

СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА И ИННОВАЦИОННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ



*XIV Международная
научно-инновационная
молодежная конференция
17 – 18 ноября 2022 г.*

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 XIV Международной научно-инновационной
молодежной конференции
(Тамбов, 17–18 ноября 2022 г.)

Научное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2022

УДК 620.1
ББК 34.4 + 65.291.5
С56

С56 **Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент** [Электронный ресурс]: материалы XIV Международной научно-инновационной молодежной конференции ; под общ. ред. оргкомитета ; ФГБОУ ВО «ТГТУ», 17–18 ноября 2022 г. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 8,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2541-8

Содержат научные статьи и тезисы докладов студентов, аспирантов и молодых научных работников ВУЗов, НИИ и предприятий Российской Федерации и зарубежных стран, вошедших в программу XIV Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент».

Оргкомитет благодарит за помощь в организации и проведении Конференции Совет молодых ученых и специалистов и Студенческое научное объединение ТГТУ.

Могут быть полезны преподавателям вузов, научным работникам, руководителям и специалистам предприятий, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 620.1
ББК 34.4 + 65.291.5

Материалы статей предоставлены в электронном виде и сохраняют авторскую редакцию.

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2541-8

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2022
© Авторы статей, 2022

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

Программный комитет:

- Краснянский Михаил Николаевич - профессор РАН, д.т.н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия – председатель;
- Ассовский Игорь Георгиевич - д.ф.-м.н., зав.лабораторией «Физика горения твердых топлив» Института химической физики им.Н.Н.Семенова, Москва, Россия;
- Бажин Павел Михайлович - д.т.н., зам.директора Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г.Мержанова РАН, г.Черноголовка, Россия;
- Баронин Геннадий Сергеевич - д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ», директор НОЦ ТамбГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии», г.Тамбов, Россия – зам.председателя Программного комитета;
- Буяновский Илья Александрович - д.т.н., зав.лабораторией «Методы смазки машин» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;
- Валитов Венер Анварович - д.т.н., ведущий научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН, г.Уфа, Республика Башкортостан.
- Дмитриев Олег Сергеевич - д.т.н., профессор, академик РАЕН, зав.кафедрой «Физика» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия;
- Кербер Михаил Леонидович - д.х.н., профессор, РХТУ им.Д.И.Менделеева, г.Москва, Россия;
- Лазарев Сергей Иванович - д.т.н., профессор, зав.кафедрой «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия;
- Мищенко Сергей Владимирович - д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия;
- Мордасов Денис Михайлович - д.т.н., профессор, зав.кафедрой «Материалы и технология» ФГБОУ ВО «ТГТУ», 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 ИСМАН, руководитель НОЦ ИСМАН, г.Черноголовка, Россия; |
| Стельмах Любовь Семеновна | - д.т.н, вед.н.с. ИСМАН, 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, Энгельский технологический институт (филиал) 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; |
| 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 – председатель; |
| Завражин Дмитрий Олегович | - к.т.н., начальник отдела научно-технических программ ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия – заместитель 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; |
| Майстренко Александр Владимирович | - к.т.н., доцент, проректор по развитию имущественного комплекса ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Муромцев Дмитрий Юрьевич | - д.т.н., профессор, проректор по научно-инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия; |
| Столин Александр Моисеевич | - д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией пластического деформирования материалов ИСМАН, руководитель НОЦ ИСМАН, г.Черноголовка, Россия; |
| Завражина Кристина Владимировна | - к.э.н., научный сотрудник НОЦ ТГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г.Тамбов, Россия – ученый секретарь Конференции. |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Пленарные доклады | 10 |
| <i>Валитов В.А., Галиева Э.В.</i> | |
| Исследование закономерностей формирования ультрамелкозернистой структуры при деформационно-термической обработке гетерофазных никелевых сплавов | 10 |
| <i>Столин А.М.</i> | |
| Эволюционное развитие твердофазной технологии переработки полимерных порошковых материалов | 18 |
| <i>Дмитриев О.С., Баронин Г.С., Барсуков А.А.</i> | |
| Анализ и устранение технологических проблем производства толстостенных изделий из полимерных композитов | 20 |
| <i>Мухаметрахимов М.Х.</i> | |
| Сварка давлением алюминиевых сплавов в условиях низкотемпературной сверхпластичности | 23 |
| <i>Стельмах Л.С., Столин А.М.</i> | |
| Использование холодного прессования в переработке композиционного материала на основе фторполимера | 26 |
| <i>Хина Б.Б.</i> | |
| Опыт гармонизации стандартов ISO на нелегированные, низколегированные и цементуемые конструкционные стали | 29 |
| | |
| СЕКЦИЯ 1. Материаловедение и твердофазные технологии новых материалов | 33 |
| <i>Хачатурова Т.А., Бутько В.Г., Гусев А.А., Лёдова А.В.</i> | |
| Использование свертонких плёнок диоксида кремния | 33 |
| <i>Терешкин В.В., Крымский С.В., Автократова Е.В., Ситдииков О.Ш., Маркушев М.В.</i> | |
| Влияние КВД и последующего естественного старения на структуру и твердость высокопрочного алюминиевого сплава | 36 |
| <i>Шерстеникин П.А., Мордасов Д.М.</i> | |
| Анализ диффузионного слоя цементованной стали 20MnCr5 | 40 |
| <i>Аверичев О.А., Столин А.М., Столин П.А.</i> | |
| Реологическое поведение порошковых композиций из материалов на основе фторопласта Ф – 4 при одноосном прессовании | 42 |
| <i>Коняхина Н.С., Панченко Е.Б.</i> | |
| Цементация нержавеющей стали в твёрдом карбюризаторе | 45 |
| <i>Михеев М.В., Болоцкая А.В., Столин А.М., Бажин П.М.</i> | |
| Получение магнитно – абразивных порошковых материалов на основе (Ti – C) – Fe методом СВС – измельчения | 48 |
| <i>Хайретдинов Н.Ф., Кабирова Д.Б., Фазлыяхметов Р.Ф., Имаев М.Ф.</i> | |
| Влияние многопроходной обработки трением с перемешиванием на микротвердость композитов AA6063/TiO ₂ , CoO, Fe ₂ O ₃ | 50 |
| <i>Антипов М.С., Бажина А.Д., Константинов А.С., Чижиков А.П., Бажин П.М., Столин А.М.</i> | |
| Формуемость материалов на основе TiC - (5–50 мас. %) NiCr в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и высокотемпературного сдвигового деформирования | 53 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Болоцкая А.В., Михеев М.В., Бажин П.М.</i> | |
| Исследование влияния наноразмерных частиц Si ₃ N ₄ на структуру и свойства экструдированных материалов на основе боридов титана..... | 55 |
| <i>Мордасов М.Д., Завражин Д.О., Мордасов Д.М.</i> | |
| Изучение взаимодействия потока горячего воздуха с медной пластиной..... | 57 |
| <i>Галиева Э.В., Классман Е.Ю., Степухов Е.М.</i> | |
| Формирование ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры в жаропрочных никелевых сплавах..... | 59 |
| <i>Данилов В.М., Ярцев В.П.</i> | |
| Физико-механические характеристики древесно-наполненного полимерного композита..... | 62 |
| <i>Панченко Е.Б., Коняхина Н.С.</i> | |
| Технология твердофазного азотирования с использованием обмазки..... | 65 |
| <i>Чуприкова А.А., Фижбах Т.В., Ермаков А.С., Чудин И.А., Ретин М.С.</i> | |
| Получение наномодифицированных полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной смолы ЭД-20..... | 67 |
| <i>Чижигов А.П., Антипов М.С., Константинов А.С., Бажин П.М., Столин А.М., Жидович О.А.</i> | |
| Разработка и получение огнеупорных материалов на основе стабилизированного оксида циркония методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза..... | 70 |
| <i>Ефанова Д.А., Макеев П.В.</i> | |
| Добавки для создания биоразлагаемых полимеров..... | 72 |
| <i>Прилипко С.Ю., Кудрявцев Ю.А., Волкова Г.К., Беличко Д.Р., Глазунова В.А., Бурховецкий В.В., Линник Д.С.</i> | |
| Удельная прочность полимер-керамического композита с корундовой матрицей..... | 75 |
| <i>Семенчук И.Е., Щербаков В.А., Грядунов А.Н.</i> | |
| Исследование влияния режимов механической активации на формирование фазового состава и микроструктуры двойного карбида (Ti,Zr)C..... | 78 |
| <i>Мордасов М.Д., Завражин Д.О., Мордасов Д.М.</i> | |
| Обзор технологий низкотемпературной пайки крупногабаритных деталей..... | 80 |
| <i>Изотов А.И., Кильман Г.В., Сироткин В.В., Шалаев Р.В.</i> | |
| Электрические свойства контактного перехода металл-углеродная пленка..... | 83 |
| <i>Фижбах Т.В., Ермаков А.С., Чуприкова А.А., Чудин И.А., Ретин М.С.</i> | |
| Технологические особенности получения резин..... | 86 |
| <i>Константинов А.С., Чижигов А.П., Болоцкая А.В., Столин П.А., Антипов М.С., Бажин П.М.</i> | |
| Изучение реологических закономерностей при холодном одноосном прессовании шихтовых заготовок на основе Ti-AL-Nb-MO-V..... | 89 |
| <i>Мордасов М.Д., Мордасов Д.М., Тембе М.О.</i> | |
| Формирование микроструктуры полимерминерального композиционного материала..... | 91 |
| СЕКЦИЯ 2. Технологии наносистем и материалов..... | 94 |
| <i>Евлахин Д.А., Таров Д.В., Слепов Д.С., Столяров Р.А., Ягубов В.С., Зеленин А.Д., Ананьев А.В.</i> | |
| Инновационная технология получения битума дорожного специального, модифицированного гибридным углеродным наполнителем..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| <i>Альджабуubi Д.З.М., Буракова И.В., Бураков А.Е., Ткачев А.Г.</i> Исследование влияния комплексной нанодобавки на основе оксида графена на прочностные характеристики неавтоклавных газобетонов..... | 97 |
| <i>Бубнова Е.В., Здерева А.В., Ростова Д.П., Кровякова Е.И., Швец М.Е.</i> Влияние сольватной оболочки на реакционную способность окисленного графита.... | 100 |
| <i>Евлахин Д.А., Таров Д.В., Слепов Д.С., Столяров Р.А., Ягубов В.С., Зеленин А.Д., Ананьев А.В.</i> Проектирование аппарата для получения инновационного битума дорожного специального, модифицированного гибридным углеродным наполнителем..... | 104 |
| <i>Земцова Н.В., Щегольков А.В.</i> Методика исследований электроактивных эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами..... | 107 |
| <i>Солоненко А.П., Шевченко А.Е.</i> Гранулированные материалы из CaSiO_3 и ZnO | 110 |
| <i>Шестерикова Д.А., Шестериков А.Е.</i> Исследование и разработка пьезодвижителя на основе титаната свинца для адаптивного микрозеркала..... | 112 |
| <i>Яркин О.В., Мкртчян Э.С., Ананьева О.А., Бураков А.Е., Буракова И.В., Кузнецова Т.С., Ткачев А.Г.</i> Удаление ионов тяжелых металлов с помощью наноконпозиционного материала на основе оксида графена, модифицированного хитозаном..... | 115 |
| <i>Аль-баирмани Али Таир Рахим, Земцова Н.В., Щегольков А.В.</i> Технологические аспекты и композитные материалы, модифицированные МУНТ, для строительных 3D принтеров..... | 118 |
| СЕКЦИЯ 3. Химико-технологические процессы и системы | 121 |
| <i>Баклыкова М.А., Старунская В.И., Попова А.А., Шубин И.Н.</i> Лабораторная установка для исследования режимных параметров процесса высокотемпературной активации..... | 121 |
| <i>Котенев С.И., Абоносимов О.А., Лазарев Д.С.</i> Исследование электромембранной очистки технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ..... | 124 |
| <i>Михайлин М.И., Стрельников А.Е., Коновалов Д.Д., Лазарев С.И., Коновалов Д.Н.</i> Разработка конструкции электробаромембранного аппарата рулонного типа для регенерации технологических растворов химических производств..... | 127 |
| <i>Поцелеев В.В., Трофимчук Е.С., Успенский С.А.</i> Органоминеральные наноконпозиционные материалы на основе полилактида, деформированного по механизму крейзинга..... | 132 |
| <i>Родионов Д.А.</i> Управление трехкамерной электродиффузионной установкой..... | 133 |
| <i>Сухорукова Т.А., Борщев В.Я.</i> Компьютерное моделирование процесса смешения сыпучих материалов методом дискретных частиц..... | 135 |
| <i>Хорохорина И.В., Филимонова О.С., Лазарев С.И.</i> Исследование комбинированного способа очистки промывных вод после процесса хромирования..... | 138 |
| <i>Хайбуллина Д.В.</i> Достоинства, недостатки газотрубного котла-утилизатора и пути их решения..... | 141 |

