\varepsilon}$ = 0,0005. Кроме того, был проведен отжиг при 450 °C, который также ускоряет процесс фазовых превращений в данном композите.

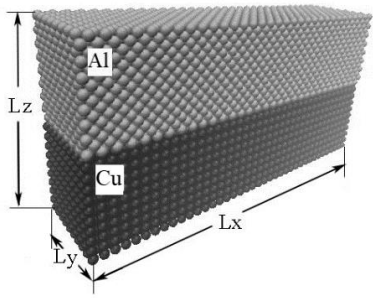



Рисунок 1. Исходная структура композита Cu-Al.

На рис. 2а представлено распределение компонент напряжения в процессе деформации посредством одноосного сжатия вдоль оси $z$ комбинированного с напряжением сдвига $\tau_{xy}$. Компоненты напряжения $\sigma_{xx}$, $\sigma_{yy}$ и $\sigma_{zz}$ изменяются аналогично, поэтому показана только $\sigma_{zz}$. Сдвиговые напряжения также представлены для сравнения, а для лучшего анализа представлено распределение напряжений на каждом атоме для $\varepsilon_{zz}$ = {0,005; 0,03; 0,05; 0,07} (рис. 2б).

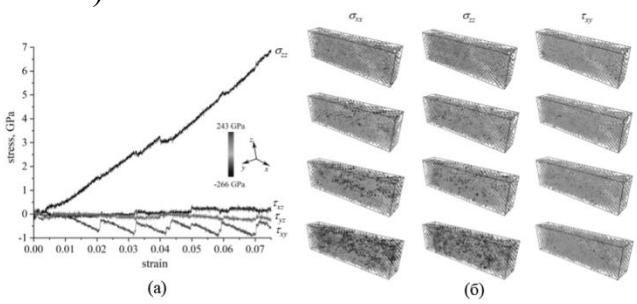



Рисунок 2. (а) Кривые напряжение-деформация. (б) Распределение напряжений на каждый атом при $\varepsilon_{zz}$ = {0,005; 0,03; 0,05; 0,07} для трех компонент напряжений.

Как видно из рис. 2б, первоначально, структура была отрелаксирована и имела как положительные, так и отрицательные значения напряжения. Сжимающее напряжение в процессе эксперимента постоянно растет с увеличением давления. Как видно из рисунка, компонента $\sigma_{xx}$ достигает отрицательных значений в алюминии уже при $\varepsilon_{zz}$ = 0,03 для сжатия в сочетании со сдвигом, это связано с большей мягкостью аллюминия по сравнению с медью.

На рис. 3 представлено изображение атомов Cu, после деформации и последующего отжига. Нижняя граница кристалла Cu показана над кристаллом Al, поскольку применяются периодические граничные условия. Как известно из экспериментальных исследований [1-4] при КГД наличие сдвиговых компонент облегчает структурные трансформации на границе

двух металлов. Видно, что при $\varepsilon_{zz} = 0{,}007$ (рис. 3 «деформация») больше атомов Cu перемещается в кристалл Al. Из рис. 3, где представлены снимки после отжига, можно увидеть, что атомы меди проникают еще глубже в кристалл Al. Из распределения напряжений внутри структуры (рис. 2) видно, что дополнительное напряжение сдвига позволяет более равномерно деформировать структуру.

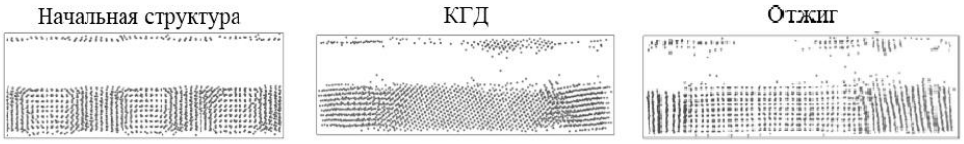



Рисунок 3. Расположение атомов в процесс обработки. Показаны только атомы меди.

Таким образом, МД моделирование используется для изучения на атомистическом уровне образования композита Al-Cu в результате пластической деформации. Предложенная модель является упрощением эксперимента [1-4]. Даже на основе достаточно простой модели можно сделать выводы о механизмах, лежащих в основе процесса формирования композитов: действие сдвиговых напряжений значительно облегчают диффузионный процесс.

**Поддержано грантом Российского научного фонда № 18–12-00440.*

Список используемых источников

1. Effect of annealing on the structure and phase composition of Al-Cu laminated metal-matrix composites produced by shear deformation under pressure / V.N. Danilenko, G.F. Korznikova, A.P. Zhilyaev, S.N. Sergeev, G.R. Khalikova, R.Kh. Khisamov, K.S. Nazarov, L.U. Kiekkuzhina, R.R. Mulyukov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 447 P. 012 – 021.

2. Al-Cu layered composites fabricated by deformation/ G.F. Korznikova, R.R. Mulyukov, A.M. Zhilyaev, V.N. Danilenko, R.Kh. Khisamov, K.S. Nazarov, S.N. Sergeyev, G.R. Khalikova, R.R. Kabirov// AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 2053. – P. 030-028.

3. An approach for fabrication of Al-Cu composite by high pressure torsion / V.N. Danilenko, S.N. Sergeev, J.A. Baimova, G.F. Korznikova, K.S. Nazarov, R. Kh. Khisamov, A.M. Glezer, R.R. Mulyukov // Materials Letters. – 2019. – V. 236. – P. 51-55.

4. Current achievements on superplasticity and related phenomena at the Institute for Metals Superplasticity Problems / R.R. Mulyukov, A.A. Nazarov, R.M. Imayev // Letters on Materials. – 2018. – V.8. – P. 510-516.

5. Simple analytical embedded-atom-potential model including a long-range force for fcc metals and their alloys / J. Cai and Y. Y. Ye // Physical Review B. – 1996. – V. 54 – P. 8398–8410.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ФОРМОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

**Дмитриев О.С., Баронин Г.С., Попов В.А., Худяков В.В.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: phys@nnn.tstu.ru***

Твердофазное формование изделий сложной геометрической формы из полимеров на современном этапе является одной из перспективных технологий. Наиболее пригодными для этой технологии являются фторполимерные нанокомпозиты модифицированные дисперсным наполнителем благодаря их пластичности. Такое свойство им придают наночастицы кобальта и титана, применяемые в качестве наполнителя [1]. Технология процесса производства изделий из фторполимерных нанокомпозитов включает в себя операции получения нанокомпозита, в которой происходит смешение полимерной матрицы с наночастицами, холодное прессование заготовки, спекание и объемная твердофазная штамповка изделия или формование.

Технологический процесс твердофазного формования, как правило, протекает при определенной температуре прессформы и скорости формования, потому что при твердофазном формовании за счет диссипации механической энергии может возникнуть перегрев заготовки и, как следствие, деструкция нанокомпозита. Поэтому, актуальной задачей является математическое моделирование процесса тепломассопереноса при твердофазном формовании, с целью дальнейшего расчета параметров процесса.

Технология твердофазного формования включает несколько операций. Сначала заготовку изделия из нанокомпозита с начальной температурой $T_{НК}$ помещают в прессформу и нагревают до температуры прессформы $T_{ПФ}$. Затем прикладывают технологическое давление $P$. В результате начинает протекать пластическая деформация и формование изделия с заполнением прессформы нанокомпозитом, повторяющим форму внутренней полости прессформы, которая может быть различной, от простых цилиндрических шайб до сложных шестерен с любой конфигурацией зубьев.

Для построения математической модели процесса тепломассопереноса при твердофазном формовании рассмотрим упрощенную задачу изменения формы цилиндрической заготовки в цилиндрической прессформе, и будем использовать теорию теплопереноса и упругопластического течения [2, 3]. При этом материал будем считать жесткопластическим, т.е. выполняется условие несжимаемости. Схема деформации заготовки при формовании представлена на рис.1.

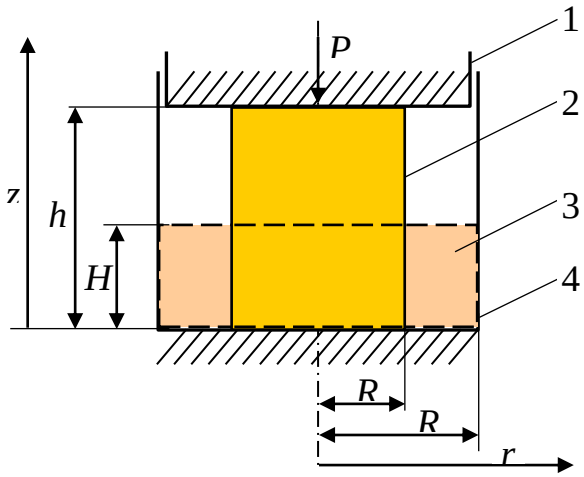



Рисунок 1. Схема деформации заготовки при формовании: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – изделие, 4 – матрица.

Исходная заготовка под действием давления $P$ заполняет прессформу. Её высота уменьшается от $h_0$ до $H$, а радиус увеличивается от $R_1$ до $R_2$. При этом деформируемая заготовка нагревается за счет тепла пластической деформации $Q(t)$ и работы сил трения поверхностей, зависящие от скорости деформации $\frac{dh}{dt}$. Поэтому время прессования $t_К$ должно быть выбрано так, чтобы скорость деформации не вызывала значительный перегрев заготовки. Таким образом, скорость прессования $\frac{dh}{dt}$ и температура прессформы $T_{ПФ}$ являются управляющими воздействиями и подлежат определению на основе математического моделирования.

Математическая модель процесса твердофазного формования изделий из нанокомпозита с учетом схемы расположения и деформации заготовки в прессформе представляет собой систему дифференциальных уравнений теплопроводности, изменения формы и диссипации механической энергии:

$$C_i(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_i\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q(t),$$

$$T\equiv T(r,z,t),\quad 0\le r<R_2,\quad 0<t\le t_К,$$

$$Q\ne 0,\ C_1\equiv C_1(T),\ \lambda_1\equiv\lambda_1(T),\ 0\le r<\hat{r}(t),\ 0\le z<h(t),$$

$$Q=0,\ C_2\equiv C_2(T),\ \lambda_2\equiv\lambda_2(T),\ R_1\le r<R_2,\ h(t)\le z<H,$$

$$T(r,z,0)=T_{НК},\ 0\le r<R_1,\ 0\le z<h(t),$$

$$T(R_1,h,t)=T_{ПФ},\ 0<t\le t_К,$$

$$\lambda_i\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=R_i-0}=\lambda_{i+1}\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=R_i+0},\quad 0<t\le t_К,\ i=1,2,$$

$$T(r,z,t)\big|_{r=R_i-0}=T(r,z,t)\big|_{r=R_i+0},\ 0<t\le t_К,\ i=1,2,$$

$$\lambda_i \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=h-0} = \lambda_{i+1} \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{r=h+0}, \quad 0 < t \le t_{\text{К}}, \ i = 1, 2,$$

$$T(r,z,t)\big|_{z=h-0} = T(r,z,t)\big|_{z=h+0}, \ 0 < t \le t_{\text{К}}, \ i = 1, 2,$$

$$\frac{dh}{dt} + \frac{2}{R}\sqrt{\frac{h^3}{H}}\frac{d\hat{r}}{dt} = 0, \ R_1 \le \hat{r}(t) \le R_2, \ h_0 \le h(t) \le H, \ 0 < t \le t_{\text{К}}$$

$$Q(t) = \frac{\gamma m}{2}\left(\frac{dh}{dt}\right)^2, \ \gamma = 0{,}84 \div 0{,}96,$$

где $C$ – объемная теплоемкость материала, Дж/(м$^3$·К); $h$ – толщина заготовки, м; $H$ – толщина готового изделия и полости прессформы, м; $i$ – номер технологического слоя 1, 2; $m$ – масса заготовки материала, кг; $Q$ – тепловой эффект диссипации механической энергии, Вт/м$^3$; $r$ – радиальная координата, м; $\hat{r}$ – радиус заготовки, м; $R$ – радиус изделия и прессформы, м; $t$ – время, с; $T$ – температура, К; $\gamma$ – коэффициент выхода тепла при пластической деформации; $\lambda$ – теплопроводность, Вт/(м·К).

Слои: 1 – заготовка, нанокомпозит - НК, 2 – прессформа - ПФ.

Параметры математической модели и характеристики нанокомпозита определяются экспериментально. В результате моделирования и расчетов получены диапазоны параметров прессования для получения изделий с улучшенными качественными характеристиками, которые на практике показали эффективность математического моделирования.

Список используемых источников

1. Баронин Г.С. Полимерные композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного нанодобавками / Г.С. Баронин, В.М. Бузник, В.В. Худяков, О.С. Дмитриев, В.Л. Полуэктов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. № 3. – С. 886-889.

2. Додин Ю.С. Расчет тепловыделения при сжатии заготовки без предварительного нагрева / Ю.С. Додин, М.Н. Каменский // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. №1. С. 93-100.

3. Дмитриев О.С. Тепломассоперенос при твердофазной штамповке полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена / О.С. Дмитриев, Г.С. Баронин, В.А. Попов, В.В. Худяков // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: Материалы X Международной научно-инновационной молодёжной конференции. 2018. С. 135-137.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРАХ

**Истомина Т.А., Рыжкин В.Ю.,Чупрынина С.А., Абрашкин П.А.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов teplotehnika@nnn.tstu.ru.***

Целью работы является создание алгоритмического и программного обеспечения информационно-измерительной системы (ИИС), реализующей метод выделения полезного сигнала при регистрации структурных переходов в полимерах. Для достижения указанной цели была поставлена и решена следующая задача – разработать алгоритмическое и программное обеспечения ИИС, реализующее метод выделения полезного сигнала при регистрации структурных переходов в полимерах.

Алгоритм методологии неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерных материалах разработан с использованием CASE-технологии по методологии структурного системного анализа и проектирования SADT и представлен в виде функциональных моделей AS-IS и TO-BE [1-6]. Диаграмма «Анализ температурных характеристик» выглядит следующим образом (рисунок 1).