| | |
|---|-----|
| <i>Баклыкова М.А., Яркин О.В., Мкртчян Э.С., Бураков А.Е., Буракова И.В., Ананьева О.А., Кузнецова Т.С., Ткачев А.Г.</i> | |
| Получение углеродных сорбентов из растительных отходов АПК Тамбовской области для очистки водных сред..... | 144 |
| <i>Шестаков К.В.</i> | |
| Исследование кинетики электродиализного разделения растворов, содержащих катионы меди, железа и никеля..... | 147 |
| СЕКЦИЯ 4. Механика и математическое моделирование новых материалов и технологий | 150 |
| <i>Кровякова Е.И., Тришина А.В., Здерева А.В., Дегтярев А.А., Швец М.Е., Ростова Д.П., Степура И.А., Бубнова Е.В.</i> | |
| Влияние заместителей в триэтиламинe на его способность к гидрофобизации электрофильной поверхности..... | 150 |
| <i>Пасько А.А., Алексеев А.Д., Толмачева, О.И., Маджхул М.Д.М.</i> | |
| Дисковые насосы для жидкостей с крупными твердыми включениями..... | 154 |
| <i>Маджхул М.Д.М.</i> | |
| Оценка надежности центробежных насосных агрегатов..... | 158 |
| <i>Полякова П.В.</i> | |
| Атомистическое моделирование взаимной диффузии атомов на границе разнородных металлов..... | 161 |
| <i>Кожарина Т.В., Карпов С.В., Чуприкова А.А., Завражин Д.О.</i> | |
| Оценка формуемости изделий из СВМПЭ на основе полигональных моделей прессовок..... | 164 |
| <i>Шестериков А.Е., Шестерикова Д.А.</i> | |
| Исследование разброса по толщине пленок золота методами математического моделирования..... | 168 |
| <i>Здерева А.В., Кровякова Е.И., Швец М.Е., Тришина А.В., Ростова Д.П., Бубнова Е.В., Дегтярев А.А.</i> | |
| Подбор методов расчета индексов реакционной способности ПАВ для модификации олеофобно-олеофильных свойств поверхности твердых тел..... | 171 |
| <i>Сафина Л.Р.</i> | |
| Деформационно-термическая обработка как один из способов получения композита графен/Si: атомистическое моделирование..... | 175 |
| СЕКЦИЯ 5. Инновационный менеджмент в сфере высоких технологий | 178 |
| <i>Андрющенко А.В., Королькова Е.М.</i> | |
| Цифровая трансформация: проблемы управления промышленным предприятием..... | 178 |
| <i>Орцуева Б.И., Тайсумова Х.В.</i> | |
| Специфика инновационно-технологического менеджмента..... | 181 |

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ГЕТЕРОФАЗНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ*

Валитов В.А. Галиева Э.В.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,
450001, г. Уфа, ул. С. Халтурина 39, Россия
E-mail: Valitov_VA@mail.ru*

Аннотация. Изучены закономерности влияния фазового состава и условий деформационно-термической обработки (ДТО) на процессы рекристаллизации, протекающие в гетерофазных никелевых сплавах. Установлено, что на первой стадии высокотемпературной ДТО (на $45\div 75^\circ\text{C}$ ниже температуры растворения упрочняющей фазы $T_{s\gamma'}$) наблюдается трансформация исходной крупнозернистой структуры в мелкозернистую типа микродуплекс. Показано, что на второй стадии низкотемпературной ДТО (на $150\div 235^\circ\text{C}$ ниже $T_{s\gamma'}$) гранульного сплава типа ЭП741НП происходит преобразование микродуплексной структуры в ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру смешанного типа, которая включает УМЗ составляющую типа субмикродуплекс с размером зерен γ - фазы(матрицы) и некогерентных частиц-зерен γ' -фазы менее 1 мкм и крупных частиц-зерен γ' -фазы размером $\sim 2,9$ мкм, которые были унаследованы от микродуплексной структуры, образованной ранее на первой высокотемпературной стадии ДТО. Аналогичные изменения при формировании УМЗ структуры наблюдаются в сплаве ЭК61, в котором выделяется термически стабильная δ -фаза на основе интерметаллида Ni3Nb. Установлено, что формирование в исследованных жаропрочных никелевых сплавах ультрамелкозернистой структуры смешанного типа создает условия для реализации эффекта низкотемпературной сверхпластичности.

Введение. Высоколегированные гетерофазные никелевые сплавы широко используются для изготовления различных деталей авиадвигателей и наземных энергетических установок, где их весовая доля превышает 50%. [1, 2]. Разработка и внедрение в производство новых более высокожаропрочных никелевых сплавов привело к резкому снижению технологической пластичности и увеличению трудоемкости их обработки [3]. В этой связи одной из наиболее актуальных для современного авиадвигателестроения и энергетического машиностроения остается проблема разработки инновационных ресурсосберегающих технологий производства деталей из гетерофазных никелевых сплавов. Одним из наиболее эффективных путей повышения технологической пластичности труднодеформируемых никелевых сплавов является разработка технологических процессов, основанных на использовании эффекта структурной СП, что позволяет существенно повысить коэффициент использования металла и снизить себестоимость изготовления деталей сложной формы, особенно крупногабаритных [3, 4].

Как известно [3 – 5] для перевода никелевых сплавов в сверхпластичное состояние необходимо в объемных или листовых полуфабрикатах из таких материалов сформировать мелкозернистую (1-10мкм) или УМЗ структуру (менее 1мкм) дуплексного типа. В работах [5÷8] был предложен универсальный методологический подход к получению объемных и листовых полуфабрикатов из никелевых сплавов с мелкозернистой и УМЗ структурой. Его сущность заключается в проведении интенсивной деформационно-термической обработки с использованием преимущественно схемы всесторонней изотермическойковки (иликовки с последующей прокаткой) и постадийным снижением температуры обработки [7, 8]. Механизм формирования мелкозернистой структуры типа микродуплекс при высокотемпературной ДТО достаточно подробно изучен в работах [5, 9, 10]. Однако не ясен механизм последующей трансформации микродуплексной структуры в УМЗ структуру дуплексного типа, для получения которой используют дополнительную низкотемпературную ДТО. Недостаточно также данных о влиянии УМЗ структуры дуплексного типа на сверхпластические свойства гетерофазных никелевых сплавов с различным типом упрочняющей фазы и методом их производства.

Цель работы – анализ влияния низкотемпературной деформационно-термической обработки на трансформацию микродуплексной структуры в ультрамелкозернистую типа субмикродуплекс в гетерофазных никелевых сплавах.

1. Материалы и методики исследования

В качестве материалов исследования были использованы деформируемый сплав типа ЭП962, а также гранульный сплав ЭП741НП с изоморфными выделениями упрочняющей γ' -фазы на основе интерметаллида Ni_3Al,Ti), имеющего преимущественно кубоидную или сферическую форму. Кроме того были изучены российский сплав ЭК61 и его близкий зарубежный аналог - сплав Inconel 718, упрочнение в которых достигается за счет выделения неизоморфной метастабильной упрочняющей фазы γ'' -фазы в виде когерентных наноразмерных частиц дискообразной формы на основе интерметаллида Ni_3Nb , которая при длительном старении при температуре $650^\circ C$ переходит в орторомбическую структуру δ -фазы пластинчатой формы [2], неизоморфной матрице (γ -фаза, ГЦК).

Все микроструктурные исследования и механические испытания проводили на оборудовании Центра Коллективного Пользования ИПСМ РАН. Исследование механического поведения сплавов проводили в интервале температур $700\div 1200^\circ C$ и скоростей деформации $6,6\cdot 10^{-5}\div 1,7\cdot 10^{-1} c^{-1}$. Горячую деформацию проводили на цилиндрических образцах диаметром 10мм и высотой 15 мм по схеме одноосного сжатия (осадки) в изотермических условиях на универсальном динамометре RMS-100 фирмы «Schlenck» с нагрузкой до 100 кН. Испытания на растяжение плоских образцов с размерами рабочей части $10\times 3\times 2 mm^3$ и цилиндрических диаметром 5 мм и длиной рабочей части 25 мм проводили на динамометре «INSTRON-1185». Микроструктурные исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Mira-3 Tescan в режиме вторичных (SE) или обратно-рассеянных (BSE) электронов и просвечивающего электронного микроскопа JEOL 2000EX. Для получения по разработанным режимам крупногабаритных сверхпластичных полуфабрикатов с микродуплексной и УМЗ структурой использовали гидравлический пресс усилием 630тс, оснащенный изотермическим штамповым блоком с рабочей температурой не выше $950^\circ C$.

2. Результаты эксперимента и их осуждение

2.1. Формирование микродуплексной структуры при высокотемпературной ДТО

Для повышения технологической пластичности труднодеформируемых никелевых сплавов с крупнозернистой структурой (~80 мкм) весьма эффективным является проведение предварительного отжига (нагрев до температуры полного растворения упрочняющей γ' -фазы и последующее медленное охлаждение со скоростью 25°/час. до температуры старения), направленного на коагуляцию внутризеренных выделений упрочняющей γ' -фазы на основе интерметаллида $Ni_3(Al,Ti)$. В результате такой обработки, например, в деформируемом никелевом сплаве ЭП962 наблюдается укрупнение внутризеренных выделений γ' -фазы до размера 0,5 мкм [9], а дополнительный отжиг при температуре 1100°С в течение не менее 8 час. приводит к частичному нарушению когерентности на межфазной границе γ/γ' . При этом размер частично-когерентных выделений γ' -фазы и межчастичное расстояние достигает 0,5÷1,5 мкм (Рис.1а, б). Как видно на рис.1г, после гетерогенизирующего отжига в никелевых сплавах, в том числе в гранульном сплаве ЭП741НП [11] может сохраняться когерентность на межфазной границе γ/γ' , которая нарушается частично при дополнительном отжиге в $\gamma+\gamma'$ -области, или полностью становится некогерентной при последующей ДТО.

Высокотемпературная ДТО (1 стадия) деформируемого (ЭП962) и гранульного (ЭП741НП) никелевых сплавов [9,11] проводилась при температурах, которые были на 45÷75°С ниже температуры растворения упрочняющей фазы $T_{s\gamma'}$. Высокотемпературная ДТО исследуемых сплавов проводилась дробно за 3 перехода с последеформационными отжигами в течении 4-8 час., что обеспечило получение в сплавах ЭП962 и ЭП741НП максимального объема (80-90%) рекристаллизованной структуры типа микродуплекс (рис.2).

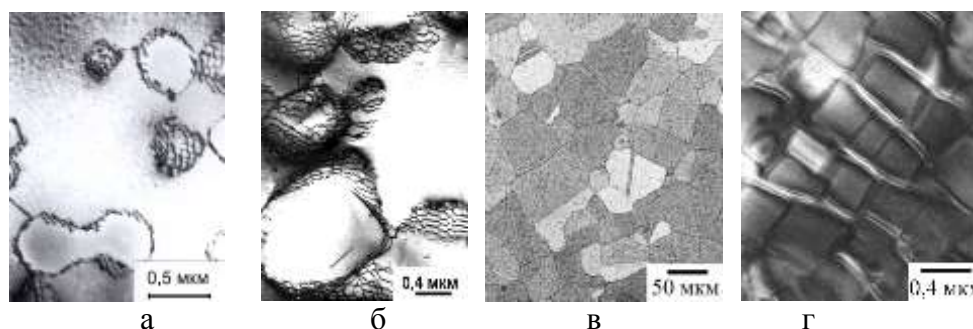


Рисунок 1. Микроструктура сплавов ЭП962 (а,б) и ЭП741НП (в,г) с исходной крупнозернистой структурой после гетерогенизирующего отжига в $\gamma+\gamma'$ -области

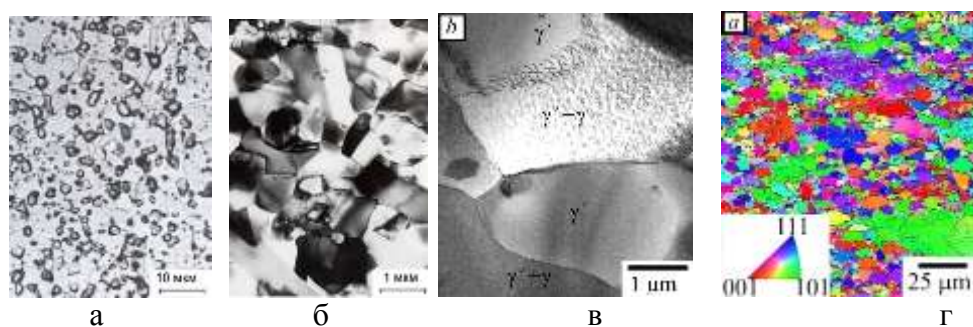


Рисунок 2. Микроструктура никелевых сплавов ЭП962 (а,б) и ЭП741НП (в,г) после высокотемпературной ДТО.

Анализ тонкой микроструктуры сплавов ЭП962 (рис.2б) и ЭП741НП (рис. 2в) показал наличие полосчатого контраста на межфазной границе, что характерно для высокоугловых границ. EBSD анализ сплава ЭП741НП (рис.2г) подтвердил наличие высокоугловых границ в рекристаллизованной области (рис. 4г). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе высокотемпературной ДТО происходит формирование мелкозернистой структуры, состоящей из зерен γ -матрицы и скоагулированных выделений γ' -фазы, имеющих преимущественно некогерентные высокоугловые γ/γ' -границы и расположенных в тройных стыках и по границам зерен матрицы (γ -фазы).

Особенностью никелевых сплавов типа ЭК61 и его близкого зарубежного аналога - сплава Inconel 718, упрочняемых метастабильной γ'' -фазой (δ -фаза, термически стабильная модификация) на основе интерметаллида Ni_3Nb является то, что для них нецелесообразно применение вышеприведенной технологической схемы формирования микродуплексной структуры, включающей обязательное проведение гетерогенизирующего отжига, который необходим при обработке никелевых сплавов, упрочняемых выделениями γ' -фазы на основе интерметаллида $Ni_3(Al,Ti)$. Как видно на рис.3а,б после гетерогенизирующего отжига в микроструктуре сплава Inconel 718 часа наблюдаются выделения δ -фазы в виде отдельных пластин [10], протяженных через все зерно матрицы (γ -фазы). Между пластинами δ фазы также выделяются дисперсные когерентные частицы γ'' -фазы, по-видимому дополнительно выделенные в процессе охлаждения образцов до комнатной температуры. Очевидно, что полученная после гетерогенизирующей обработки структура может оказать неблагоприятное влияние на формирование при деформации микродуплексной структуры, поскольку фрагментация таких протяженных вдоль всего зерна δ -пластин и преобразование их в глобулярные частицы микродуплексной структуры затруднено. Другой особенностью сплавов ЭК61 и Inconel 718 является то, что инкубационный период выделения упрочняющей γ'' -фазы (δ -фазы) составляет 5-10 минут, что благоприятно сказывается на технологической пластичности указанных сплавов. Поэтому эти сплавы можно подвергать как высокотемпературной (рис. 3в), так и низкотемпературной ДТО с использованием схемы всесторонней изотермическойковки [5,12÷14].

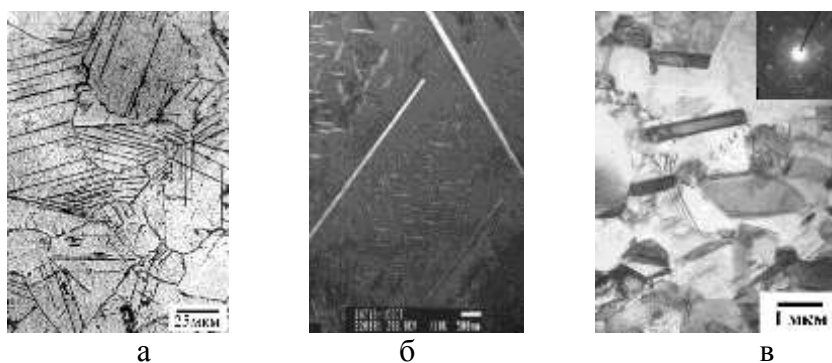


Рисунок 3. Микроструктура сплава Inconel 718 после предварительного гетерогенизирующего отжига (а,б) и высокотемпературной ДТО (в)

Несмотря на различия рассмотренных выше никелевых сплавов по типу упрочняющей фазы и их морфологии, были выявлены общие закономерности и особенности формирования мелкозернистой структуры типа микродуплекс при высокотемпературной ДТО. Общим для изученных сплавов является то, что

преобразование крупнозернистой структуры в мелкозернистую типа микродуплекс происходит в процессе непрерывной динамической рекристаллизации, в ходе которой субзеренная структура, параметры которой определяются расстоянием между скоагулированными выделениями упрочняющей фазы, по мере нарастания деформации трансформируется в зёрненную структуру с высокоугловыми границами произвольного типа. Одновременно когерентные или частично когерентные выделения второй фазы (γ' -фазы в сплаве ЭП741НП, или δ -фазы в сплаве Inconel 718) преобразуются в некогерентные частицы-зерна, произвольно ориентированные относительно зерен матрицы.

2.2. Формирование ультрамелкозернистой структуры при низкотемпературной ДТО

По результатам исследований, приведенных в работе [15], было установлено, что на второй стадии низкотемпературной ДТО (на $185\div 235^\circ\text{C}$ ниже $T_{s\gamma'}$) гранульного сплава ЭП741НП происходит преобразование микродуплексной структуры в УМЗ структуру смешанного типа, которая включает УМЗ составляющую типа субмикродуплекс с размером зерен γ - фазы(матрицы) и некогерентных частиц-зерен γ' -фазы менее 1 мкм и крупных частиц-зерен гамма-штрих фазы размером ~ 2.9 мкм (Рис.4а, отмечены стрелками), которые были унаследованы от микродуплексной структуры, образованной ранее на первой высокотемпературной стадии ДТО.

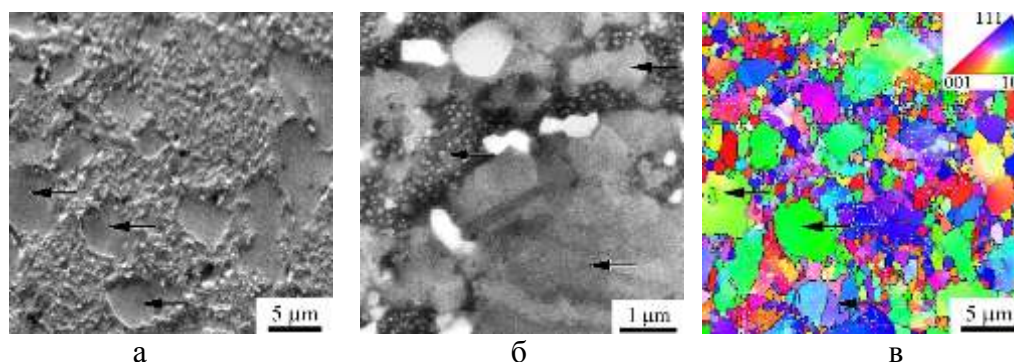


Рисунок 4. Микроструктура гранульного сплава ЭП741НП после низкотемпературной ДТО
а,б - электронно-микроскопические изображения в режиме вторичных электронов (SE);
в - ориентационная EBSD-карта.

Интересно отметить, что развитая субструктура в сплаве ЭП741НП после низкотемпературной ДТО наблюдалась не только в γ зернах, но и в крупных выделениях γ' фазы. Как показал EBSD анализ, суммарная разориентировка, накапливаемая в пределах некоторых относительно крупных нерекристаллизованных γ -зернах, достигала $30\text{-}35^\circ$, а в пределах крупных частиц γ' фазы – $10\div 15^\circ$. Итак, полученные результаты свидетельствуют о том, что при низкотемпературной ДТО наряду с динамической рекристаллизацией интенсивно развивается динамический возврат, причем интенсивное внутриверенное скольжение развивается как в γ зернах, так и в относительно крупных частицах γ' -фазы. Формирование менее развитой субструктуры в частицах γ' фазы, в сравнении с γ -фазой обусловлено, по всей видимости, большей прочностью и замедленностью процессов возврата в γ' -фазе по сравнению с γ фазой.

В работе [16] показано, что проведение второй стадии низкотемпературной ДТО (на 200-235°C ниже T_{δ} - температуры полного растворения δ -фазы) сплава ЭК61 с микродуплексной структурой, ранее сформированной в процессе первой высокотемпературной стадии ДТО ((на 45÷75°C ниже T_{δ}), приводит к формированию УМЗ структуры (с размерами зерен γ -фазы и частиц δ -фазы $\sim 0,3\pm 0,1$ мкм). При этом наряду с УМЗ составляющей в структуре сплава сохраняются отдельные крупные частицы δ -фазы размером до $2,0\pm 0,5$ мкм, которые были образованы ранее на высокотемпературной стадии ДТО при формировании микродуплексной структуры, т.е. являются «наследственными».