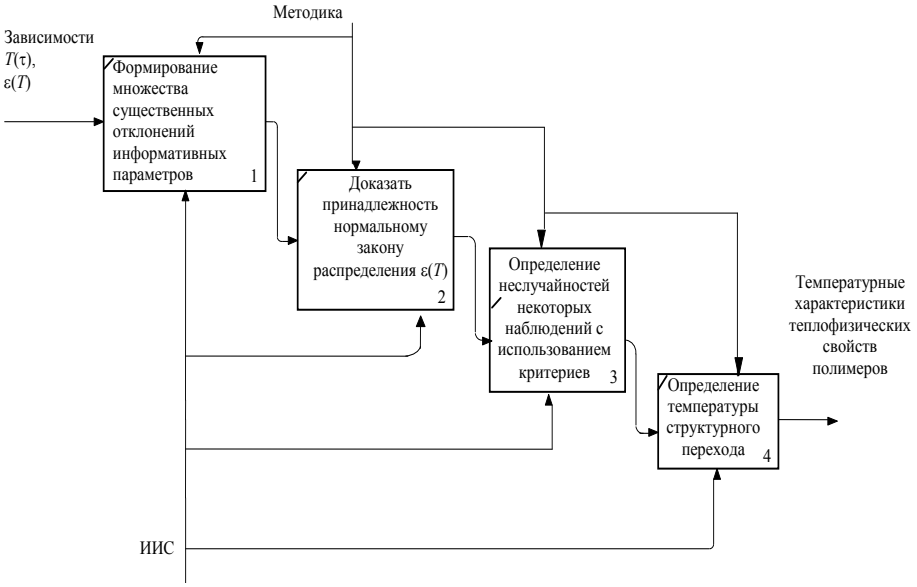



Рисунок 1. Диаграмма работы «Анализ температурных характеристик».

Диаграмма работы №3 «Определения неслучайностей некоторых наблюдений с использованием критериев» представлена на рисунке 2 в виде блок-схемы реализованной в программе MatLab.

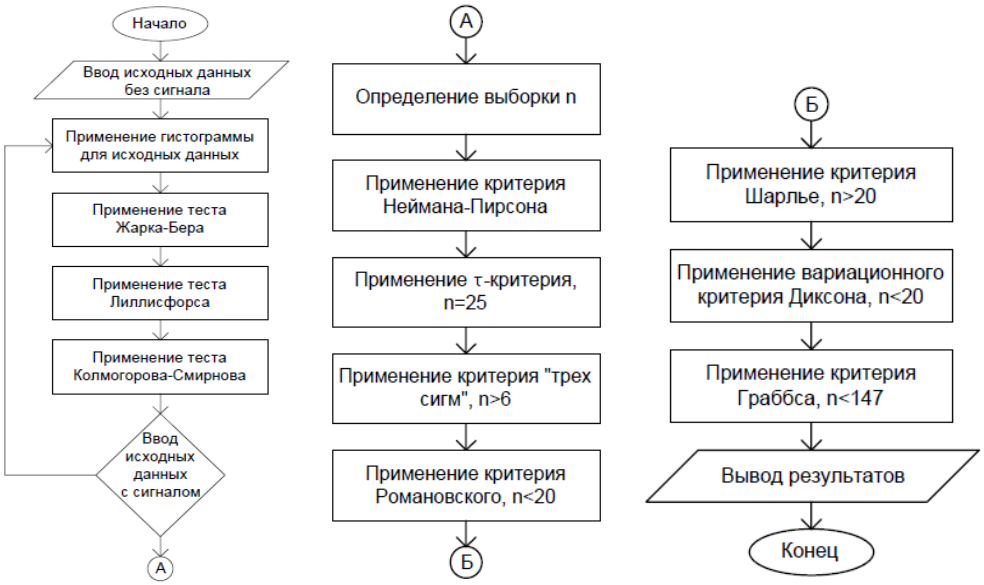



Рисунок 2. Алгоритм реализующий метод выделения полезного сигнала при регистрации структурных переходов в полимерах.

Для экспериментальной проверки разработанного метода и ИИС определяли температурные характеристики твердофазных полиморфных переходов в ПТФЭ, Ф4К20, Капролоне В и ПММА.

Результаты применения алгоритма для ПТФЭ (рисунок 3) представлены на рисунке 4.

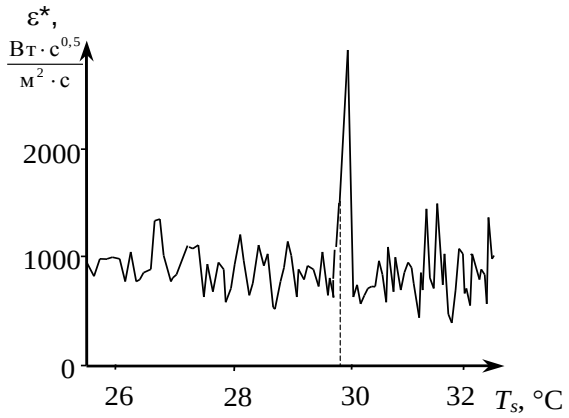
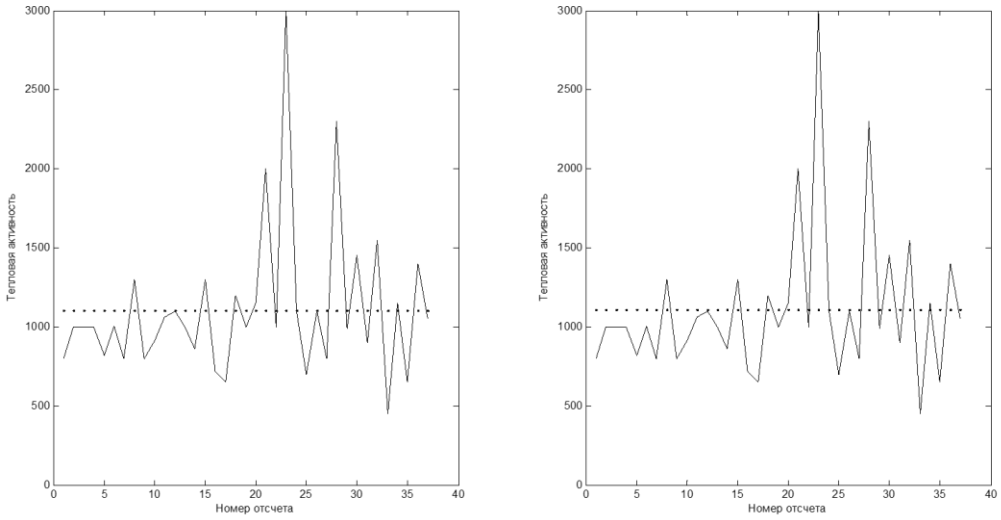



Рисунок 3. Зависимость $\varepsilon^*=f(T_s)$, построенная по термограмме, зафиксированной на изделии из ПТФЭ.




а) б)

Рисунок 4. Зависимость тепловой активности и порога по критерию Неймана-Пирсона (а) и математического ожидания (б).

Таким образом, показана возможность определения температурно-временных характеристик структурных переходов в полимерных материалах разработанным методом.

Список используемых источников

1. Балашов, А. А. Поиск структурного перехода в полимере на термограмме путем дискретной фильтрации/ А. А. Балашов, Н.Ф. Майникова, Н. П. Жуков // Приборы. – 2010. № 12(126). – С. 53–57.

2. Балашов, А. А. Эффект предплавления в кристаллах / А. А. Балашов, В. Н. Левин / Энергетика. Проблемы и перспективы развития // Третья всероссийская студенческая научная конференция. – Тамбов. Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2017. – С. 89 – 91.

3. Майникова Н.Ф. Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах/ Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, Н. П. Жуков, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2002. № 6. – С. 23.

4. Жуков Н.П. Метод неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерах / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, А.А. Балашов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. № 1-3(28). – С. 253-259.

5. Майникова Н.Ф. Неразрушающий способ исследований релаксационных переходов в полимерных материалах / Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, С.О. Васильев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. Т.20. № 1. – С. 34-41.

6. Балашов, А. А. Характеристики погрешностей при определении температуры структурных переходов в полимерах / А.А. Балашов, Д.С. Кацуба // Метрология. – 2014. № 9. – С. 36–42.

# ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПАН-ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ПОЛИАМИДНОГО КОМПОЗИТА НА ИХ ОСНОВЕ

**Волкова Е.С., Борисова Н.В., Устинова Т.П.**
***Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов, zheska.vorozheykina@mail.ru***

Эффективным способом повышения эксплуатационных свойств полимеров является их наполнение дисперсно-волокнистыми системами, а также использование современных технологий их совмещения. В работе для направленного регулирования основных эксплуатационных характеристик полимера предложено:

1. Введение в ПА-6 полиакрилонитрильных волокнистых систем. Выбор данной волокнистой системы диктуется наличием производственной базы в нашем регионе и доступностью в ценовом плане [1];
2. Использование метода полимеризационного совмещения компонентов, позволяющего сократить стадийность и экологическую напряженность технологического процесса, получить материалы с повышенным комплексом свойств за счет активной диффузии мономеров в наполнитель и его равномерного распределения в полимерной матрице при введении в реакционную среду на стадии синтеза полимера [2].

На первом этапе исследования изучены физико-механические свойства волокнистых наполнителей (табл. 1), анализ которых показал, что большими прочностными характеристиками отличается технический ПАН-жгутик, в технологии получения которого предусмотрено 20 - кратное ориентационное вытягивание, что обеспечивает увеличение относительной разрывной нагрузки. Кратность вытягивания ПАН - волокна составляет 6-8 раз.

Таблица 1.

Физико-механические свойства волокнистых наполнителей.

| Волокнистый наполнитель | Относительная разрывная нагрузка, сН/текс | Относительное разрывное удлинение, % |
|---|---|---|
| ПАН-ТЖ | 44,0 | 19 |
| ПАН-волокно | 21,0 | 55 |

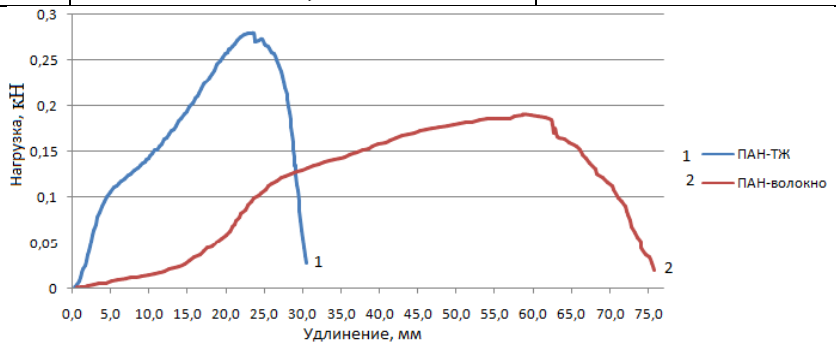



Рисунок 1. Кривые «нагрузка - удлинение» исследуемых волокнистых наполнителей.

Кроме того, ПАН-ТЖ обладает меньшей деформируемостью, что следует из анализа кривых «нагрузка-удлинение» (рис. 1, кривая 1).

Для оценки адгезионного сродства в системе мономер/волокно изучена смачиваемость волокнистого наполнителя раствором капролактама методом капиллярного поднятия жидкости (рис. 2).

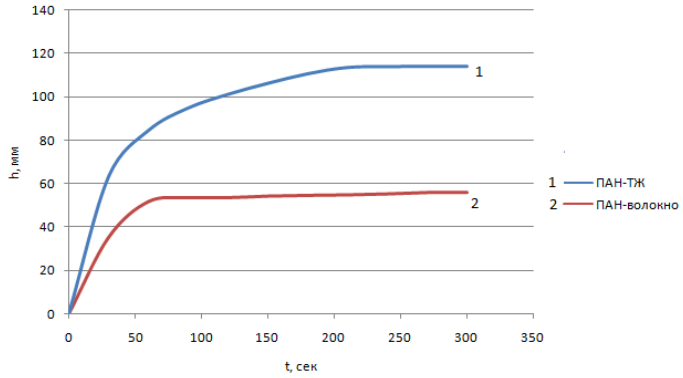



Рисунок 2. Зависимость смачивания волокнистого наполнителя от продолжительности обработки раствором КЛ.

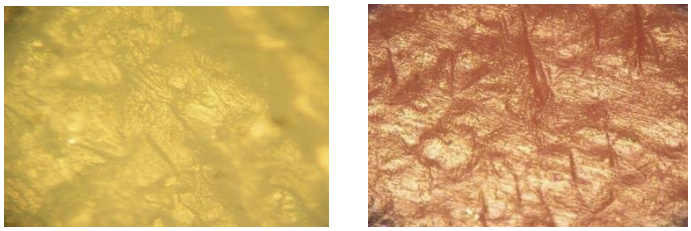
Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что смачиваемость исследуемого ПАН-волокна достигает равновесного состояния при продолжительности обработки более 200 секунд и величина поднятия жидкости составляет 55-57 мм, для ПАН-ТЖ высота капиллярного поднятия жидкости составляет 115-118 мм при продолжительности обработки 220 секунд. Отличие в смачиваемости объясняются различной топологией поверхности исследуемых волокнистых наполнителей. ПАН-волокно отличается большей объемностью, извитостью, затрудняющей подъем жидкости по высоте. ПАН-ТЖ, характеризующийся более гладкой поверхностью, обеспечивает лучшую смачиваемость.

Высокие прочностные характеристики и лучшая смачиваемость ПАН-жгутика раствором КЛ определяют целесообразность его использования для дальнейших исследований в качестве волокнистого наполнителя ПА-6.

На следующем этапе оценивалось влияние ПАН-ТЖ на равномерность его распределения в полимерной матрице и физико-механические свойства волокнонаполненного ПА-6 при степени наполнения 10%.

Для исследования характера распределения волокнистого наполнителя в объеме композитов использовалась оптическая микроскопия (рис. 3).