2.3. Низкотемпературная сверхпластичность ЖНС с УМЗ структурой

По результатам исследований механических свойств на растяжение установлено, что преобразование в процессе низкотемпературной ДТО микродуплексной структуры в УМЗ структуру смешанного типа обеспечивает реализацию эффекта низкотемпературной сверхпластичности в ЖНС с различным типом и морфологией упрочняющей фазы. На примере сплава ЭК61 показано [16 – 18], что формирование УМЗ структуры смешанного типа (с размером зерен УМЗ составляющей менее 1 мкм) приводит к проявлению эффекта низкотемпературной СП в интервале температур 675...900 °С. Установлено, что максимальные значения относительного удлинения ($\delta=1431...1741\%$) и коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения ($m=0,4...0,52$) наблюдаются в сплаве с УМЗ структурой при 800 и 850 °С.

В работе [15] на примере гранульного сплава ЭП741НП с УМЗ структурой смешанного типа показано, что низкотемпературная сверхпластичность наблюдается в интервале температур 900÷1000°C, достигая максимального значения $\delta=1320\%$ при $T=1000^{\circ}\text{C}$ и $\dot{\epsilon}=10^{-3} \text{ c}^{-1}$. А при минимальной температуре 900°C относительное удлинение достигает 280% при скорости деформации $\dot{\epsilon}=5\cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$. Выше приведенные данные по низкотемпературной сверхпластичности хорошо согласуются с ранее полученными результатами, приведенными в работах [19 – 23].

ВЫВОДЫ

1. Показано, что на низкотемпературной стадии ДТО (на 150÷235°C ниже температуры полного растворения упрочняющей γ' -фазы на основе интерметаллида $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$) в гранульном сплаве ЭП741НП происходит преобразование микродуплексной структуры в ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру смешанного типа, которая включает УМЗ составляющую типа субмикродуплекс с размером зерен γ - фазы(матрицы) и некогерентных частиц-зерен γ' -фазы менее 1 мкм и крупных частиц-зерен γ' -фазы размером $\sim 2,9$ мкм, которые были унаследованы от микродуплексной структуры, образованной ранее на первой высокотемпературной стадии ДТО. Аналогичные изменения при формировании УМЗ структуры наблюдаются в сплаве ЭК61, в котором выделяется термически стабильная δ -фаза на основе интерметаллида Ni_3Nb .

2. Показано, что, что формирование в исследованных жаропрочных никелевых сплавах УМЗ структуры смешанного типа создает условия для реализации эффекта низкотемпературной сверхпластичности, которая проявляется при температурах на 200-285°C ниже, чем с тех же материалах с микродуплексной структурой.

**Исследования сплава ЭП741НП были проведены в рамках Госзадания ИПСМ РАН №122011900470-7, а сплава ЭК61 по теме Госзадания № 122011900474-5.*

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., Столофф Т., Хагель В. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. / В 2-х кн. – Пер. с англ. // М.: Металлургия, 1995. – 568с.
3. Кайбышев О.А. Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов. // М.: Наука, 2002. – 438с.
4. Мулюков, Р.Р. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технология / Р.Р. Мулюков [и др.]. // М.: Наука, 2014. – 284 с.
5. Валитов В.А. Деформационно-термическая обработка - эффективный метод получения ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры в никелевых сплавах // Письма о материалах. – 2013. –Т.3. – С. 50-55.
6. Патент Российской федерации №2041284. Способ обработки дисперсионно-твердеющих сплавов на основе никеля / Кайбышев О.А., Валитов В.А., Салищев Г.А.
7. Патент Российской федерации №2119842. Способ изготовления осесимметричных деталей и способы изготовления заготовок из многофазных сплавов для его осуществления (варианты) // Утяшев Ф.З., Кайбышев О.А., Валитов В.А.
8. European Patent EP 0 909 339 B1 “Method For Processing Billets From Multiphase Alloys”, Utyashev F.Z., Kaibyshev O.A., Valitov V.A. // 21.11.2001. - Bulletin 1001/47.
9. Кайбышев О.А., Валитов В.А., Салищев Г.А., Влияние состояния γ' -фазы и условий горячей деформации на формирование структуры микродулекс в жаропрочном никелевом сплаве // ФММ. -1993. - Т.75.- Вып.4. - С.110-117.
10. Valitov V.A. Nickel Alloys Structure and Properties Control by Deformation-Thermal Treatment in Solid State Advanced Materials & Technologies.No.3, (2016).
11. Ганеев А.А, Валитов В.А. Формирование ультрамелкозернистой структуры в никелевом сплаве ЭП741НП при горячей деформации в $\gamma+\gamma'$ области// Письма о Материалах. 2015. № 5(2), С. 152-155.
12. Bewlay B.P., Valitov V.A., Kaibyshev O.A., Mukhtarov Sh.Kh., Hardwicke C.U., Gigliotti M.F.X. Mechanisms of Grain Refinement and Superplastic Behavior of Alloy 718 // Proc. of Symp. of TMS: Microstructure modeling and prediction during thermomechanical processing.- Indiana, USA.- Ed. by R. Srinivasan, S. L. Semiatin, A. Beaudoin, S. Fox, Z. Jin.- A Publication of TMS.- 2001.- P.175-185.
13. Valitov V.A. «Formation of Nanocrystalline Structure upon Severe Thermomechanical processing and Its Effect on the Superplastic Properties of Nickel Alloys»// Proc. of the 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives". September 28 – October 1, 2014. Marriott City Center. Pittsburgh, Pennsylvania. USA. TMS. – 2014. – P.665-676.

14. Valitov V.A., Mulyukov R.R., Gigliotti M.F.X., and Subramanian P.R.. Severe thermomechanical processing as an effective method for the preparation of bulk and sheet nanostructured semifinished products from nickel Alloys 718 and 718Plus // Proc. of the Conference “Superalloys 2008”, / In Book «Superalloys 2008» by Roger C. Reed, Kenneth A. Green, Pierre Caron, Timothy P. Gabb, Mi.
15. Ганеев А.А., Валитов В.А., Нагимов М.И., Имаев В.М. Влияние деформационно-термической обработки на микроструктуру и сверхпластические свойства порошкового никелевого сплава ЭП741НП // Письма о материалах, 2020, том 10, выпуск 1, стр.106 – 110.
16. Галиева Э.В. Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al и жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической деформации // диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Уфа, 2021. – 195с.
https://www.imsr.ru/sites/default/files/Disser_GalievaEV.pdf
17. Галиева, Э.В. Влияние всесторонней изотермическойковки на структуру и сверхпластические свойства сплава ЭК61 / Э.В. Галиева, В.А. Валитов, Е.Ю. Класман // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 461 – 465.
18. Galieva, E.V. Low-temperature superplasticity of the Ni-based EK61 superalloy and application of this effect to obtain solid phase joints / E.V. Galieva, V.A. Valitov, R.Ya. Lutfullin, A.A. Bikmukhametova / Defect and Diffusion Forum. – 2018. – Vol. 385. – P. 150 – 154.
19. Valitov V.A., Kaibyshev O.A., Mukhtarov Sh.Kh., Bewlay B.P., Gigliotti M.F.X. Low Temperature and High Strain-Rate Superplasticity of Nickel Base Alloys. International Conference on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM-2000) // Materials Science Forum. – 2000. – V.357 – 359. – P. 417 – 424.
20. Valitov V.A., Bewlay B.P., Mukhtarov Sh.Kh., Kaibyshev O.A., Gigliotti M.F.X. Superplasticity of nickel-based alloys with micro- and submicrocrystalline structures.// Proceeding of MRS Fall Meeting "Superplasticity Current Status and Future Potential. – USA. – Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 2000. – Vol. 601. – P. 43 – 48.
21. Valitov V.A. Formation of nanocrystalline structure upon severe thermomechanical processing and its effect on the superplastic properties of nickel base alloys// Вопросы материаловедения. – №4 (52). – 2007. – С. 311 – 316.
22. Валитов В.А., Салищев Г.А., Мухтаров Ш.Х. Сверхпластичность жаропрочного никелевого сплава с субмикроструктурной структурой // Известия РАН, Металлы. – 1994. – №3. – С. 127 – 131.
23. Валитов В. А., Мухтаров Ш. Х., Раскулова Ю.А. Формирование нанокристаллической структуры при интенсивной деформационно-термической обработке и ее влияние на сверхпластические свойства никелевого сплава с неизоморфными выделениями второй фазы// ФММ. – 2006. – Т. 102, №1. – С.105 – 113.
24. Valitov V. A., Mukhtarov Sh. Kh., Raskulova Yu. A. Processing and Superplastic Properties of Nanocrystalline Alloy 718 During Warm Deformation // Reviews on Advanced Materials Science. – V. 11. – No.2. – 2006. – P. 159 – 166.

ЭВОЛЮЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ТВЕРДОФАЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Столин А.М.

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Россия, г. Черноголовка, Россия, 142432, ул. Академика Осипьяна, 8, email: amstolin@ism.ac.ru

На протяжении столетий в металлургии утверждалась потребность тщательно готовить и использовать для литья только перегретый жидкий материал, способный свободно течь по каналам литейной формы. Постулировался принцип *«Если форму заполнить расплавом не удастся, то все остальное теряет смысл»*, – так, всегда звучал один из фундаментальных принципов литейных технологий. Тогда материал обладает способностью к литью и с ним можно делать все, что умеют металлурги.

В наиболее распространенных традиционных методах переработки полимерных материалов в изделия используются катализаторы и растворители, а также длительные технологические операции нагрева для перевода материала в вязко-текучее или высокоэластическое состояния и его последующее охлаждение. При этом возникает ряд принципиальных трудностей, связанных с неоднородным пространственно-временным распределением температуры в материале, а длительность операций лимитирует общую производительность перерабатывающего оборудования.

Более полувека изделия из фторопласта (стержни, втулки, диски, пластины и другие изделия) изготавливают традиционными методами порошковой металлургии, которые требуют длительный нагрев спрессованной заготовки при температуре около 365 - 375*С. Такая термическая обработка спрессованных блоков не приводит к плавлению кристаллитов, вязкость материала остается очень высокой, Кристаллическое ядро частиц порошка не изменяется в течение всего технологического процесса (прессование, спекание, охлаждение).

Важный вопрос промышленного применения полимеров и композитов на их основе состоит в получении изделий заданной формы и размеров из порошковых материалов или предварительно полученных твердых заготовок. В этой связи весьма важным являются разработки экологически чистых и ресурсосберегающих технологических процессов твердофазной технологии, которые лишены вышеперечисленных недостатков. За этими технологиями большое будущее и их называют технологиями XXI века.

Достоинства твердофазной технологии:

1. Высокая производительность и экономия материала;
2. Отсутствие длительных и энергоемких стадий нагрева и охлаждения расплавленного материала;

3. Безотходность производства;
4. Решение экологических проблем и ресурсосбережения.

Изготовленные с использованием твердофазной технологии заготовки и изделия могут обладать значительно более высокими показателями механической прочности. Это достигается за счет развития пластической деформации и ориентации цепей макромолекул в заданном направлении в условиях высокого гидростатического давления. Данное преимущество, вместе с экологической чистотой производства и сниженным энергопотреблением, делает твердофазную технологию изготовления изделий из ПТФЭ перспективной. Отсутствие системных исследований в этой области не позволяют использовать широкие возможности твердофазной технологии.

В предлагаемом докладе предложен реологический подход для изучения порошковых материалов разных марок фторопласта, различающихся дисперсностью и морфологией частиц, основанный на исследовании кинетики деформирования материала в режиме постоянной скорости деформирования. Определены реологические характеристики этих порошковых материалов. Установлены интервалы напряжений, соответствующие трем различным стадиям процесса деформирования изучаемых марок фторопласта. Определены интервалы давлений, обеспечивающие заданные значения плотности материала, необходимых для формования фторопластовых порошков. Экспериментально установлено, что время прохождения стадии пластического деформирования зависит от дисперсности и морфологии частиц порошка. Чем мельче частицы, тем быстрее протекает данная стадия. Показано, что предварительная подготовка фторопласта может качественно изменить характер процесса уплотнения.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20056, <https://rscf.ru/project/22-13-20056>.*

АНАЛИЗ И УСТРАНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Дмитриев О.С., Баронин Г.С., Барсуков А.А.

**ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106/5, e-mail: phys@tstu.ru**

На современном этапе развития материаловедения полимерные композиты (ПК) являются перспективными конструкционными материалами. В них сочетаются различные свойства, которых нет в традиционных материалах, что позволило применять их в различных отраслях техники [1]. В их основе лежат полимерная матрица и армирующие волокна, ткани и нетканые материалы. Наибольшее распространение получили ПК на основе полиэфирных, эпоксидных, фенолформальдегидных, полиаминоимидных термореактивных связующих, клеев, термопластов, политетрафторэтилена, наполненных непрерывными или рубленными стеклянными, полимерными, углеродными волокнами и тканями с добавлением углеродных нанотрубок, наночастиц кобальта, титана и многими другими наполнителями. Изделия из полимерных композитов могут иметь различную толщину и габаритные размеры от мелких и тонкостенных до крупногабаритных и толстостенных. Толщина изделий также может варьироваться в широких пределах, от единиц миллиметров в стеклотекстолитах электротехнической промышленности до 30-50 мм в авиации и судостроении и до 500 мм как, например RIP-изоляции высоковольтных выводов.

Качественные показатели изделий из ПК, включая физико-механические свойства, геометрические размеры и т.д., определяются не только характеристиками матрицы и наполнителя, а во многом зависят от технологического режима отверждения. Поэтому, актуальной задачей подготовки производства толстостенных изделий из ПК является анализ технологических проблем, возникающих при разработке технологии и организацией производственного процесса.

Основные причины, влияющие на качество и свойства готовой продукции, являются:

1. *Технология производства.* Включает температурно-временной режим отверждения, способ формования, время процесса, режим давления, тип оснастки.

2. *Сырье.* Зависит от поставщиков, условий хранения, способа формования изделий, пропорции ингредиентов.

3. *Контроль и анализ.* Возможность измерения и контроля параметров процесса.

4. *Персонал.* Влияние оказывает квалификация, опыт и мотивация персонала, а также организация труда.

Для проведения анализа причин, влияющих на качественные показатели толстостенных изделий из ПК, была построена причинно-следственная диаграмма Исикавы, представленная на рис. 1.

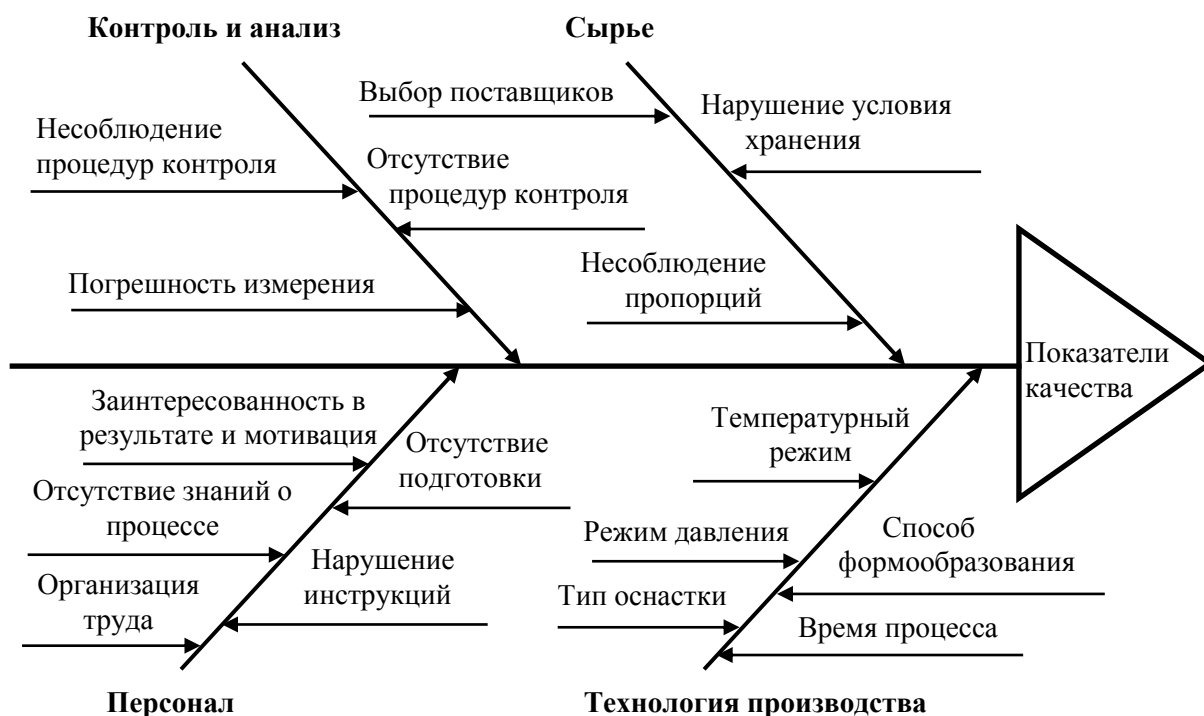


Рисунок 1. Причинно-следственная диаграмма анализа качества ПК.

Устранить указанные технологические проблемы и повысить качественные показатели изделий из полимерных композитов можно оптимизировав температурно-временной режим отверждения изделия. Для этого необходимо использовать методы математического моделирования и оптимизации, включающие постановку и численное решение задачи минимизации некоторого критерия оптимальности, обеспечивающего высокое качество готового изделия [2].

Математическая модель процесса отверждения ПК, необходимая для решения задачи оптимизации, представляет собой систему дифференциальных уравнений теплопереноса, кинетики отверждения, течения связующего и реологических уравнений. Необходимые для решения уравнений математической модели параметры определяются экспериментально с использованием разработанных нами специальных методов и информационно-измерительной системы (ИИС) исследования и оптимизации процесса отверждения полимерных композитов [2].

Расчет оптимальных режимов отверждения производится в классе кусочно-линейных функций. Выбирается критерий оптимальности процесса, задаются ограничения технологического характера, налагаемые на решение. В основу алгоритма решения задачи поиска оптимальных режимов отверждения изделий из ПК различной толщины положен специальный метод поэтапной оптимизации каждой ступени нагрева [2, 3].

Для расчета и анализа режима отверждения с помощью ИИС нами были исследованы характеристики углепластика, необходимые для моделирования процесса отверждения. С целью проверки адекватности исследованных характеристик ПК как параметров математической модели отверждения реальному процессу было проведено сравнение значений экзотермической температуры при отверждении в зависимости от толщины изделия, полученной при численном моделировании и экспериментально измеренных значений.

Заключительным этапом является расчет оптимальных режимов отверждения исследованного ПК и апробация полученного режима в условиях производства сначала модельного, а затем и реального изделия.

На основе причинно-следственного анализа выявлены основные причины и наиболее уязвимые стадии, а также технологические и организационные проблемы, возникающие при технической подготовке производства толстостенных изделий из полимерных композитов. Одним из путей повышения качества изделий из ПК является организация научных исследований для определения оптимальных температурно-временных режимов отверждения толстостенных изделий при вариации свойств сырья и четкое соблюдение этих режимов при производстве ПК. Показаны примеры выбора оптимальных режимов отверждения плоских изделий различной толщины из углепластика, стеклопластика и органопластика, полученные с использованием ИИС. Экспериментальная база данных ИИС и её программное обеспечение позволяют многократно при разных условиях моделировать процесс отверждения, анализировать неравномерность отверждения, оценивать преимущества и недостатки используемого режима отверждения для данного материала и выбирать правильную стратегию оптимизации технологического режима. Это позволит устранить технологические проблемы производства крупногабаритных толстостенных изделий из ПК и повысить их качественные показатели.

Список используемых источников

1. Каблов, Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. – 2020. Т. 90. № 4. – С. 331 – 334.
2. Дмитриев, О.С. Измерительно-вычислительная система для исследования свойств клеевых препрегов и расчета режимов отверждения ПКМ на их основе / О.С. Дмитриев, В.Н. Кириллов, С.В. Мищенко, А.О. Дмитриев // Клеи. Герметики. Технологии. – 2009. – № 6. – С. 22 – 28.
3. Дмитриев, О.С. Влияние режимов термообработки на геометрические и механические характеристики углепластиковых трубчатых элементов / О.С. Дмитриев, И.В. Малков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. Т. 22. № 3. – С. 427 – 438.

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ*

Мухаметрахимов М.Х.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, msia@mail.ru

В настоящее время алюминий и его сплавы используются практически во всех областях современной техники благодаря их низкой плотностью и высокой удельной прочности. Важнейшие потребители алюминия и его сплавов: авиационная и автомобильная отрасли промышленности, электротехническая промышленность и приборостроение, машиностроение и производство предметов народного потребления. Для алюминия и его сплавов применяются практически все промышленные способы сварки плавлением: аргонодуговая сварка, лазерная сварка, плазменная сварка и другие виды сварки. Однако технология сварки алюминия и его сплавов очень сложная; необходимо учесть много разных факторов и особенностей материала, чтобы выполнить сварочные работы на высоком уровне.

Основным недостатком сварки плавлением является неравномерное введение тепла в соединяемые детали. Это приводит к литой структуре расплава и затвердевшего металла сварного шва. Переход через границу расплава к основному металлу сопровождается изменениями механических свойств. При получении различных конструкций сваркой плавлением возникает сложность в разнице температур, необходимых для расплавления оксидной верхней пленки и сварки самого металла. Тем не менее, популярность различных технологий сварки алюминия и его сплавов не снижается. В связи с этим, исследования, направленные на изучение алюминиевых сплавов и на совершенствование режимов их обработки, следует считать актуальными.

В настоящей работе изучены микроструктура и механические свойства твердофазного соединения (ТФС) классического двухфазного алюминиево-цинкового сплава Zn-22% Al в условиях низкотемпературной СП.

В качестве модельного материала был выбран классический алюминиево-цинковый сплав Zn-22% Al в виде прутка диаметром 45 мм и высотой 50 мм.

Ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру получали путем отжига в воздушной печи при температуре 350 °С в течение 3 часа с последующей закалкой в воде. В результате такой обработки образуется равноосная двухфазная структура с величиной зерна приблизительно 0,65 мкм с однородным распределением зерен Zn и Al.

Сварку цилиндрических заготовок в твердом состоянии осуществляли в специальной пресс-форме в вакуумной камере при температуре 250 °С при оптимальных температурно-скоростных условиях деформации.

Металлографические и фрактографические исследования проводили с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (РЭМ)

«TESCAN MIRA3 LMU» и на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM - 2000 EX по относительной объемной доле (протяженности) пор в поперечном сечении зоны соединения.