На микрофотографии скола ненаполненного ПА-6 (а) видно, что рельеф поверхности имеет складчатый характер с минимумом дефектов, полимер монолитен. Такой же рельеф наблюдается на микрофотографиях образцов, содержащих 10 % ПАН-жгутика (б). Проведенные оптические исследования показали, что при степени наполнения ПА-6 10% ПАН-ТЖ волокнистая структура в композите не сохраняется, что свидетельствует о том, что капролактам достаточно глубоко проник в дефектные поры ПАН-ТЖ, распределился в аморфных участках волокна – наполнителя, обеспечивая усиление взаимодействия в системе матрица-наполнитель, что способствует повышению физико-механических свойств композита (рис. 4).



а б

Рисунок 3. Микрофотографии образцов (n=200): а-ненаполненный ПА-6; б-ПА-6 с 10% ПАН-ТЖ.

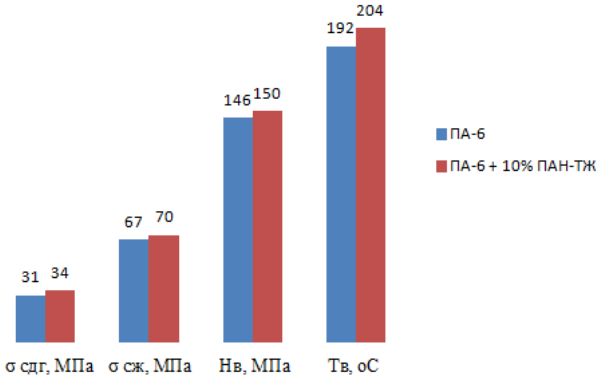



Рисунок 4. Физико-механические свойства полимеризационно наполненного полиамида-6 на основе 10% ПАН-ТЖ.

Анализ физико-механических свойств полученных композитов показал, что при введении в полимеризующуюся систему ПАН-жгутика проявляется тенденция к повышению твердости, прочности при межслоевом сдвиге и сжатии. Кроме того, введение в полимеризующуюся систему ПАН-ТЖ приводит к повышению теплостойкости получаемого композита.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что

- для полимеризационного наполнения ПА-6 целесообразно использовать ПАН-ТЖ, отличающийся высокими прочностными характеристиками и лучшей смачиваемостью раствором мономера по сравнению с ПАН-волокном;
- сравнительный анализ физико-химических и механических свойств композитов, полученных на основе ПА-6 и 10% ПАН-ТЖ, показал эффективность его применения в качестве армирующей системы;
- исследование структурных особенностей синтезированного композита методом оптической микроскопии показало, что при степени наполнения ПА-6 10% ПАН-ТЖ формируется новый композиционный материал, сочетающий в себе свойства поликапроамида и полиакрилонитрила.

Список используемых источников.

1. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К.Е. Перепелкин.-СПб: Научные основы и технологии. - 2009. - 532 с.

2. Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие.- 5 испр. и доп. изд./ под ред. А.А. Берлина.- Спб.: ЦОП «Профессия».- 2018.- 640 с.

# ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВАЛА И ДИСКА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ЗОНЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ИХ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ СО СДВИГОМ*

**Ахунова А.Х.[1,2], Валитов В.А.[1,2], Галиева Э.В.[1]**
*[1]-Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*
*[2]-Башкирский государственный университет, Уфа*
*akhunova_a@mail.ru*

Биметаллические конструкции находят широкое применение во многих отраслях авиа – и двигателестроения. Особый интерес для современного и перспективного двигателестроения представляет один из узлов малогабаритного газотурбинного двигателя (ГТД) типа диск-вал, при изготовлении отдельных деталей которого широко используются жаропрочные никелевые сплавы. Важной эксплуатационной характеристикой биметаллической конструкции является прочность, которая в немалой степени зависит от способов получения соединения, схемы СД, рельефа свариваемых поверхностей [1-2], геометрии соединяемых деталей, температурно-скоростных условий, с помощью которых осуществляется сварка, и исходной микроструктуры заготовок [3-4].

Наиболее перспективными из способов сварки являются методы диффузионной сварки и сварка давлением (СД) в условиях сверхпластичности (СП). Известно, что на качество соединения при СД существенное влияние оказывает напряженно-деформированное состояние в заготовке вблизи контактных поверхностей [5]. Применяемая обычно при СД деформация по схеме одноосного сжатия может приводить к возникновению в зоне ТФС соединяемых материалов неоднородного напряженно-деформированного состояния. Это в ряде случаев может приводить к неоднородности качества твердофазного соединения, обусловленного образованием пор в местах, где напряжения и степень деформации минимальны и, следовательно, к снижению прочности на отрыв сварных образцов. В качестве метода, позволяющего избежать подобных недостатков, может быть использована комбинированная схема СД, в которой присутствует сдвиговая компонента деформации. В этом случае обеспечивается максимальная сдвиговая пластическая деформация, которая достигает высоких значений в очень тонком слое вблизи контактной поверхности соединяемых деталей и, в основном, не затрагивает остальной объем материала, что очень важно для таких ответственных деталей авиадвигателя, как диск и вал.

В данной работе с помощью компьютерного моделирования рассматривается влияние исходной геометрии вала и диска из разноименных деформируемых никелевых сплавов ЭП975 и ЭК79 на напряженно-деформированное состояние соединяемых деталей в процессе СД, в которой

присутствует сдвиговая компонента деформации.

Компьютерное моделирование СД деталей типа вал и диск, конечно-элементная модель которых приведена на рис. 1, проводили с помощью пакета прикладных программ DEFORM-2D в осесимметричной постановке. При расчете рассматривалась половина всех образцов с учетом плоскости симметрии на левой границе расчетного блока. Деформируемые тела разбивали на двадцатиузловые изопараметрические конечные элементы с квадратичной аппроксимацией поля перемещений. Количество элементов диска – 2500, вала – 1700. При проведении компьютерного моделирования траверсы имели свойства абсолютно жесткого тела, диск и вал принимались упруго-пластичными. В качестве материала для диска и вала были выбраны жаропрочные деформируемые сплавы в мелкозернистом состоянии ЭП975 и ЭК79, соответственно. Материал задавался экспериментальными кривыми, полученными при одноосном сжатии сплавов при температуре сварки 1100°С. Значение коэффициента трения $k$ принимался равным 0,3.

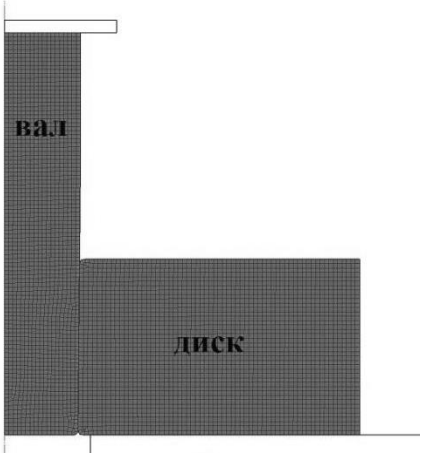



Рисунок 1. Конечно-элементная модель вала и диска.

Для определения влияния исходных геометрических параметров свариваемых образцов на пластическую деформацию в зоне соединения рассматривались четыре формы вала и диска. Вал в общем виде представлял собой цилиндр диаметром 12 мм и высотой 12 мм, сопряженный с усеченным конусом высотой 20 мм. Значение угла $\alpha$ между нижним основанием и образующей усеченного конуса составляло 0°, 1°, 2° и 3°. Отверстие в диске имело сужение с углом наклона на внутренней стенке, соответствующим конусности вала. Общая высота диска - 14 мм, а диаметр 28 мм.

При проведении моделирования СД диск устанавливался на неподвижную траверсу, и в отверстие диска помещалась коническая часть вала. Далее СД проводили по двум схемам движения вала: Схема 1 - внедрение вала в диск на 2,5 мм со скоростью деформации $10^{-3}$ $с^{-1}$; Схема 2 - комбинация внедрения и вращения вала, при которой вал внедрялся в диск на 2,5 мм со скоростью деформации $10^{-3}$ $с^{-1}$ и со скоростью вращения 3 об/мин.

При анализе результатов компьютерного моделирования рассматривалось распределение радиальных напряжений, поскольку сжимающие напряжения в зоне ТФС могут оказаться полезными и привести

к повышению прочности и надежности соединения за счет улучшения условий для образования физического контакта. Также было рассмотрено распределение сдвиговых компонент деформации, т.к. нормальные компоненты деформации слабо влияют на качество сварного соединения.

Можно сделать вывод, что для повышения качества сварного соединения вала и диска при всех рассмотренных схемах СД необходима конусность вала. Значение рационального угла конусности вала рекомендуется брать в интервале $0 < \alpha \leq 2^0$. При таком значении $\alpha$ заметного формоизменения вала и диска не происходит, поскольку пластические деформации очень малы, но увеличиваются максимальные сдвиговые деформации, и достигается более равномерное их распределение в зоне контактных поверхностей. При этом в случае СД, осуществляемой при комбинации внедрения и вращения вала, особое внимание следует уделить обработке свариваемых поверхностей, так как в случае большого трения возникает опасность подвергнуть вал большим пластическим деформациям.

**Моделирование и разработка схемы сварки давлением проведено при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685, а экспериментальные данные для моделирования получены по госзаданию № АААА-А17-117041310215-4.*

Список используемых источников

1. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Валитов В.А., Валитова Э.В. Локализация деформации в зоне сварки давлением поверхностей с различным рельефом // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 11. – С. 13-17.

2. Akhunova A. Kh., Valitova E. V., Dmitriev S. V., Valitov V. A., Lutfullin R. Ya. Mathematical modelling of the effect of the surface relief of specimens on the localisation of plastic deformation in the pressure welding zone // Welding International. 2016. Т. 30. № 6. С. 488-491.

3. Валитова Э.В., Ахунова А.Х., Валитов В.А., Дмитриев С.В., Лутфуллин Р.Я., 4. Мухаметрахимов М.Х. Моделирование процесса сварки давлением жаропрочного никелевого сплава с использованием ультрамелкозернистой прокладки // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 3 (15). С. 190-194.

4. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Галиева Э.В., Валитов В.А. Моделирование сварки давлением разнородных жаропрочных сплавов через ультрамелкозернистую прокладку // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 3. С. 289-292.

5. Валитов В.А., Ахунова А.Х., Галиева Э.В., Дмитриев С.В., Лутфуллин Р.Я., Жигалова М.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния и микроструктуры в зоне твердофазного соединения типа диск-вал из разноименных сплавов на основе никеля // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2 (26). С. 180-185.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

**Дмитриев О.С., Барсуков А.А., Дмитриев А.О.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: phys@nnn.tstu.ru***

Основными классами полимерных композитов (ПК), которые применяются в различных отраслях промышленности, являются стеклопластики, органопластики и углепластики. Для получения наилучших физико-механических свойств необходимо при производстве соблюдать заданные технологические режимы формования изделий, которые определяются в процессе разработки материала и пригодные, в основном, для тонкостенных изделий. При изготовлении крупногабаритных толстостенных изделий из ПК, учитывая их большие размеры и толщину монолитного материала, возникает необходимость корректировки технологического процесса формования композиционного материала [1].

Целью работы является демонстрация возможностей и перспективы использования метода математического и компьютерного моделирования для анализа термокинетического процесса и расчета оптимальных режимов отверждения полимерных композиционных материалов, на примере оптимизации режима отверждения плоских изделий из стеклопластика СТ-69Н в зависимости от толщины.

Проектирование оптимальных режимов отверждения изделий из ПК является сложной задачей, которое вызвано значительными трудностями, возникающими вследствие отсутствия теоретических разработок в области моделирования процесса отверждения ПК приемлемого для промышленного применения. Одним из подходов проектирования и окончательного выбора режима отверждения является эмпирический способ, который включает в себя лабораторные исследования некоторых зависимостей различных характеристик материала от режима отверждения, например, разрушающее напряжение при изгибе или растяжении в зависимости от температуры отверждения, реологические и диэлектрические свойства, и т.д. В нашем случае для определения реакционной способности связующего ЭДТ-69Н использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии. По результатам исследований выбирался режим формования композиционных материалов. Однако этот режим является ориентировочным и при изготовлении по нему толстостенных изделий требуется его коррекция или проектирование нового оптимального режима.

Этапами проектирования оптимального технологического режима отверждения являются постановка и решение задачи минимизации некоторого критерия оптимальности с использованием математической модели и ограничений технологического характера, налагаемых на решение.

Математическая модель строится в соответствие с применяемой технологией изготовления изделий из ПКМ [2, 3]. Характеристики материала, являющиеся параметрами математической модели, которые нужны для решения уравнений модели определяются экспериментально с использованием специальных методов и созданной нами информационно-измерительной системы (ИИС) исследования процесса отверждения композитов [4, 5]. ИИС, кроме того, позволяет многократно при разных технологических условиях численно моделировать температурно-конверсионные поля в процессе отверждения ПК, а также визуализировать их в виде 3D поверхностей, что позволяет наблюдать и выявлять различные особенности и неравномерности процесса отверждения, принимать правильное решение при проектировании оптимального режима.