Угольные прицельные реплики получали путем термического испарения спектрально-чистого углерода на подготовленную поверхность в условиях высокого вакуума на установке ВУП-4 при остаточном давлении $1,33 \times 10^{-3}$ Па.

Механические испытания проводили по схеме “растяжение” при комнатной температуре на универсальном динамометре «INSTRON-1185».

Известно, что при сварке давлением цилиндрических заготовок большой высоты на боковой поверхности свариваемых материалов появляется бочкообразность и зона локализации деформации распространяется на весь объем свариваемых заготовок. При этом наличие оксидного слоя на поверхности свариваемых заготовок препятствует образованию физического контакта. При малых степенях деформации толстый оксидный слой не разрушается и заготовки не свариваются.

Для обеспечения лучшего контакта и более эффективного атомного взаимодействия требуются большие степени деформации.

Для локализации деформации в зоне сварного соединения и удаления оксидного слоя из зоны свариваемых поверхностей цилиндрических заготовок в твердом состоянии использовали специальные пресс-формы.

Подбирая различные пресс-формы смогли создать возможность влиять на развитие локального течения и обеспечивать наиболее выгодные условия деформирования путем оптимизации затрат энергии на деформацию, при этом большая часть заготовок слабо деформировались (рис. 2).

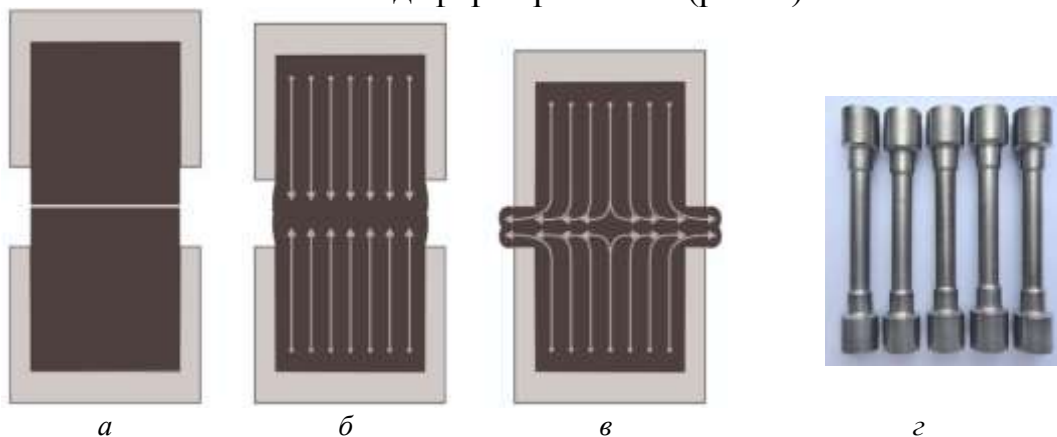


Рисунок 1. Основные стадии процесса моделирования свариваемых заготовок: форма заготовки после 1-ой (а), 2-ой (б) и 3-ой (в) стадии и образцы, вырезанные из сваренных заготовок (г)

В результате нагрева и осадки происходит совместная сверхпластическая деформация и основная деформация локализуется в области формирования ТФС. При этом появляется новый слой без оксидной плёнки на поверхности свариваемых заготовок и ТФС образуется вследствие возникновения металлических связей между ювенильными контактирующими поверхностями свариваемых заготовок и это гарантирует достижение эффективной диффузионной связи.

Микроструктурный анализ ТФС показал, что в зоне соединения отсутствуют характерные дефекты, и граница раздела практически не выявляется (рис. 2а). Видны радиальные линии локализации пластической деформации в зоне сварного соединения и в центре заготовки отсутствует оксидная пленка. Только при больших увеличениях (рис. 2б) по периметру сваренных заготовок видны следы разрушения и разбитые на фрагменты различной формы оксидная пленка размером 0,5-1,0 мкм.

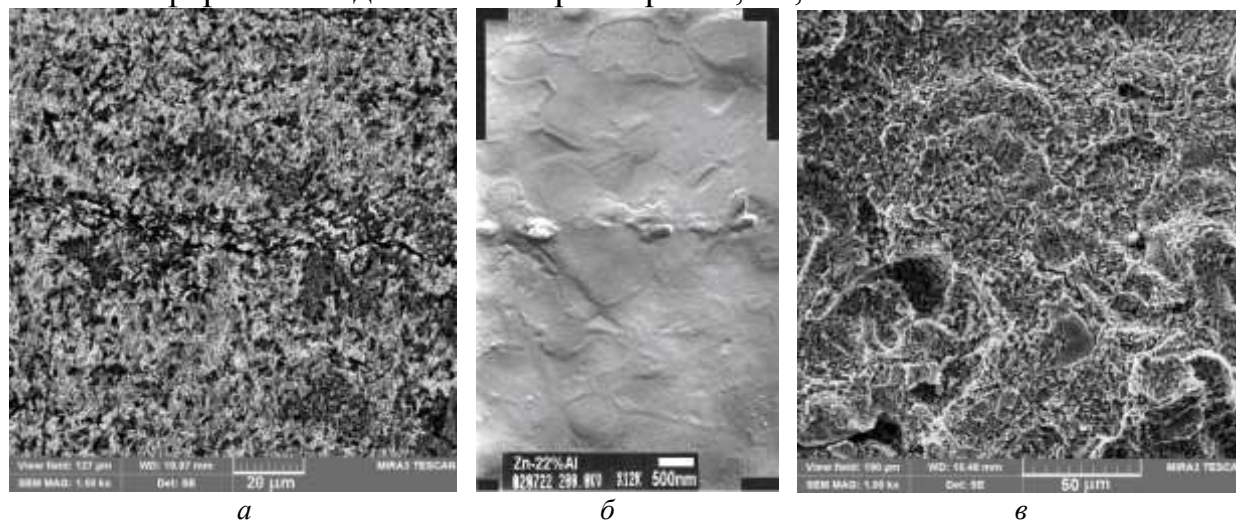


Рисунок 2. Микроструктура твердофазного соединения (а), угольная прицельная реплика (б) и фрактограмма поверхности разрушения после механического испытания сплава Zn-22% Al (в). (а и в - РЭМ, б - ПЭМ)

Результаты механических испытаний на растяжение показали, что образцы имеют различные значения прочности. При этом образцы, вырезанные из центральной части заготовок, характеризуется более высокими значениями прочности и достигает до уровня 85,2 МПа. Показательно, что при испытаниях на растяжения образцы, вырезанные из краевой части заготовок, показали меньшую прочность и составила 81,3 МПа. У всех испытанных сварных образцов формирование шейки практически не наблюдалось, что подтверждается малым значением относительного сужения. Тем не менее, прочность ТФС составила 90-95 % от предела прочности основного материала.

Анализ изломов сваренных образцов показал, что структурные составляющие более мелкодисперсные и разрушение хрупкое без видимых следов пластической деформации и в некоторых участках видны следы оксидных пленок (рис. 3в). Остатки частиц оксидов на границе раздела образцов, наряду с пористостью, является одним из факторов, приводящим к снижению прочности ТФС и разрушению по границе раздела.

Таким образом, экспериментально показана возможность получения ТФС алюминиево - цинкового сплава Zn-22% Al в твердом состоянии заготовок при оптимальных температурно-скоростных условиях деформации (при температуре 250 °С и со скоростью деформации $1,0 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$).

**Работа выполнялась в рамках государственной программы фундаментальных исследований ИПСМ РАН, № 122011900474-5.*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ПРЕССОВАНИЯ В ПЕРЕРАБОТКЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ФТОРПОЛИМЕРА*

Стельмах Л.С. , Столин А.М.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г.
Мерджанова Российской академии наук, Россия, г. Черноголовка, Россия,
142432, ул. Академика Осипьяна, 8, email: lyubov_stelm@mail.ru*

В настоящей работе проведен теоретический анализ процесса одностороннего холодного прессования в условиях внешнего трения порошковых композиционных полимерных материалов на основе фторопласта с малыми добавками, такими, как диоксид кремния SiO_2 , каолинит $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, углеродные нанотрубки, углеволокно (менее 5%). На основе упрощенной системы исходных уравнений с использованием лагранжевых переменных и усреднения по радиусу проведены численные расчеты развития разноплотности по объему материала в зависимости от времени, обусловленные различной скоростью уплотнения нижних и верхних слоев. Установлены новые наглядные представления о кинетике уплотнения порошковых материалов на основе фторопласта, выявлены качественные особенности различных стадий развития разноплотности, найдены ответы на практически важные вопросы, связанные с экспериментальным определением времени процесса прессования для получения качественной заготовки.

Теоретический анализ распределения плотности, скорости и напряжений основывается на известной постановке задач прессования, полученной из представлений о порошковой заготовке как о вязком сплошном материале, состоящем из хаотической смеси несжимаемой фазы и пустоты. Математическая формулировка задачи в цилиндрической системе координат включает в себя уравнения неразрывности, движения и реологические соотношения, которые совместно с начальными и граничными условиями образуют замкнутую систему, в принципе позволяющую определить все искомые зависимости.

Результаты расчетов разноплотности ($\Delta \rho = \rho(H(t)) - \rho(0)$) в образце в зависимости от времени представлены на рис.1.

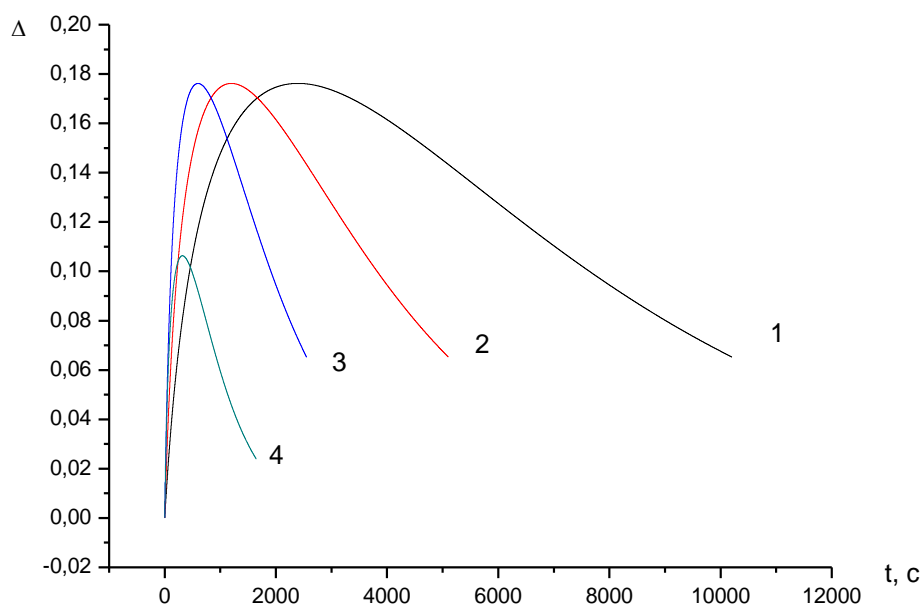


Рисунок 1. Зависимость разноплотности (Δ) от времени (t) для различных значений давления P : 1- $P=50$ МПа, 2- $P=100$ МПа, 3- $P=200$ МПа, 4 - 250 МПа. $\tau_{fr} = 0.05P$, $H_0 = 5 \times 10^{-2}$ м, $d_0 = 2,5 \times 10^{-3}$ м.

Прежде всего, следует отметить немонотонный характер этих зависимостей (наличие максимума), что является следствием важной особенности кинетики уплотнения: потери усилия прессования на преодоление силы пристенного внешнего трения. На первом этапе, соответствующему временному интервалу от начала прессования до времени достижения максимума разноплотности, при больших значениях силы внешнего трения скорость уплотнения нижних слоев меньше скорости уплотнения слоев, примыкающих к подвижному поршню, и нижняя часть заготовки оказывается не охваченной заметным уплотнением. В то же время верхняя часть заготовки уплотняется гораздо быстрее и достигает плотности компактного материала. Это обуславливает возрастание разноплотности во времени до своего максимального значения. С практической точки зрения наличие максимума зависимости разноплотности от времени позволяет определить временной интервал первой активной стадии процесса прессования от начала уплотнения до достижения максимума плотности верхних слоев. Вторая ветвь кинетической кривой разноплотности соответствует дальнейшему уплотнению нижних слоев. Однако на этой стадии происходит заметное уменьшение скорости перемещения плунжера, но процесс уплотнения нижних слоев может продолжаться и при неподвижном плунжере. Эта стадию процесса прессования можно назвать выдержкой порошкового материала под давлением. Все сказанное находится в полном согласии с зависимостью скорости плунжера от времени, которая асимптотически стремится к нулю.

На рис. 2 представлены зависимость разноплотности (Δ) в образце от времени для различных начальных отношений высоты (H) к диаметру (D) заготовки.

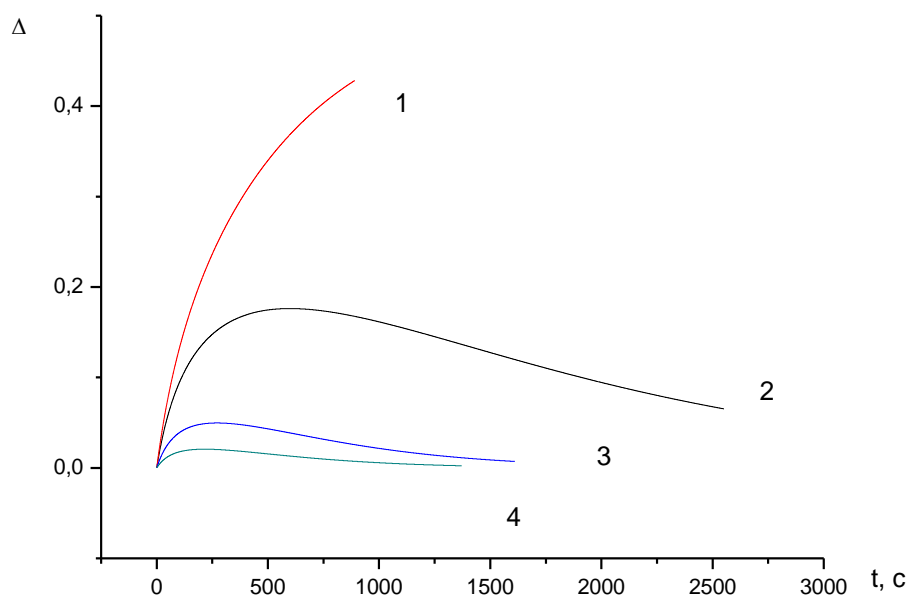


Рисунок 2. Зависимость разнотности (Δ) от времени (t) для различных соотношений высоты к диаметру (H/D): 1- $H/D=3$, 2- $H/D=2$, 3- $H/D=1$, 4- $H/D=0.5$. $P=250$ МПа , $\tau_{fr}=0.05P$.

Из рис.2 (аналогично рис.1) видно, что кривые для разных H/D имеют экстремальный характер: сначала разнотность увеличивается, а затем, после перехода через максимум, падает. В соответствующие моменты времени наименьшее значение разнотности имеет для образца с отношением $H/D = 1$ и $H/D = 0,5$ (кривые 3,4). При увеличении этого отношения (кривые 1,2) разнотность увеличивается. Причиной возникновения перепада плотности прессовок по высоте являются потери усилия прессования на преодоление пристенного трения.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20056, <https://rscf.ru/project/22-13-20056>*

ОПЫТ ГАРМОНИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ ISO НА НЕЛЕГИРОВАННЫЕ, НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ И ЦЕМЕНТУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Хина Б.Б.

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, khina_brs@mail.ru

Большинство стандартов на стали и другие конструкционные материалы, действующие в настоящее время в России, Беларуси и других странах бывшего СССР, были разработаны еще в советское время. Многие ГОСТы не меняются по 5-10, а иногда и 20 лет и имеют недостаточно проработанное описание и небольшой объем. В связи с повышением технического уровня предприятий стран СНГ, появлением нового оборудования, технологий и методик исследований они во многом потеряли актуальность. Зарубежные стандарты ISO и EN на аналогичную продукцию полнее по объему, включают множество приложений и периодически пересматриваются, часто весьма значительно. Поэтому возникает необходимость как разрабатывать новые национальные стандарты, так и гармонизировать, т.е. адаптировать к специфике своей страны передовые зарубежные стандарты. Это особенно важно для расширения рынка сбыта продукции металлургии и машиностроения и выхода на мировые рынки, где действуют международные стандарты.

В России на базе Центра стандартизации и сертификации металлопродукции при ЦНИИЧермете им. И.П.Бардина (г.Москва) работает Национальный технический комитет по стандартизации ТК 375 «Металлопродукция из черных металлов и сплавов» и Межгосударственный комитет МТК 120 «Чугун, сталь, прокат». Последний на уровне СНГ разрабатывает нормативные документы, регламентирующие требования к металлопродукции в области черной металлургии, и при этом акцент делается на нужды потребителей – предприятий металлообработки. В Беларуси деятельность по разработке новых стандартов и гармонизации международных координирует Госстандарт и Белорусский институт стандартизации и сертификации (БелГИСС).

В странах ЕС гармонизовано с международными около 80% национальных стандартов. В Российской Федерации к настоящему времени принято до 20% стандартов ISO и около 60% стандартов МЭК (международного электротехнического комитета), а в Республике Казахстан гармонизовано 95% стандартов в области металлов и металлообработки и в настоящее время проводятся работы по гармонизации стандартов ASTM.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси разработаны три гармонизированных стандарта на конструкционные термообрабатываемые стали: СТБ ISO 683-1-2020 на нелегированные стали [1], СТБ ISO 683-2-2020 на низколегированные стали [2] и СТБ ISO 683-3-2020 на цементуемые стали [3]

(рис. 1). Постановлением Госстандарта от 02.02.2020 г. № 6 они введены в действие на территории Республики Беларусь с 01.05.2020 г. Работа выполнялась по заказу Белорусского металлургического завода (БМЗ) и финансировалась Министерством промышленности. В связи с тем, что проведение гармонизации по степени соответствия «модифицированные» (MOD) требует одновременной гармонизации всех ссылочных стандартов, то работа выполнена по степени соответствия «идентичные» (IDT).

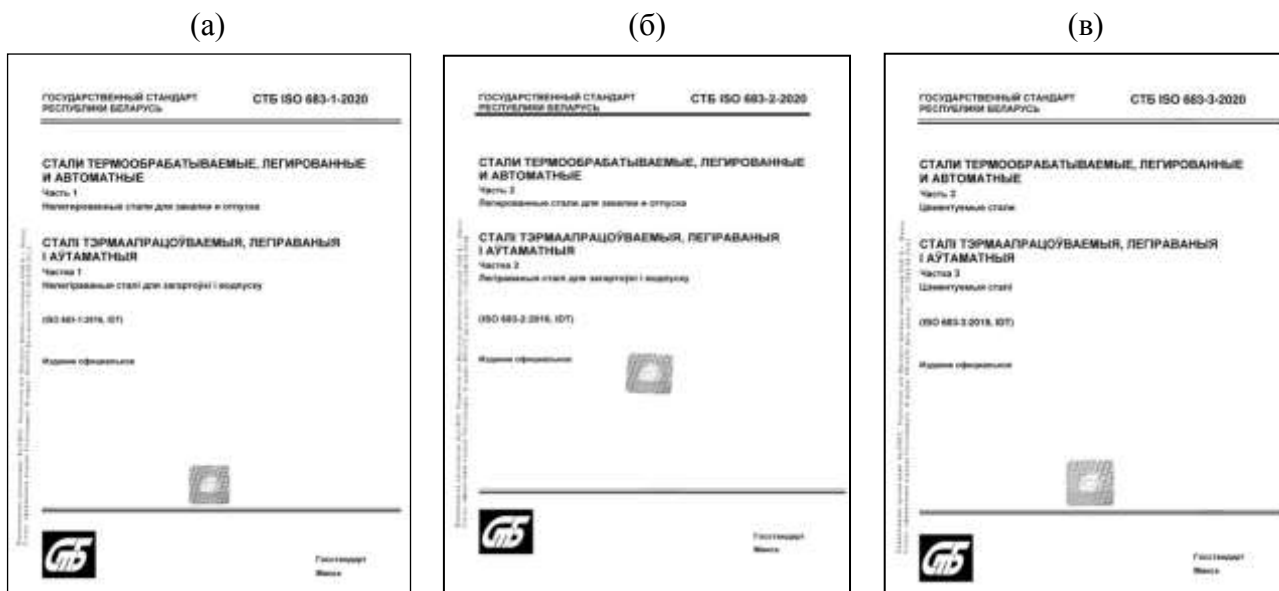


Рисунок 1. Титульные листы официальных изданий СТБ ISO 683-1-2020 (а), СТБ ISO 683-2-2020 (б) и СТБ ISO 683-3-2020 (в).

Следует отметить, что гармонизация стандартов даже по степени соответствия «IDT» – весьма ответственный и трудоемкий процесс, требующий множества согласований с головным заказчиком, заводами–потребителями, БелГИСС и Госстандартом. При этом работа над таким стандартом – это не просто перевод оригинального английского текста, но адаптация понятий, терминологии и условных обозначений, которые во многих случаях не соответствуют или не полностью соответствуют принятым в русскоязычной литературе по металлургии и материаловедению и действующим ГОСТам. Отметим, что язык стандартов ISO по сталям изобилует профессиональным слэнгом, который часто не имеет эквивалентов в русском языке. Также в русскоязычном и англоязычном материаловедении имеется смещение ряда важных понятий, таких как обрабатываемость стали, классификация видов термообработки, принципы деления сталей на качественные и специальные, легированные и нелегированные, и др. Например, в англоязычной литературе отсутствует такое название термообработки, как «улучшение стали» – вместо него в используется термин “quenching and tempering” («закалка и отпуск»), где под отпуском имеется в виду именно высокий отпуск, температурные режимы которого приведены в стандартах ISO в виде таблиц. Если в русском языке имеется одно понятие – обрабатываемость, означающее способность стали к обработке резанием на любых станках, то в англоязычной литературе и

стандартах ISO используется два понятия: “shearability”, т.е. разрезаемость (способность к резке на дисковых, гильотинных и др. установках) и “machinability”, т.е. обрабатываемость на металлорежущих станках, таких как токарные, фрезерные и т.п. Используемое в ISO 683-1, ISO 683-2 и ISO 683-3 название “scatter band” («полоса разброса» – это математический термин), на самом деле означает материаловедческое понятие «полоса прокаливаемости» стали. Поэтому для успешного выполнения работы по гармонизации стандартов надо не просто знать английский язык и материаловедение, но знать материаловедение на английском языке.