С использованием ИИС были выполнены расчеты оптимальных режимов отверждения стеклопластика СТ-69Н, а также на основе численного моделирования процесса был проведен анализ существующих регламентных режимов отверждения пластин толщиной до 10 мм. Итогом этого анализа являлась оценка пригодности регламентных режимов отверждения для изготовления более толстых пластин, например толщиной 30 мм. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

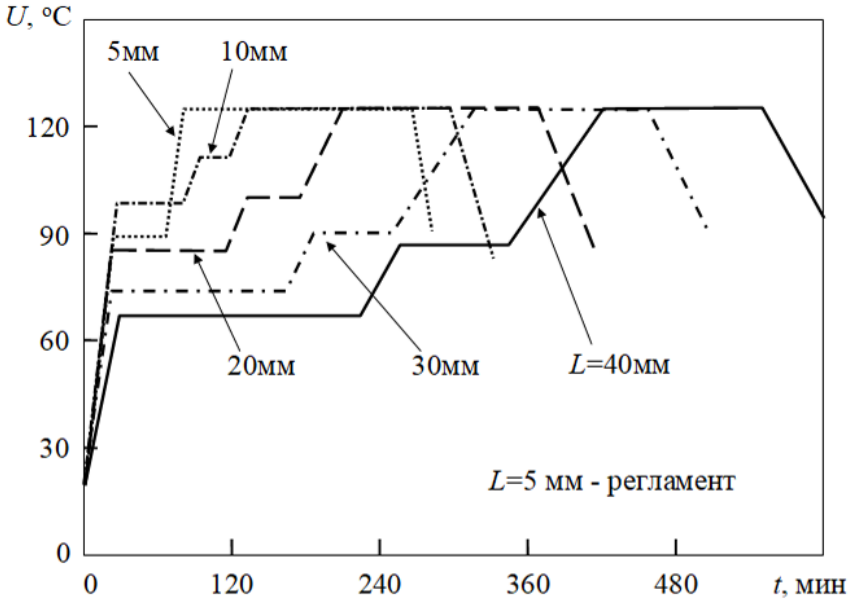



Рисунок 1. Оптимальные режимы отверждения изделий различной толщины $L$ из стеклопластика СТ-69Н.

На основе анализа проведенных численных расчетов температурно-конверсионных полей сделан вывод, что в целом регламентный режим является пригодным для изготовления пластин толщиной до 10 мм. При толщине материала $L$=10 мм максимальный перегрев $\Delta T$ и максимальный модуль градиента температуры $G$ составляют соответственно: на первой ступени $\Delta T_1$=1,52 К, $G_1$=0,59 К/мм, на второй ступени $\Delta T_2$=2,34 К, $G_2$=0,90 К/мм. При отверждении материала толщиной $L$=30 мм по регламентируемому режиму значения $\Delta T$ и $G$ достигают соответственно на

первой ступени $\Delta T_1$=12,2 K, $G_1$=1,52 K/мм, на второй ступени $\Delta T_2$=25,2 K, $G_2$=2,58 K/мм, что является совершенно недопустимым.

Представленные результаты показывают невозможность использования регламентного температурно-временного режима отверждения ПК, рекомендованного для тонких изделий, при отверждении изделий из ПК толщиной более 10 мм. Обоснована необходимость коррекции регламентного режима или его оптимизация для получения качественных толстостенных изделий из полимерных композитов.

Список используемых источников

1. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Дмитриев А.О., Зуев А.В. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов // Тепловые процессы в технике. 2013. № 10. С. 467-475.

2. Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Дмитриев А.О. Метод исследования параметров течения связующего при отверждении композитов // Вестник ТГТУ. 2005. Т. 11. № 1. С. 53-61.

3. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Мищенко С.В., Дмитриев А.О. Тепломассоперенос и кинетика отверждения полимерного композиционного материала при автоклавном вакуумном формовании изделий // Инженерная физика. 2010. №9. С. 3-12.

4. Дмитриев О.С., Живенкова А.А., Дмитриев А.О. Интеллектуальная информационно - измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов // Вестник ТГТУ, 2013, Том 19. № 1. - С. 73-83.

5. Мищенко С.В., Дмитриев О.С., Пучков Н.П., Шаповалов А.В. Автоматизированная система исследования процесса отверждения композиционных полимерных материалов // Промышленная теплотехника. 1989. Т.11, № 5. С.79-84.

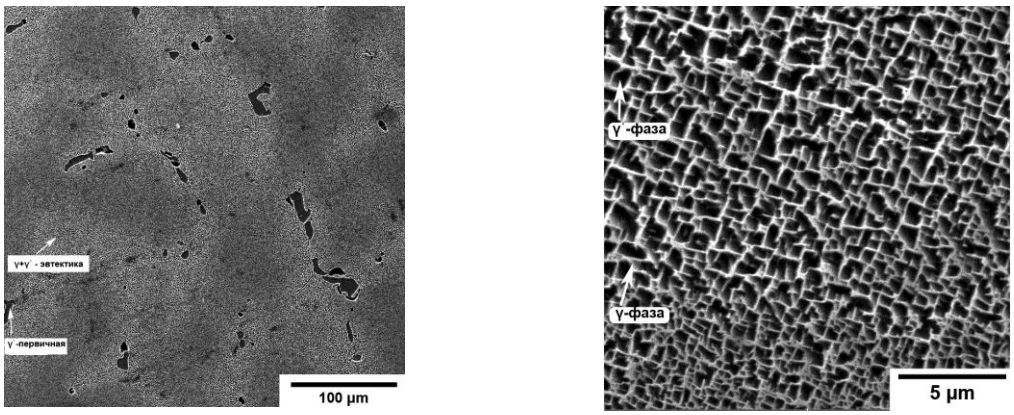
# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОГОСПЛАВОВА ВКНА-25 ПРИ 1000 °С МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО В ПРИБЛИЖЕНИИ ЖЕСТКОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ*

**Халиков А.Р.[1], Галиева Э.В.[2], Дмитриев С.В.[2], Валитов В.А.[2]**
*[1]-Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, 450000, ул. Карла Маркса, 12*
*[2]-Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, 450001, ул. Халтурина, 39*

Жаропрочные интерметаллидные сплавы могут обладать уникальными физико-механическими свойствами (жаропрочностью, сопротивляемостью окислению, коррозии и др.). Среди способов соединения металлов и суперсплавов можно назвать диффузионную сварку, диффузионную сварку через расплавленный слой, сварку плавлением, сварку трением, диффузионную сварку в жидкой фазе, сварку трением с перемешиванием и т.д. При твердофазном соединении разнородных металлов нередко образуются нежелательные интерметаллидные фазы, снижающие механические свойства деталей. Одним из способов прогнозирования нежелательных интерметаллидных фаз является компьютерное моделирование структуры сплавов, которое, позволяет до эксперимента выявить нежелательные для данного сплава интерметаллидные включения. Подобное моделирование сплавов позволяет достигать требуемой структуры сплава, следить за формированием интерметаллидных включений и их распределением по объему сплава, добавлять те или иные элементы, изменять температуру процесса упорядочения, менять энергии связей пар атомов. В данной работе мы ограничимся моделированием структуры жаропрочных сплавов ВКНА-25.

Представлена теоретическая модель, позволяющая изучать процесс диффузии в металлах и сплавах по вакансионному механизму [1-5]. В качестве примера рассмотрена двумерная квадратная решетка, в узлах которой могут располагаться атомы трех различных металлов. Расчеты проводятся в модели твердых сфер, при описании межатомных взаимодействий парными потенциалами.

На рисунке 1 показаны структуры сплавов ВКНА-25 (а,б) Здесь γ’ фаза, представляющая собой интерметаллид $Ni_3Al$, имеет темный цвет, а твердый раствор легирующих элементов в $Ni_3Al$, имеющий светлый цвет, это γ фаза.



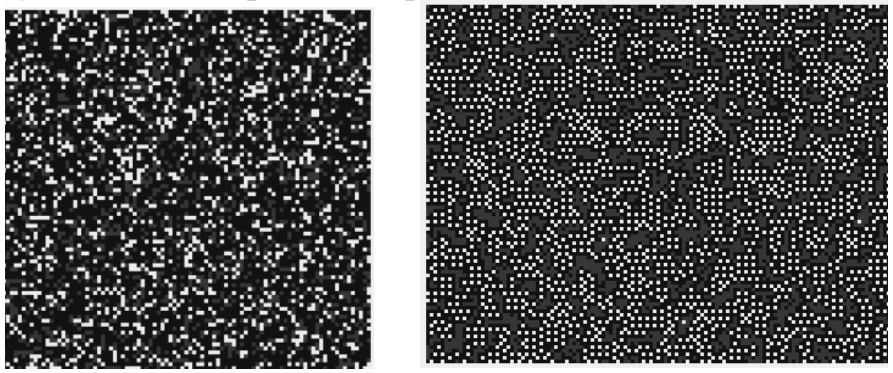

(а) (б)

Рисунок 1. Микроструктура интерметаллидных сплавов ВКНА-25 (а,б).

Математическая модель процесса диффузии в сплаве осуществляетя по вакансионному механизму в модели твердых сфер, которая может быть применена к трехкомпонентному сплаву состава $A_mB_nC_k$, заданному на решетке любого типа и любой размерности. В модели принимается, что диффузия в сплаве осуществляется по вакансионному механизму.

Для моделировани многокомпонентных сплавов мы разбиваем все элементы на три группы. К первой группе относится никель, вторая группа объединяет интерметаллид-образующие элементы алюминий и титан, а в третью гркппу входят все легирующие элементы. Назовем эти группы по их основным элементам, то есть первая группа – это Ni, вторая – Al, а третья – Cr. Таким образом, для сплава ВКНА-25 имеем следующее суммарное содержание этих трех групп элементов: Ni – 71,185 масс.%, Al – 8,9 масс.%, и Cr – 19,915 масс.%. Далее необходимо массовые проценты перевести в атомные используя молярные массы элементов (г/моль). Межатомные взаимодействия описываются потенцилом Морзе.

Моделирование процесса диффузии проводилось при температруре 1000 °C. Результат моделирования представлен на рисунке 2.



(а) (б)

Рисунок 2. Полностью разупорядоченная структура жаропрочного сплава (а) ВКНА-25, и после упорядочения (б) сплава при 1000 °C (Черный – Ni, Светлый – Al, Серый – Cr).

На рисунке 2 представлена структура сплава ВКНА-25. Из полностью разупорядоченного сосстояния (рис.2 (а)) при температуре 1000 °C структура

в процессе длительного отжига перешла в упорядоченное состояние (рис.2 (б)). Основа сплава Ni образует интерметаллидную фазу $Ni_3Al$, при этом хром выделился в отдельную фазу.

Полученные результаты будут использованы при моделировании диффузионной сварки этих сплавов. Представленная теория обобщает работы [6-8], где исследовались бинарные сплавы, на случай трехкомпонентного сплава.

## БЛАГОДАРНОСТИ

**В.А. Валитов и Э.В. Галиева выражает признательность за поддержку Российскому научному фонду грант No 18-19-00685.*

Список используемых источников

1. Андрухова О.В., Козлов Э.В., Дмитриев С.В., Старостенков М.Д. О возможных механизмах атомного разупорядочения в бинарных сплавах // Физика твердого тела. – 1997. – Т.39. – № 8. – С. 1456–1460.
2. Iskandarov A.M., Dmitriev S.V. Possible energy states of stoichiometric AB alloys based on fcc, bcc, and sc lattices // Crystallography Reports. – 2012. – V.57, No.5. – P. 746–750.
3. Kistanov A.A., Iskandarov A.M., Dmitriev S.V. The equilibrium states of A1-xB1+x binary alloys in the hard-sphere and pair-binding model // Russian Physics Journal. – 2012. – V.54, No.10. – P. 1128– 1136.
4. Халиков А.Р. Допустимые изменения параметров дальнего порядка для двумерных структур стехиометрических составов A2B, A3B A3B5 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2011. – Т.8, №.4. – С. 109–116.
5. Starostenkov M.D., Chaplygina A.A., Chaplygin P.A. Influence of antiphase boundaries on structural and energy characteristics of alloy Cu3Pt5 // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – V.9, No.4. – P. 566–569.
6. Potekaev A.I., Chaplygina A.A., Chaplygin P.A., Starostenkov M.D., Kulagina V.V., Klopotov A.A. Structural-phase features of low-stability pretransitional states of bcc-alloys with complexes of planar defects (antiphase boundaries) // Russian Physics Journal. – 2018. – V.61, No.3. – P. 412– 427.
7. Лобзенко И.П., Халиков А.Р., Шарапов Е.А., Корзникова Е.А., Семенов А.С., Дмитриев С.В. Моделирование методом Монте-Карло процесса диффузионной сварки двух металлов через прокладку // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 47-54.
8. Халиков А.Р., Шарапов Е.А., Корзникова Е.А., Потекаев А.И., Старостенков М.Д., Галиева Э.В., Дмитриев С.В. Моделирование методом Монте-Карло процессов диффузии в трехкомпонентных сплавах // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 4 (736) . – С. 119-124.

# ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ОТ ФОРМЫ НАКОНЕЧНИКА ИНСТРУМЕНТА

**Ахунова А. Х., Имаев М. Ф., Валеева А. Х.**
***Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г.Уфа, akhunova_a@mail.ru***

Сварку трением с перемешиванием (СТП) широко применяют для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых сплавов. Согласно данной технологии сварка листовых заготовок металла производится с помощью сил трения, создаваемого инструментом [1-3], состоящим из заплечика и наконечника. Наконечник внедряется в стык заготовок на глубину, приблизительно равную их толщине так, чтобы заплечик коснулся поверхности заготовок.

Для выбора оптимальной геометрии наконечника на основе расчета перемещения и скорости перемещения точек материала в листовых заготовках из алюминиевого сплава АМг6 проведено моделирование сварки трением с перемешиванием в среде широко используемого инженерного программного продукта DEFORM-3D.

Поведение материала заготовки из алюминиевого сплава АМг6 описывали с помощью модели Джонсона-Кука, входящей в стандартную библиотеку DEFORM-3D:

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\varepsilon_p)^n\right]\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon_p}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right], \quad (1)$$

где $A$ - предел текучести, $B$ - коэффициент деформационного упрочнения, $n$ - показатель деформационного упрочнения, $C$ - параметр скоростной чувствительности, $m$ - коэффициент термического разупрочнения, $T$, $T_r$ , $T_m$ – текущая температура, комнатная температура и температура плавления материала заготовки.

В качестве значений параметров модели были использованы значения, найденные для зарубежного аналога AA5083 [4]: $A$ = 167 МПа, $B$ = 596 МПа, $n$ = 0,551, $C$ = 0,001, $m$ = 0,859, $T_r$ = 293 К, $T_m$ = 893 К.

В целях уменьшения погрешности расчета теплофизические свойства сплава АМг6 были приняты постоянными и равными значениям, достигаемым в материале при температуре $600^0$С. Данная температура близка к средней температуре данного сплава в ходе СТП. Задавались следующие физические постоянные: плотность - 2640 кг/м$^3$; теплопроводность – 122 Вт/(м×К); теплоемкость при постоянном давлении – 0.922 кДж/(кг×К).

При сварке заготовки задавали условия теплообмена с окружающей средой. Начальная температура заготовки, инструмента и окружающей среды

составляла 20°С. Со всех внешних поверхностей была задана конвекция с коэффициентом теплопередачи 11 Вт/(м$^2$·К).

Инструмент принимался абсолютно жестким телом, поскольку предел текучести его материала намного выше, чем у заготовки. В качестве материала для инструмента выбрали инструментальную сталь AISI-D2. Рассмотрели наконечники в форме цилиндра и усеченного конуса с углом уклона конуса $\alpha$ - 10, 20 и 30$^o$ (рис. 1). Диаметр нижней части наконечника во всех случаях составлял 2 мм. Коэффициент трения принимали равным 0.5.

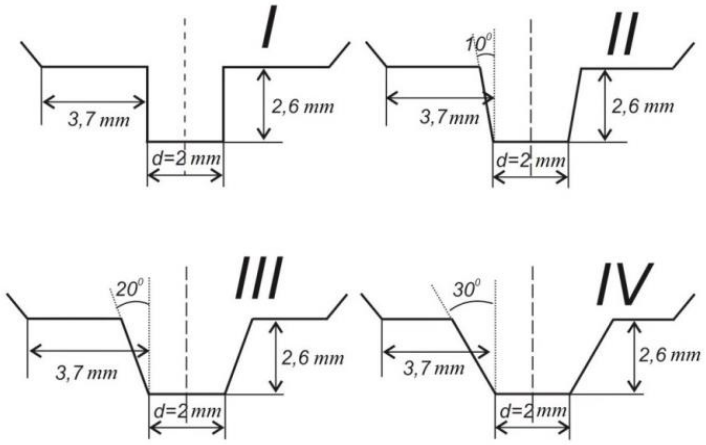



Рисунок 1. Рассматриваемые профили наконечников.

По эпюрам распределения перемещений точек заготовки можно сделать вывод, что для всех $\alpha$ максимальные перемещения наблюдаются в верхней области заготовки. Это связано с тем, что первоначально в контакт с инструментом (заплечиком) вступает поверхность заготовки. Благодаря возникновению сил трения поверхность заготовки начинает сильно нагреваться, и, за счет совместного силового воздействия, происходит пластическая деформация. Далее вслед за верхними слоями перемешиванию подвергается материал в средней области заготовки в зоне контакта с наконечником. Материал в нижней области заготовки практически не участвует в перемешивании. Для $\alpha$=0$^o$ и $\alpha$=10$^o$ в поперечном направлении к сварному шву величина перемещений не превышает 3.50 мм. С увеличением $\alpha$ значения перемещений увеличиваются, возрастает неоднородность их распределения вдоль оси наконечника. Для $\alpha$=20$^o$ и 30$^o$ перемещения вблизи заплечика достигают соответственно 4.38 и 5.25 мм, в то время как в нижней части наконечника перемещения для этих углов составляют всего 1.75 мм. Данный факт можно объяснить тем, что с увеличением угла уклона конуса увеличивается площадь наконечника и уменьшается площадь заплечика, что приводит к росту смещений в поперечном направлении к сварному шву.

Известно, что при СТП основной ввод энергии в соединение осуществляет заплечик, в то время как наконечник способствует распространению тепла и пластической деформации по толщине заготовки, а также интенсифицирует процесс активации свариваемых поверхностей [4]. Течение материала к корню сварного шва создает дополнительное давление сжатия, благодаря чему происходит уплотнение (проковка) металла. В этой

связи более благоприятной для СТП считается та форма наконечника, которая осуществляет наибольшее перемещение материала заготовки в вертикальном направлении, т.е. в сторону корня сварного шва.

Таким образом, наконечник с $\alpha=10^{o}$ следует считать наиболее эффективным. Распределение скоростей и перемещений частиц у такого наконечника более равномерное, чем у наконечников с $\alpha=20^{o}$ и $\alpha=30^{o}$. Наконечник с $\alpha=10^{o}$ позволяет не только осуществить достаточно большое число оборотов частиц заготовки, что улучшает качество перемешивания, но и реализовать максимальные перемещения по вертикали в направлении корня шва, что увеличивает область перемешивания. Наконечник с $\alpha=10^{o}$ позволяет также получить наиболее симметричный шов.

## ВЫВОДЫ

1. На основе компьютерного моделирования в программной среде DEFORM-3D установлено, что течение материала зависит от формы наконечника и отличается по толщине заготовки.

2. Наиболее эффективным для СТП является наконечник в форме усеченного конуса с углом уклона конуса $10^{o}$, т.к. он обеспечивает хорошее перемешивание в плоскости заготовки, максимальное перемещение материала по направлению к корню шва, а также позволяет получать наиболее симметричный шов.

**Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН.*

Список используемых источников

1. Mironov S., Sato Y. S., Kokawa H. Friction-stir welding and processing of Ti-6Al-4V titanium alloy: A review.//Journal of Materials Science & Technology. 2018 V.34, I.1, pp. 58-72. DOI:10.1016/j.jmst.2017.10.018.

2. Elyasi M., Derazkola H. A., Hosseinzadeh M. Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. of Engineering Manufacture. 2016 V.230, I.7, pp. 1234-1241. DOI: 0.1177/0954405416645986.

3. Ramachandran K. K., Murugan N., Shashi Kumar S. Effect of tool axis offset and geometry of tool pin profile on the characteristics of friction stir welded dissimilar joints of aluminum alloy AA5052 and HSLA steel.// Materials Science and Engineering: A. 2015 V.639, pp. 219-233. DOI: 10.1016/j.msea.2015.04.089.

4. Clausen A.H., Børvik T., Hopperstad O.S., Benallal A. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality// Materials Science and Engineering: A. 2004 V.364, pp. 260-272.

5. R. Jain, S. K. Pal, S. B. Singh. A study on the variation of forces and temperature in a friction stir welding process: a finite element approach //Journal of Manufacturing Processes. 2016 V. 23, pp. 278-286. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.04.008.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПЕТЕЛЬ НА ПОРАХ В ГЦК КРИСТАЛЛЕ ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Липунов В.Н.[1], Маркидонов А.В.[2]**
*[1]-Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул;*
*[2]-Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета, Новокузнецк,*
markidonov_artem@mail.ru

Известно, что радиационное воздействие на твердые тела сопровождается интенсивным дефектообразованием. Системы первичных радиационных дефектов являются нестабильными, и в ходе релаксации структуры образуют различные нанокластеры, в частности нанопоры, присутствие которых в материале может оказывать значительное влияние на его функциональные характеристики. Одной из актуальных задач радиационного материаловедения является прогнозирование поведения кристаллических тел в условиях интенсивного радиационного воздействия, в частности очень важной является проблема предотвращения радиационного распухания материала.

В условиях эксплуатации материал подвергается различным силовым, вибрационным и температурным нагрузкам. Кроме того, радиационное распухание способствует созданию неоднородных напряжений в конструкционных узлах, что может способствовать выходу их из строя. Наличие внутренних сжимающих и сдвиговых напряжений, достигающих критических значений, способствует залечиванию поры по дислокационному механизму, реализуемому путем срабатыванию источника Франка-Рида [1]. Эмиссия дислокационных петель в кристаллах, содержащих поры, наблюдается также и при ударном воздействии на твердое тело [2]. Ранее авторами исследовались процессы структурных перестроек нанопор сферической и цилиндрической формы [3-7] при наличии нормальных напряжений в кристалле.

Целью данной работы является исследование методом молекулярной динамики процессов зарождения дислокационных петель на порах при наличии касательных напряжений.

Численные эксперименты проводились на расчетной ячейке, моделирующей кристалл золота, и состоящей из 32000 частиц. В системе координат, сопоставленной с расчетной ячейкой, оси *X*, *Y* и *Z* соответствовали кристаллографическим направлениям [1-10], [11-2], и [111] соответственно. Межчастичное взаимодействие описывалось с использованием потенциала, рассчитанного в рамках метода погруженного атома [8]. Для создания поры в расчетной ячейке предварительно выделялась сферическая область, центр которой совмещался с центральным узлом

моделируемой кристаллической решетки, и затем удалялись все атомы, принадлежащие ей. Напряженное состояние в расчетной ячейке, с отличной от нуля девиаторной компонентой тензора напряжений τ, достигалось путем сдвигового деформирования. Геометрия расчетной ячейки при этом поддерживалась с помощью комбинации жестких и периодических граничных условий. После конструирования следовала процедура релаксации структуры и полученная таким образом система частиц использовалась в последующем исследовании.

В ходе исследования было определено изменение потенциальной энергии расчетной ячейки в процессе релаксации при варьировании угла сдвига γ по различным направлениям. Среди множества возможных способов реализации сдвиговой деформации были выбраны два: сдвиги параллельно плоскости (111) вдоль направления [1-10] ($\varepsilon_{xz}$) и вдоль направления [11-2] ($\varepsilon_{yz}$). Очевидно, что увеличение угла сдвига приводит к росту потенциальной энергии моделируемой системы. При γ = 0.1 рад. наблюдается понижение потенциальной энергии, что свидетельствует о структурных изменениях, произошедших в расчетной ячейке. Визуальное исследование показало, что в данном случае наблюдается гетерогенное зарождение дислокационной петли на свободной поверхности поры с последующим ее развитием (см. рис.1). Рост петли продолжался до границ расчетной ячейки. Визуализация петли на приведенном рисунке осуществлялась путем исключения из отображаемых частиц тех атомов, энергия связи которых соответствует идеальной кристаллической решетки. Отметим, что представлены результаты численного эксперимента на расчетной ячейке, содержащей нанопору из 1080 вакансий. Эксперименты проводились с порами различного размера, но на рисунке 1 приведены наиболее наглядные результаты.

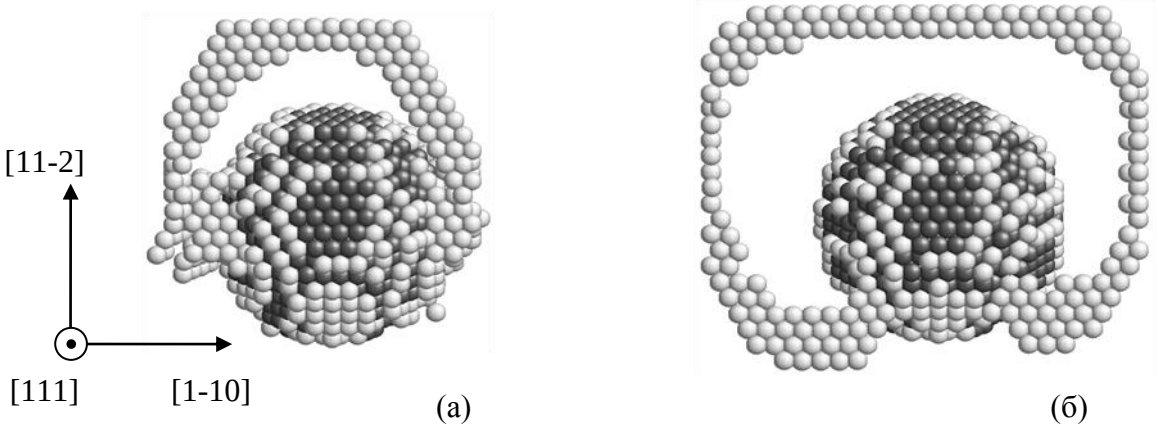



Рисунок 1. Визуализация процесса роста дислокационной петли при сдвиговой деформации $\varepsilon_{yz}$ (γ = 0.1 рад). Температура расчетной ячейки 300 К. Представлены результаты через 1.25 (а) и 2.5 (б) пс эксперимента. Частицы, выделенные темным цветом, образуют поверхность поры.

Зарождение дислокационной петли реализуется по следующему механизму. Под воздействием касательных напряжений у поверхности поры

формируются области напряжений, в которых наблюдается локальное искажение кристаллической решетки. Далее в этих областях осуществляется смещение группы атомов по направлению к поре, с зарождением частичной дислокации и формированием дефекта упаковки, который продолжает расти и расширяться, пока не достигнет границы расчетной ячейки. Вторая область напряжений у поверхности поры также является источником формирования частичной дислокации за счет сдвига.

Описанный выше механизм зарождения дислокационной петли на поверхности поры, предполагающий кооперативный сдвиг группы атомов, согласуется с механизмом, описанным в работе [9], в которой авторы делают вывод, что для ГЦК металлов испускание порами дислокаций путем идеального сдвига является энергетически выгодным процессом.

Список используемых источников

1. Петров А.И., Разуваева М.В., Синани А.Б., Никитин В.В. Влияние статистического и динамического сжатия на залечивание пор в меди // Журнал технической физики. 1998. Т.68. №11. С.125-127.

2. Davila L.P., Erhrt P., Bringa E.M., Meyers M.A., Lubarda V.A., Schneider M.S., Becker R., Kumar M. Atomistic modeling of shock-induced void collapse in copper // Applied Physics Letters. 2005. Vol.86. Iss.16. Pp.161902(3).

3. Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Павловская Е.П. Структурные превращения вакансионых пор под воздействием ударных волн // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. Вып. 4. Ч. 2. С. 1743-1744.

4. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Павловская Е.П., Яшин А.В., Медведев Н.Н., Захаров П.В. Структурная трансформация вакансионных пор в деформированном кристалле под воздействием ударных волн // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т.10. №4. С.563-571.

5. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Павловская Е.П. Влияние послекаскадных ударных волн на структурные трансформации вакансионных пор // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. №3. С.370-377.

6. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Яшин А.В., Захаров П.В. Изучение структурных трансформаций пор цилиндрической формы методом молекулярной динамики // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т.11. №2. С. 163-173.

7. Маркидонов А.В., Старостенков М.Д., Полетаев Г.М. Трансформация нанопор в золоте в условиях термоактивации и воздействия звуковых и ударных волн // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т.79. №9. С.1233-1237.

8. Johnson R.A. Alloy Models with the Embedded-atom Method // Physical Review B. 1989. Vol.39. No17. Pp.12554-12559.

9. Бобылев С.В., Морозов Н.Ф., Овидько И.А. Испускание дислокаций порами в нанокристаллических металлах // Физика твердого тела. 2007. Т.49. Вып.6. С.1044-1049.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ДИСПЕРСИИ

**Мордасов М.Д., Лазутин А.В., Мордасов Д.М.**
***Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов***
***mit@mail.nnn.tstu.ru***

При создании новых композиционных материалов широкое применение находят полимеры. Благодаря своим физико-механическим свойствам, полимерная составляющая в композитах отвечает, прежде всего, за их целостность, за передачу и распределение напряжений в наполнителе и определяет химическую стойкость, огнестойкость и другие эксплуатационные свойства. При использовании полимеров в качестве матрицы композиционных материалов они, заполняя пространство между твердым наполнителем (минеральные порошки, металлические частицы, древесная стружка и т.п.), обеспечивают их прочное сцепление, а также деформативность (способность изменять размеры и форму без нарушения целостности материала) [1, 2].

Для достижения требуемого комплекса свойств в полимерных матрицах часто используют смеси полимеров, вещества, ускоряющие или замедляющие процессы полимеризации или высыхания, сшивающие полимерные добавки и другие модификаторы. Как правило, физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии многокомпонентных полимерных материалов, сложны, а получение на их основе аналитических зависимостей связывающих конечные свойства полимера с содержанием отдельных компонентов практически невозможно.

Большинство исследователей к выбору оптимальных концентрационных параметров подходят эмпирически, путем проведения большого числа экспериментов с последующим анализом экспериментальных данных.

Нами проведены исследования механизма влияния сиккативирующей добавки на процесс пленкообразования стирол-акриловой дисперсии с целью выбора оптимальных концентраций этой добавки.

Рассматриваемый процесс является сложным ввиду одновременного протекания процессов испарения дисперсионный фазы и коалесценции частиц дисперсной фазы. В связи с этим решалась задача изучения динамики твердения дисперсии и выявления степени влияния и изменения её физико-химических свойств.

В результате высокоскоростной съемки процесса растекания твердеющий капли установлено, что кривые переходного процесса, представляющие собой зависимости параметров капли $\frac{r}{h}$ ($r$ – радиус смоченной поверхности, $h$ – высота капли) или $\theta$ (краевой угол смачивания) от времени $t$, имеют вид характерный для апериодического звена второго

порядка. С целью выяснения физической сущности инерционных элементов в составе этого звена, а также степени влияния имеющих место физических эффектов на переходной процесс пленкообразования в условиях испарения дисперсной и коалесценции дисперсионной среды, нами с использованием метода аналогий осуществлено моделирование, для чего построена физическая модель растекающейся капли в виде проточной пневматической камеры и получена ее математическая модель (рис. 1).

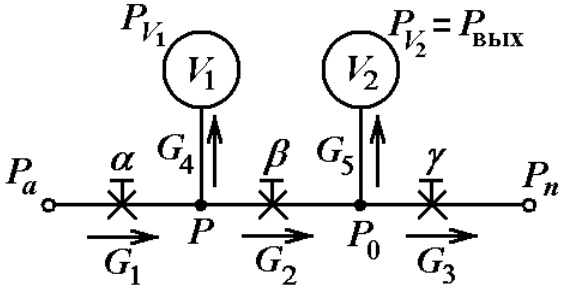



Рисунок 1. Физическая модель растекающейся капли.

При описании рассматриваемого процесса будем считать, что он протекает при неизменной температуре, т.е. изотермически.

Согласно выбранной нами физической модели, движущей силой процесса испарения жидкости является разность давлений под слоем жидкости разделяющей жидкую и газовую фазы $P_0$ и над поверхностью раздела жидкой и газовой фаз $P_n$. Дроссель γ представляет собой аналог свободной поверхности жидкости, с которой происходит испарение. По мере образования пленки на поверхности капли, уменьшается площадь жидкой поверхности и растет сопротивление потоку $G_3$ испаряющихся молекул.

Сиккатив способствует переносу кислорода воздуха в пленкообразующее вещество, который взаимодействует с метиленовыми группами пленкообразователя. Дроссель α представляет собой аналог молекул сиккатива участвующих в окислительно-восстановительных реакциях и формирующих поток $G_1$ кислорода из окружающего пространства внутрь капли.

В результате протекания окислительно-восстановительных реакций снижается свободная поверхностная энергия частиц дисперсной фазы, что приводит к увеличению давления $P$ в тонком поверхностном слое жидкости между частицами.

Дроссель β представляет собой аналог совокупности тонких прослоек дисперсионной среды между частицами полимера. За счет уменьшения расклинивающего давления $P_р = P_0 - P$ в тонких жидких пленках между частицами дисперсной фазы, начинается процесс коалесценции, в результате которого высвобождаются молекулы жидкой фазы, составляющей пленки, увеличивается поток $G_2$ этих молекул в свободный объем жидкости $V_2$.

Накопительный элемент $V_1$ представляет собой общий объем дисперсионной фазы, заключенной между частицами полимера, $V_2$ – объем дисперсионной фазы на поверхности капли, высвобождающийся в результате коалесценции частиц дисперсной фазы.

По мере формирования на поверхности капли твердого слоя растет поверхностное натяжение на границе раздела «жидкость-газ», увеличивается сила вязкого сопротивления растеканию и давление $P_{V2} = P_{вых}$. Процесс растекания заканчивается, когда на поверхности капли формируется твердый слой и сумма сил поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость-газ» и вязкого сопротивления превышает суммарное действие сил тяжести и межфазного натяжения на границе «твердое тело - газ». Математическое описание процессов в пневматической системе, представленной на рис.1, имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dP_{V_1}}{dt} = \dfrac{\beta RT}{V} P_{вых} - \dfrac{(\alpha+\beta)RT}{V} P_{V_1} + \dfrac{\alpha RT}{V} P_a, \\ \dfrac{dP_{вых}}{dt} = \dfrac{\beta RT}{V} P_{V_1} - \dfrac{(\beta+\gamma)RT}{V} P_{вых} + \dfrac{\gamma RT}{V} P_n, \end{cases},$$

откуда

$$P_{вых}(t) = B\left(1 + \frac{C}{D-C} e^{-Dt} - \frac{D}{D-C} e^{-Ct}\right),$$

где *B, C, D* - коэффициенты, зависящие от постоянных времени элементарных инерционных звеньев, входящих в состав рассматриваемого апериодического звена второго порядка.

Полученная переходная функция адекватно описывает процессы, происходящие в реальной системе при растекании испаряющейся и коалесцирующей капли, и позволяет глубже понять сущность происходящих процессов и вклад от каждого из них в динамику растекания.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 19–43–680003.*

Список используемых источников

1. Мордасов Д.М. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д.М. Мордасов, П.В. Макеев, Д.Л. Полушкин, М.Д. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2019. Т. 25. № 1. - С. 136-141.

2. Мордасов М.Д. Исследование структуры полимерного композиционного материала / М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов // Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием Сборник материалов конференции. - 2018. - С. 464-466.

3. Мордасов М.Д. ИК-спектроскопия полимерного композиционного материала / М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов // Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов. - 2018. - С. 349-350.

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРА ПРОВОДЯЩИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПО ПРОИЗВОДНЫМ ТУННЕЛЬНОГО ТОКА

**Хачатурова Т.А.[1], Горпенюк Д.В.[2]**
*[1]-Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк,*
khachaturovat@mail.ru
*[2]- Донецкий национальный технический университет, Донецк*

Одной из наиболее важных характеристик туннельного контакта является зависимость его дифференциальной проводимости: $\sigma(V)=\frac{dJ(V)}{dV}$, где $V$ напряжение смещения, поданное на туннельный контакт. Каким должно быть идеальное поведение этой характеристики детально исследовалось как теоретически, так и экспериментально [1-7]. В настоящее время повсеместно признано, что в идеальном случае в области промежуточных напряжений, от нескольких сот милливольт до вольта, эта характеристика представляет собой параболу, которую можно представить в виде [5]:

$$\sigma(V)=\alpha V+\beta V^2$$

Любое отклонение от такого поведения рассматривается как аномальное поведение.

На рисунке 1 представлена зависимость туннельной проводимости $\sigma(V)$, рассчитанная на небольшом участке напряжений, для симметричного туннельного контакта металл-изолятор-металл. По формулам для туннельного тока работы [6], при нулевой температуре:

$$J(V)=K*eV\int_0^{E_F-eV}P(E_Z,V)dE_Z+K*\int_{E_F-eV}^{E_F}(E_F-E_Z)*P(E_Z,V)dE_Z \qquad (1)$$

где коэффициент $K=\frac{2\pi me}{h^3}$, где $m$ и $e$ - масса и заряд свободного электрона соответственно, $h$ - постоянная Планка.

Представленная часть кривой вполне может быть частью большой параболы. Возникает естественный вопрос: как хорошо зависимость на рисунке 1 подчиняется формуле (1). Чтобы ответить на этот вопрос необходимо провести анализ второй производной $\frac{d^2J(V)}{dV^2}$ или $\frac{d\sigma(V)}{dV}$. Полагая, что если $\sigma(V)$ подчиняется зависимости (1), то $\frac{d^2J(V)}{dV^2}$ должна быть прямой линией.

Проведенный нами анализ зависимости второй производной туннельного тока по напряжению смещения исследуемого контакта, при различных параметрах потенциального показал, что кривая на рисунке 1 действительно является частью параболы ветви, которой направлены вверх.

В настоящее работе мы утверждаем, что вторая производная туннельного тока является более удобной для исследования свойств туннельных контактов, поскольку её расчет не представляет особого труда, а экспериментальное

измерение этой особенности давно является рутинным делом [5]. Так, например, известно, что под действием электрического поля происходят процессы миграции заряженных ионов. В работе [8] указывается, что такие процессы могут вызывать изменение высоты туннельного барьера вплоть до несколько вольт. Хорошо известно, что эти процессы никак не влияют на качественное поведение дифференциальной проводимости. Она как была, так и остаются параболической. Наш анализ показывает, что те же изменения вызывают существенные изменение угла наклона во второй производной. Увеличение толщины барьера также находит отражение на этой кривой. Если в результате миграций толщина барьера увеличится, то исследуемая нами характеристика несколько изменит свой тангенс угла наклона.

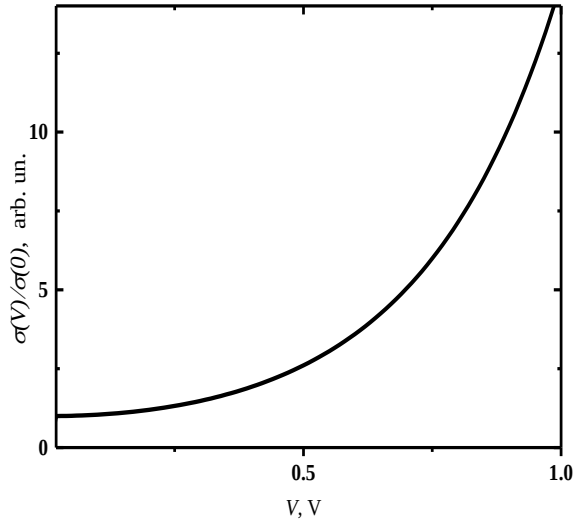



Рисунок 1. Проводимость симметричного туннельного контакта металл-изолятор-металл при расчетных параметрах зонной структуры: $E_F = 5eV$, толщина потенциального барьера: $d = 2нм$, $\varphi = 2.5eV$ - высота.

Список используемых источников

1. Tunneling phenomena in solids ed. by E. Burstein and S. Lundqvist, Platinum press New York, (1969).

2. Principles of electron tunneling spectroscopy, E.L. Wolf, Oxford university press, Oxford, (1985).

3. Т.А. Хачатурова, А.И.Хачатуров, ЖЭТФ, 134, Вып.5, 1006, (2008).

4. Т.А. Хачатурова, М.А. Белоголовский, А.И. Хачатуров, Письма в ЖЭТ, 91, Вып. 8, 442, (2010).

5. В.М. Свистунов, И.А. Хачатуров., М.А. Белоголовский, О.И. Черняк, ФНТ, 22, 605, (1996).

6. R.B Floyd., D.G. Wamsley, J.Phys.C: Solid State Physics 11, 4601, (1978).

7. А.И. Хачатуров, Письма в ЖЭТФ, 82, Вып.10, 728, (2005).

8. Д.К. Никифоров, А.П. Коржавый, К.Г. Никифоров, Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, 79, 153, (2009).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА ДЛЯ ПОЛИМЕРОВ

**Чупрынина С.А., Абрашкин П.А., Истомина Т.А., Рыжкин В.Ю.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*** ***teplotehnika@nnn.tstu.ru***

Обычно под задачей со свободной границей понимают задачу, в которой требуется дать динамическое описание некоторой среды, которая может находиться либо в одной, либо в двух различных фазах (например, лед и вода). Свободной границей, как правило, называют поверхность раздела фаз между областями, занимаемыми различными фазами. В случае же однофазной задачи, понятно, что свободной границей является граница области, занимаемой рассматриваемой средой. Свободная граница перемещается со временем и ее позиция априори неизвестна. Такого рода задачи имеют глубокое прикладное значение во многих областях науки, не только в физике, но также и в математике. Первая математическая модель процессов, связанных со свободной границей была предложена Стефаном. В этой задаче требуется решить уравнение теплопроводности для температуры в каждой из областей с различными фазами, которое дополнено специальными условиями на свободной границе, а также начальными и граничными условиями.

Проведение численного эксперимента по изучению тепловых эффектов при плавлении различных полимерных материалов.

Постановка задачи Стефана имеет следующий вид в виде следующих уравнений (1) – (6).

$$d_z \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \bar{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted}, \quad (1)$$

$$d_z \rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} + d_z \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \bar{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_\rho + d_z Q_{vd}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho(\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u} = \nabla \cdot \left[ -\rho l + \mu\left(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T\right)\right] + \bar{F}, \quad (3)$$

$$\rho_0 \Delta H \bar{v} \cdot \bar{n} = (\Phi_l - \Phi_s)\bar{n}, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 \beta (T - T_z),$$

$$T = T_0, \quad (5)$$

$$-n \cdot q = 0, \quad (6)$$

где $\bar{q} = -d_z k \nabla T$; $\rho \nabla \cdot (u) = 0$; $u = 0$; $\rho$ – плотность; $C_p$ – теплоемкость; $T$ – температура; $\bar{q}$ – вектор теплового потока; $\bar{u}$ – вектор скорости; $P$ – давление; $F$ – сила; $\Delta H$ – скрытая теплота плавления; $\bar{v}$ – скорость фронта; $\bar{n}$ – нормальный вектор; $\Phi_l$ и $\Phi_s$ – тепловые потоки жидкой и твердой фаз.

Результаты численного исследования для материала полиэтилена высокого давления (ПЭВД) представлены ниже [1-6]. Используем программу

COMSOL Multiphysics Модуль CFD для решения поставленной задачи (1) – (6).

В таблице 1 представлены физические свойства ПЭВД.

Таблица 1.

Физические свойства ПЭВД.

| Параметры | Название | Значение |
|---|---|---|
| $\lambda$ | Теплопроводность | 0,32 Вт/(м·К) |
| $C_p$ | Удельная теплоемкость | 1800 Дж/(кг·К) |
| $\beta$ | Коэффициент теплового расширения | $3{,}5 \cdot 10^{-4}$ 1/К |
| $\nu$ | Кинематическая вязкость | 0,0044 м$^2$/с |
| $\rho$ | Плотность | 900 кг/м$^3$ |
| $\Delta H$ | Скрытая теплота плавления | 75850 Дж/кг |
| $Tf$ | Температура плавления | 373 К |
| $Tc$ | Температура горячей стенки | 376 К |
| $Tк$ | Температура холодной стенки | 371 К |
| $p$ | Избыточное давление | 100 Па |

Предполагается что начальное распределение температуры линейно.

Результаты моделирования по математической модели представлены ниже. Диапазон изменения времени от 0 до 10000 секунд. Профиль температуры представлен на рис. 1 совместно с графиком теплового потока. Профиль скоростей в области жидкой фазы представлен на рис. 2.

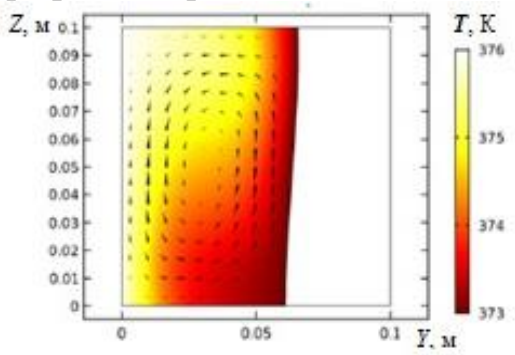



Рисунок 1. Температурный профиль в конце моделирования ($\tau$ = 10000 с).

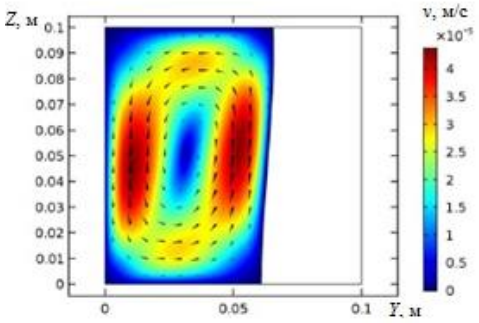



Рисунок 2. Профиль скоростей в жидкой фазе ($\tau$ = 10000 с).

Таким образом, данные параметры при численном исследовании давали в результате решение численной задачи Стефана различный профиль свободной границы при плавлении:

– время исследования изменялось от 0 до 10000 секунд с шагом 100 секунд;

– избыточное давление во всех материалах составляло 100 Па;

– температура горячей стенки изменялась в пределах от $T_{пл}$ до $T_{пл}$ плюс 3К;

– температура холодной стенки изменялась в пределах от $T_{пл}$ минус 5К до $T_{пл}$.

Список используемых источников

1. Балашов, А.А. Поиск структурного перехода в полимере на термограмме путем дискретной фильтрации/ А.А. Балашов, Н.Ф. Майникова, Н.П. Жуков // Приборы. – 2010. № 12(126). – С. 53–57.

2. Балашов, А.А. Эффект предплавления в кристаллах / А.А. Балашов, В.Н. Левин / Энергетика. Проблемы и перспективы развития // Третья всероссийская студенческая научная конференция. – Тамбов. Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2017. – С. 89 – 91.

3. Майникова, Н.Ф. Об одном методе исследования твердофазных переходов в полимерах / Н.Ф. Майникова, Ю.Л. Муромцев, Н.П. Жуков, А.А. Балашов // Пластические массы. – 2002. № 6. – С. 23.

4. Жуков, Н.П. Метод неразрушающего контроля температурных характеристик структурных переходов в полимерах / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, И.В. Рогов, А.А. Балашов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2010. № 1-3(28). – С. 253-259.

5. Майникова, Н.Ф. Неразрушающий способ исследований релаксационных переходов в полимерных материалах / Н.Ф. Майникова, А.А. Балашов, С.О. Васильев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. Т.20. № 1. – С. 34-41.

6. Балашов, А.А. Характеристики погрешностей при определении температуры структурных переходов в полимерах / А.А. Балашов, Д.С. Кацуба // Метрология. – 2014. № 9. – С. 36–42.

# МЕТОДЫ ИННОВАЦИОННОГО МЕНЕДЖМЕНТА В СФЕРЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Калюжная Е.С.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»***

Неотъемлемой частью современного менеджмента является инновационный процесс, позволяющий создавать и распространять инновации.

Необходимость развития инновационного процесса связана с тем, что под воздействием современных высоких технологий и изменений в экономике, формируются новые потребности и выявляются проблемы, решить которые возможно лишь путем создания и внедрения новых разработок и способов производства, что и составляет основу инновационной деятельности.

Инновационная деятельность в свою очередь неотрывно связана с инновационным менеджментом, поскольку технологии и методы инновационного менеджмента определяют процесс управления инновациями.

Вначале отметим, что инновационная деятельность представляет собой деятельность, которая направлена на использование результатов научных исследований и разработок в целях расширения и усовершенствования качества производимой продукции, совершенствования технологий ее изготовления. В свою очередь инновационный менеджмент – это система управления инновациями,

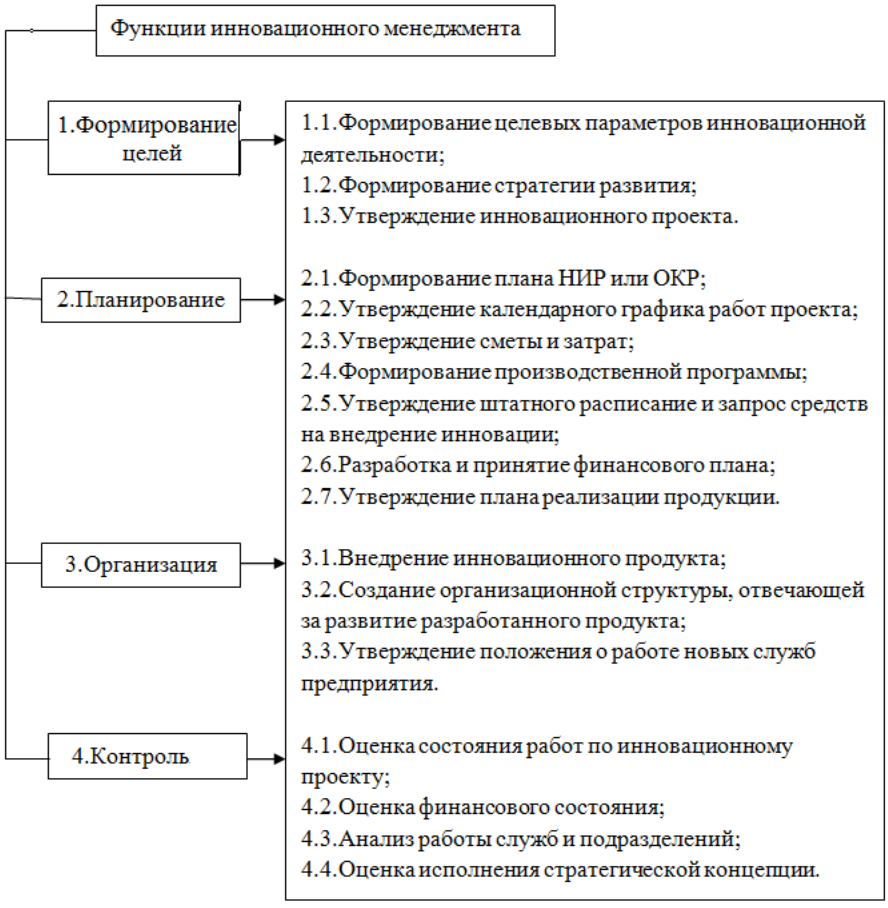



Рисунок 1. Основные функции инновационного менеджмента.

инновационным процессом и отношениями, которые возникают и происходят в процессе внедрения инноваций.

Обобщенную цель инновационного менеджмента можно сформулировать как: определение направлений производственной и научно-технической деятельности предприятия в сферах, основанных на внедрении, модернизации и совершенствовании продукции [3].

В рамках поставленной цели инновационный менеджмент выполняет следующие функции (рисунок 1) [1].

Рассмотрим ключевые методы инновационного менеджмента в сфере высоких технологий (таблица 1) [2]:

Таблица 1.

Методы инновационного менеджмента.

| Наименование метода | Описание |
|---|---|
| Метод принуждения | Основывается на законодательных актах региона и страны в целом, методических документах предприятия и вышестоящей инстанции, на планах, проектах, программах, заданиях руководства. |
| Метод пробуждения | Берет свою основу в максимально возможной оптимизации управленческого решения, в мотивации персонала предприятия, для достижения конечных результатов инновационной деятельности. |
| Метод убеждения | Базируется на изучении психологии личности и ее потребностях. |
| Метод целевого тонирования и управления | Сущность такого метода заключается в создании сетевого графика, которых отражает модель всех видов деятельности предприятия, целью которых является выполнение заданий. Такой метод служит для составления рационального решения производственной задачи, которое подразумевает ее решение в кратчайшие сроки и с минимальными затратами. |
| Метод прогнозирования | Берет свою основу из проведенного анализа информации о прогнозном развитии технологии. |
| Метод анализа | Проявляется в анализе изменения параметров исследуемой технологии и выводе закономерностей, характеризующих эти изменения. |

В заключение всего вышеизложенного, стоит отметить особенности инновационного менеджмента [4]:

1. Занимаясь инновационным менеджментом, приходится иметь дело с уникальной разновидностью ресурсов – научными, техническими и интеллектуальными достижениями;

2. Инновационный менеджмент выделяется своей системностью, так как внедрение различных дисциплин требует решения множества задач, и как следствие структурированности.

3. Главной задачей такого менеджмента можно назвать формулировку верных вопросов и составление наилучших методик, способных решить возникшую проблему. В связи с этим инновационный менеджмент обязан быть максимально творческим и рассматривать проблему целиком.

4. Менеджер, занимающийся инновациями, должен быть специалистом который способен выполнять нестандартные задачи.

В заключении стоит сказать, что любая инновация направлена на повышение конкурентоспособности компании в современной рыночной среде. Долгое время происходил рост инвестиций компаний в технологические и продуктивные разработки, однако, в настоящее время решающим фактором является развитие организационно-управленческих инноваций.

Список используемых источников

1. Алтухов С.И., Инновационный менеджмент: учеб.-метод. Пособие/С.И. Алтухов.-Новосибирск:СГГА,2018 г.-68с.

2. Барышева А.В., Инновационный менеджмент: учебное пособие /А.В. Барышева.- М: Изд-во «Дашков и К», 2017г.—3-е изд..—384с.

3. Маннапов А.Р., статья: Специфика современного инновационного менеджмента [Электронный ресурс]:- Загл. с экрана.- Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/v/spetsifika-sovremennogo-innovatsionnogo-menedzhmenta.

4. Мартиросян А. С., Баранников М. М. Проблемы развития инновационного менеджмента на предприятиях /А.С. Мартиросян, М.М. Баранников.- М: Изд-во «Молодой ученый», 2016г.—№20.—358-361с. https://moluch.ru/archive/124/34244/.

# ФОРМИРОВАНИЕ ЛИДЕРСКИХ КАЧЕСТВ СПЕЦИАЛИСТА ИННОВАЦИОННОЙ СФЕРЫ В ПРОЕКТНОМ ОБУЧЕНИИ

**Портнов М.А., Попов А.И.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», maksportnov1997@mail.ru***

Подготовка технического специалиста к реализации инновационных задач, стоящих перед региональной экономикой, предполагают формирование высокого уровня профессиональных компетенций и готовности к деятельности в условиях цифровой экономики [1]. При этом ключевое значение для реализации инновационных проектов в машиностроении, химической промышленности, сельском хозяйстве региона имеют и личностные качества работников. Наибольшее значение имеют готовность к творческой деятельности, коммуникабельность, лидерские качества.

Существующая система подготовки специалистов практически не связывает изучение профессиональных дисциплин и воспитательные мероприятия. Лишь для некоторых специальностей, например направления подготовки «Техносферная безопасность», профессиональное обучение по планированию мероприятий по защите человека и окружающей среды и воспитательный проект – добровольная пожарная дружина направлены на формирование в комплексе универсальных и профессиональных компетенций.

Важным в подготовке лидеров инновационных проектов к принятию ответственных фондоёмких решений и готовности организовать коллектив является проектная деятельность, реализованная как самостоятельная работа в цифровом образовательном пространстве [2]. Перспективным будет организация олимпиад и конкурсов первоначально в очном режиме (в студенческих группах), а затем и с использованием дистанционных технологий в электронной информационно-образовательной среде [3, 4].

Профессиональное становление специалиста и приобретение навыков творческой деятельности индивидуально и в коллективе позволяет переходить к формированию проектных коллективов из студентов различных курсов, форм обучения и направлений подготовки для выполнения комплексного проекта. Данную работу целесообразно организовать в онлайн и оффлайн режимах при минимальной направляющей роли преподавателя, который одновременно становится одним из участников исследовательской деятельности [5].

Ключевым в организации проектной деятельности будет выбор проблемного поля совместного исследования студентов, которое должно отражать предметный и социальный контексты профессиональной деятельности на предприятиях региона. Причем решаемая студентами проблема должна предполагать востребованность знаний из различных

предметных областей, включающих как фундаментальные исследовательские области (например, нанотехнологии), так и прикладные составляющие, определяющие конструкторскую, технологическую подготовку, обеспечение безопасности жизнедеятельности, экономическое и правовое сопровождение инноваций.

Для формирования лидерских качеств важным моментом будет распределение ролей между участниками проектной деятельности. Целесообразно, чтобы обучающийся попробовал себя как в роли рядового участника деятельности, так и руководителя коллектива. В первом случае развиваются умения выстраивать коммуникации, подчинять свои желания и устремления коллективным целям, приобретаются навыки самостоятельного творческого поиска методов разрешения проблемным ситуаций. При участии в проекте в роли лидера студенты приобретают навыки оценивать свой потенциал и способности подчиненных, брать ответственность на себя, делегировать полномочия, определять приоритетные направления деятельности и вырабатывать собственные механизмы контроля за всеми участниками работы.

Проектная деятельность будет сопровождаться активной самостоятельной работой студентов в электронной информационно-образовательной среде по изучению неизвестного им ранее, но актуализированного проектом компонента знаний, для оперативной коммуникации между всеми участниками для выполнения ограничения по времени выполнения проекта. Творческая направленность самостоятельной работы в цифровом пространстве должна обеспечиваться педагогическим сопровождением, в том числе и посредством адаптивного управления [6].

Использование потенциала цифровизации позволяет активизировать проектную работу студентов по проблемам, актуальным для формирующейся инновационной экономики, и развивать как профессиональные способности, так и коммуникабельность и лидерские качества участников, которые будут востребованы на следующих этапах профессионального становления.

Список используемых источников

1. Пучков, Н.П. Методологические аспекты подготовки студентов технических вузов к творческому саморазвитию / Н.П. Пучков, А.И. Попов // Инновации в образовании. – 2013. – №7. – С. 53-60.

2. Молоткова, Н.В. Механизм использования цифровой образовательной среды в инженерном образовании / Н.В. Молоткова, Е.А. Ракитина, А.И. Попов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2018. – №2(68). – С.163-172.

3. Попов, А.И. Олимпиады как инструмент формирования творческих общекультурных компетенций специалистов и оценивания уровня их сформированности / А.И. Попов, Е.А. Ракитина // Alma mater: Вестник высшей школы. – 2016 – №1. – С. 71-75.

4. Попов, А.И. Духовно-нравственное воспитание в олимпиадном движении студентов / А.И. Попов // Образование и наука. – 2014. - №3 (112). – С. 92-106.

5. Молоткова, Н.В. Методология профессионального становления преподавателя-исследователя в техническом вузе: учебное пособие / Н.В. Молоткова, А.И. Попов. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – 96 с.

6. Краснянский, М.Н. Информационная система управления профессиональным становлением студента в процессе самостоятельной работы / М.Н. Краснянский, А.И. Попов, А.Д. Обухов, С.В. Карпушкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки. – 2019. – №1(41). – С. 75-92.

# ЦИФРОВИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ НАНОИНДУСТРИИ

**Ворожейкин В.С.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов***

Эффективность реализации инновационной доктрины в части создания материальной базы для наноиндустрии посредством выпуска высокотехнологичного оборудования для проведения нанотехнологических процессов определяется функционированием механизма планирования и управления в рамках цифрового пространства предприятия [1, 2]. Оптимизация деятельности предприятия по выпуску продукции для наноиндустрии должна учитывать все этапы жизненного цикла данной продукции [3].

Цифровое пространство планирования и управления предприятием наноиндустрии включает в себя:

– научную среду, являющуюся совокупностью тенденций и проблем развития нанотехнологий как области знаний, отражающую результаты фундаментальных и прикладных исследований в данной сфере;

– научно-производственную среду, показывающую связь науки и производства и систематизирующую информацию об успешных опытах трансфера научных знаний в области наноразмерных объектов;

– социально-экономическую среду, определяющую направления развития предприятия наноиндустрии как субъекта инновационной экономики и определяющую как движущие силы хозяйственной деятельности и уровень включения в процесс создания материальной основы наноиндустрии, так и закономерности деятельности в условиях ограничений материальных, финансовых, трудовых ресурсов и времени;

– организационную среду предприятия наноиндустрии, детерминирующую как структуру и взаимосвязь информационных потоков в процессе планирования и управления, так направления повышения скорости обмена информацией, в т.ч. и технические;

– внутреннюю среду личности, обладающей не только знаниями в области нанотехнологий и менеджмента, но и психологической готовностью к инновационной деятельности в условиях стабильного стиля работы предприятия [4, 5];

– социальную среду предприятия, устанавливающую барьеры психологического сопротивления изменениям и торможения информационных потоков.

Создание на основе использования информационно-коммуникационных технологий цифрового пространства планирования и управления предприятием наноиндустрии включает стадии [6]:

– определение структуры исследовательских, конструкторских и технологических документов создания продукции нанотехнологического характера, механизмов их взаимодействия и корректировки, маршрутов движения;

– установка и обеспечение функционирования технических средств документооборота в условиях выпуска наукоёмкой продукции;

– определение оптимального программного обеспечения, позволяющего учесть специфику продукции наноиндустрии и этапы её жизненного цикла;

– проектирование организационной системы и обеспечение методического сопровождения повышения квалификации персонала, направленных на формирование компетенций трансфера нанотехнологических инноваций в промышленное производство;

– проектирование и разработку информационно-аналитической системы и процедур повышения скорости обмена информацией для сокращения длительности инновационного цикла при производстве продукции наноиндустрии;

– развитие базы данных по научным разработкам в области нанотехнологий и опыту их промышленного использования.

Организационно-экономический механизм результативной инновационной деятельности в рамках цифрового пространства планирования и управления, обеспечивающий выпуск продукции наноиндустрии, реализуется через функции:

– изучение тенденций нанотехнологий; выявление перспективных направлений применений наноразмерных объектов и сегмента рынка, требующих соответствующего оборудования;

– поиск потенциальных заказов, предполагающих инновационных характер продукции нанотехнологического характера на основе взаимодействия с научными организациями;

– организация работы инженерно-технических служб для детальной проработки конструкции машин и аппаратов для наноиндустрии и разработка технологий их эксплуатации;

– формирование конкурентоспособной цены на основе оптимизации оборудования, совершенствования технологии и интенсификации цифровых процессов в деятельности финансово-экономических служб;

– юридическое сопровождение деятельности предприятий наноиндустрии, предполагающее заключение контрактов с учетом интересов всех заинтересованных сторон и урегулирование разногласий между заказчиком и исполнителем, как в процессе заключения контракта, так и на всем протяжении его срока действия;

– сопровождение реализации всех стадий инновационного проекта по выпуску продукции наноиндустрии.

Реализация предложенных подходов по развитию цифрового пространства в деятельности предприятий наноиндустрии позволит снизить риски инновационной деятельности, повысить качество выпускаемой наноразмерной продукции и обеспечить необходимый темп инновационных преобразований в стране.

Список используемых источников

1. Романенко, А.В. Особенности построения затратной модели управления качеством в наноиндустрии /А.В. Романенко, А.И. Попов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2012. – №4. – С. 136-139.

2. Романенко, А.В. Об информационных основах принятия решений при управлении хозяйствующим субъектом / А.В. Романенко, А.И. Попов, В.Л. Пархоменко // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – №8. – С. 134-136.

3. Ткачев, А.Г. Промышленные технологии и инновации. Оборудование для наноиндустрии и технология его изготовления: учебное пособие /А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин, А.И. Попов. - Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 132 с.

4. Попов, А.И. Влияние форм организации творческой подготовки в вузе на эго-идентичность личности студента / А.И. Попов //Инновации в образовании. – 2014. - №4. – С. 75-84.

5. Молоткова, Н.В. Механизм использования цифровой образовательной среды в инженерном образовании / Н.В. Молоткова, Е.А. Ракитина, А.И. Попов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2018. – №2(68). – С.163-172.

6. Романенко, А.В. Постановка задачи оптимизации деятельности предприятия машиностроительного кластера / А.В. Романенко, В.Л. Пархоменко, А.И. Попов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. - №3. – с. 168-171.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

**Портнов М.А., Тарабрина Е.Ю.**
***ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», maksportnov1997@mail.ru***

Ныне условия нашей жизни определяет техника, производства и технологические процессы. Среда нашего обитания, которую мы именуем техносферой, имеет много опасностей для человека и природы. Каждый день мы сталкиваемся с имеющими потенциально-опасный характер процессами, которые могут привести к чрезвычайным ситуациям.

Ведь любая чрезвычайная ситуация приведет к нарушениям во многих сферах жизни общества. Небольшая по своим масштабам авария в технологическом процессе может вызвать «эффект домино», что приведет к огромным последствиям. Такие сбои могут произойти в любой сфере деятельности человека, но особенно на производстве.

Таким субъектом может являться агропромышленный комплекс (АПК), здесь каждый день проходит ряд мероприятий, который несет как прямую угрозы жизни и здоровью человека, так и имеет наличие потенциального предельно-допустимого вреда окружающей среде. В первую очередь это крупнейшие промышленные комплексы и процессы, где чрезвычайная ситуация может привести к катастрофам экологического характера, но так же стоит иметь ввиду обычные бытовые приборы, которые тоже могут быть причиной аварии, хоть и меньшего масштаба.

Во избежание таких проблем следует руководствоваться нормами и правила техносферной безопасности. Техносферная безопасность – это область науки и техники, которая занимается разработкой методов и средств, обеспечивающих благоприятные для человека условия существования в преобразуемой человеком среде обитания, а также свойство объекта, которое выражается в его способности противостоять негативным факторам техносферы [1]. Если говорить более простыми словами, то техносферная безопасность – это защищенность техносферы.

Охрана труда на производственных объектах АПК является важной составной частью техносферной безопасности [2, 3]. Каждый работник должен иметь рабочее место, которое соответствует требованиям охраны труда. Сфера АПК на протяжении последних пяти лет является более проблемной, чем другие сферы деятельности, в организации охраны труда.

Стоит обратиться к нормативным документам, которые обеспечивают техносферную безопасность. Соблюдение законов, ГОСТов и других нормативных документов имеет существенное значение в обеспечении техносферной безопасности на АПК, а также на других объектах экономики. Как правило чрезвычайные ситуации происходят из-за нарушения инструкций и правил: несоблюдение регламента о своевременном техническом обслуживании оборудовании и машин, использование некачественных материалов при

процессе производства, ошибки во время эксплуатации того или иного оборудования, а также наличие человеческого фактора.

Важную роль играет подготовка квалифицированных кадров в сфере техносферной безопасности, обладающие необходимыми компетенциями и умениями в управленческой сфере [4]. Ведь знающий и умеющий специалист способен организовать вкупе работу систем безопасности как на масштабном массовом производственном объекте, так и на малом объекте. Сейчас во многих организациях открываются вакансии специалиста в сфере техносферной безопасности из-за востребованности данных кадров для обеспечения безопасности как на производственных объектах, так и на других объектах экономики. Высшие учебные заведения проводят подготовки таких специалистов по различным направлениям подготовки.

Тамбовская область – это аграрный регион, где безопасность на АПК является важной составляющей всей работы. ОАО «Знаменский сахарный завод», ООО «Тамбовский бекон», СХПК «Борец» - эти и другие организации АПК имеют потенциальные риски во время технологических процессов и работ.

Для обеспечения техносферной безопасности нужно также определить степени риска, допустимые границы и внедрить новые технологии для минимизации этих рисков [5]. Это деятельность по поиску оптимальных решений во время чрезвычайной ситуации. Риски должны быть сведены к минимуму как для человека, так и для окружающей среды.

Список используемых источников

1. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями от 29.07.2018) // СЗ РФ. 2018.

2. Тетеринец, Т.А. Производственно-экономический потенциал сельского хозяйства Беларуси: анализ и механизмы управления / Т.А. Тетеринец, В.М. Синельников, Д.А. Чиж, А.И. Попов – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018.- 160 с.

3. Синельников, В.М. Концептуальные подходы к инновационному обновлению кластера молочного скотоводства / В.М. Синельников, А.И. Попов, Н.М. Гаджаров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2019. – №1(71). – С.86-94.

4. Романенко, А.В. Об информационных основах принятия решений при управлении хозяйствующим субъектом / А.В. Романенко, А.И. Попов, В.Л. Пархоменко // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – №8. – С. 134-136.

5. Алтухов, А.И. Предотвращение рисков и угроз обеспечения продовольственной безопасности – необходимое условие пространственного развития сельского хозяйства / А.И. Алтухов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, ФГБОУ ВО «КГСА». – 2018. – С. 150-158.

Научное издание

# «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент»

*материалы XI Международной научно-инновационной молодежной конференции:*
*30 октября – 01 ноября 2019 г.*

---

**Издательство ИП Чеснокова А.В.**

**392020, г. Тамбов, ул. О. Кошевого 14. Тел. (4752) 53-60-84.**

Подписано в печать 18.12.2019 г. Формат 60x84[1]/8.

Объем – 16,2 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 855.