В процессе работы нами исправлена ошибка в стандарте ISO 683-3 на цементуемые стали. В нем в разделе A.1 сказано “the cementite precipitating on the grain boundaries of the hypoeutectoid zone of the carburized layer”, что в переводе означает “цементит, выделяющийся по границам зерен доэвтектоидной зоны цементированного слоя”. На самом же деле в цементированном слое цементит по границам зерен выделяется только в заэвтектоидной зоне (“hypereutectoid zone”), а вовсе не в доэвтектоидной. Отметим, что в английском языке термины “hypoeutectoid” (доэвтектоидный) и “hypereutectoid” (заэвтектоидный) близки по написанию, т.е. в оригинальном тексте ISO 683-3:2019 это может быть воспринято как опечатка. Но в русском языке эти термины пишутся по-разному, т.е. специалисту видно, что исходный текст содержит ошибку, которая искажает физический смысл.

Важно подчеркнуть, что введение гармонизированных стандартов ISO не отменяет действующие ГОСТы на аналогичные стали; оно повышает экспортный потенциал металлургической и машиностроительной промышленности и расширяет выбор материалов для инженерно-технических работников (ИТР) при проектировании новой продукции. Но для последнего ИТР должны понимать сходство и различие марок стали, даже близких по химическому составу, по вновь введенным СТБ ISO и по действующим ГОСТам.

В связи с этим по требованию БМЗ и по согласованию с БелГИСС и большим числом белорусских машиностроительных предприятий нами были разработаны и включены в указанные СТБ ISO приложения по сравнению химического состава и механических свойств. Поскольку многие марки стали по ISO 683 не имеют полных аналогов по химическому составу в действующих ГОСТах, потребовалось, прежде всего, разработать критерии для сравнения. Следует также отметить, что в ГОСТах и в стандартах ISO 683 различаются не только наименования и обозначения механических характеристик, но и методика испытаний. Так, в ГОСТ 1050-2013 на нелегированные конструкционные стали эта величина определяется на стандартных образцах с концентратором (т.е. надрезом) вида U (см. ГОСТ 9454-78) и называется «работа удара KU» с размерностью Дж для испытаний при комнатной температуре. В ГОСТ 4543-2016 на легированные конструкционные стали эта величина называется «ударная вязкость KCU» и имеет размерность Дж/см², т.е. измеренная энергия делится на площадь сечения образца в месте концентратора. В ISO 683-1 и 683-2 испытания проводятся на стандартных образцах только одного типоразмера с концентратором вида V, результат

испытаний обозначается как KV_2 , где индекс «2» означает глубину надреза в миллиметрах, и имеет размерность Дж – т.е. измеренная энергия не делится на площадь сечения образца в месте концентратора. Кроме того, ряд сталей невозможно объективно сравнить по механическим свойствам, полученным при испытаниях на растяжение, поскольку они имеют различающийся химический состав и разные температуры закалки и отпуска. Сравнение сталей по химическому составу и механическим свойствам опубликовано нами в статьях [4–6].

По разработанным нами гармонизированным стандартам на БМЗ изготовлено и поставлено на экспорт в страны ЕС (Германия, Италия, Литва) около 1910 тонн проката на сумму более 1,26 млн. долларов США.

В настоящее время нами выполняется работа по гармонизации стандарта ISO 683-17 на подшипниковые стали, который регламентирует состав, структурные характеристики и свойства 35 марок – в отличие от действующего ГОСТ 801-78, где имеется всего 4 марки стали.

Список используемых источников

1. СТБ ISO 683-1-2020. Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 1. Нелегированные стали для закалки и отпуска. – Минск: Госстандарт, 2020. – 52 с.

2. СТБ ISO 683-2-2020. Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 2. Легированные стали для закалки и отпуска. – Минск: Госстандарт, 2020. – 46 с.

3. СТБ ISO 683-3-2020. Стали термообработываемые, легированные и автоматные. Часть 3. Цементуемые стали. – Минск: Госстандарт, 2020. – 40 с.

4. Хина, Б.Б. Гармонизация в Беларуси стандарта ISO на конструкционные углеродистые нелегированные стали: различия в определении состава и механических свойств / Б.Б. Хина, А.И. Покровский, О.А. Толкачева // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 2. – С. 46 – 58.

5. Хина, Б.Б. Гармонизация в Беларуси стандарта ISO на конструкционные легированные стали: различия в определении химического состава / Б.Б. Хина, А.И. Покровский, О.А. Толкачева // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 44–51.

6. Хина, Б.Б. Гармонизация в Беларуси международного стандарта ISO на цементуемые стали: различия в определении химического состава / Б.Б. Хина, А.И. Покровский, О.А. Толкачева // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2022. – № 2. – С. 45–52.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРТОНКИХ ПЛЁНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Хачатурова Т.А.^{1,3}, Бутько В.Г.¹, Гусев А.А.^{1,2}, Лёдова А.В.^{3,4}

¹-Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, г. Донецк,

²-Донецкий национальный университет», г. Донецк,

³-Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

⁴-Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург
khachaturovat@mail.ru

В настоящее время наноструктурные элементы в новейших электронных приборах и устройствах выполняют функции громоздких интегральных схем. Это связано с повышенным интересом учёных к всестороннему исследованию нанотехнологий и наноматериалов как экспериментально так и теоретически [1 – 3]. Стремительно развивающиеся наноструктуры включают в себя металлические или полупроводниковых электроды, разделенные тонким слоем диэлектрического материала и представляют собой туннельные контакты, диоды и туннельные полевые транзисторы [4 – 7]. Оказывается, подобные наноструктуры могут обладать большими энергиями. Несмотря на весьма миниатюрные размеры их можно рассматривать в качестве альтернативных источников энергии [1]. Зарядовая энергия туннельного конденсатора емкостью C и поданными на него напряжением U равна: $W = CU^2/2$. Однако, существующие туннельные токи приводят к быстрой разрядке конденсатора. При поданном напряжении в один электрон-вольт, токи утечки достигают 1А. Для подавления паразитных токов авторы работы [7] предложили использовать в качестве диэлектрика совместно два материала: одни

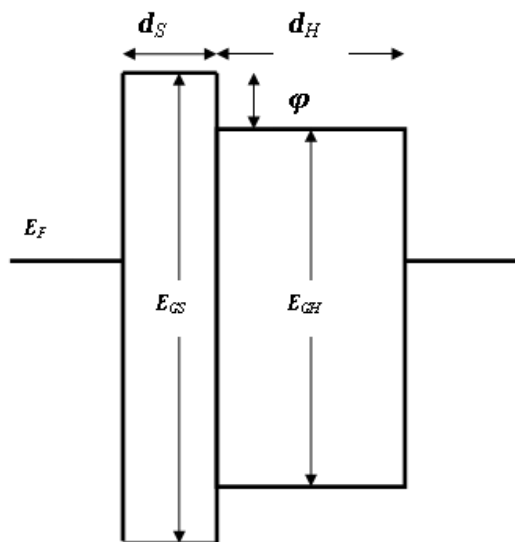


Рисунок 1. Схема конденсатора.

слои представляет собой так называемый «high-K» диэлектрик-оксид материала, с высокой диэлектрической проницаемостью, например оксиды металлов HfO_2 , ZrO_2 и другие [1, 7]. Второй слой – тонкая плёнка диоксида кремния. В этом случае потенциальный барьер представляет собой более сложную структуру и состоит из плёнки «high-K» диэлектрика и тонкой плёнки диоксида кремния, каждая из которых имеет свои толщину и ширину E_{GS} и d_S – для диоксида кремния и E_{GH} и d_H – для high-K» диэлектрика, как показано на рисунке 1.

высокой диэлектрической проницаемостью, например оксиды металлов HfO_2 , ZrO_2 и другие [1, 7]. Второй слой – тонкая плёнка диоксида кремния. В этом случае потенциальный барьер представляет собой более сложную структуру и состоит из плёнки «high-K» диэлектрика и тонкой плёнки диоксида кремния, каждая из которых имеет свои толщину и ширину E_{GS} и d_S – для диоксида кремния и E_{GH} и d_H – для high-K» диэлектрика, как показано на рисунке 1.

Как показывают авторы работы [7]: чтобы токи утечки стали минимальными ширина запрещенной зоны диоксида кремния должна превышать ширину запрещенной зоны «high-K» диэлектрика, т.е. выполняться неравенство:

$$\xi > E_{GS} - E_{GH} - \xi, \quad \xi > 0.$$

На основании качественных рассуждений авторами работы [7] было сделано утверждение, что данное неравенство выполняется всегда. Однако как показано в работе [8], ширина запрещенной зоны диоксида кремния зависит от его толщины. Учитывая этот факт, проведем проверку выполнения условия минимизации токов утечки для предельно малых толщин диоксида кремния.

Большое количество исследований с интересом к моделированию туннельных устройств, привело к тому, что параметры зонной структуры SiO_2 , HfO_2 , ZrO_2 и других «high-K» диэлектриков в настоящее время хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально [9,10] и являются общеизвестными. Определено, что значение E_{GS} ширины запрещенной зоны SiO_2 составляет 9.0 эВ, с допустимым сдвигом $\Delta = \pm 3.2$ эВ [1,9,10]. Значения ширины запрещенной зоны E_G для оксида гафния HfO_2 составляет 5.8 эВ со сдвигом $\Delta = \pm 1.4$ эВ и 5.8 эВ со сдвигом $\Delta = \pm 1.5$ эВ для оксида циркония ZrO_2 . Данные сдвиги Δ авторы большинства работ связывают с пространственными особенностями различных типов кристаллической решетки, а именно с наличием у оксидных диэлектриков различных модификаций элементарной ячейки: гексагональной, кубической, тетрагональной, тригональной и других. Удивительно, что во всех работах при моделировании тонкого и даже предельно тонкого диэлектрического слоя диоксида кремния авторы принимают за основу расчетные значения параметра ширины запрещенной зоны, полученные для объемных кристаллов. Проверим выполнение неравенства для минимизации токов утечки используя данные для E_{GS} и d полученные авторами работы [8]. Так как толщина плёнок используемых «high-K» диэлектриков на порядок превышает сверхтонкий диоксид кремния, берём E_{GH} полученное для объемных кристаллов.

Авторами работы [8] были исследованы плёнки стишовита толщиной от 0.36 до 1.76 нм путём первопринципных расчётов, было показано, что ширина запрещенной зоны E_{GS} существенно зависит от толщины d и при некоторых толщинах составляет менее 5.8 эВ.

Таким образом, условие устранения токов утечки выполняется не при всех толщинах и требует дополнительной проверки при работе со сверхтонкими плёнками диоксида кремния.

Список используемых источников

1. Robertson J. High-K materials and metal gates for CMOS applications / J.Robertson, R.W. Wallace.// Mater. Sci. Eng. R – 2015. – V.88. – P.1 – 41.
2. Хачатурова Т.А. Отрицательная дифференциальная проводимость туннельных структур металл – диэлектрик – металл / Т.А. Хачатурова, А.И.

Хачатуров // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2008. – Т. 134, № 5. – С. 1006 – 1012.

3. Khachaturova T.A. Volt-Ampere Characteristics of Tunnel Junctions from Ferromagnetic Materials // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – Т.№3. – С.47-51.

4. Mihaychuk J.G. Broad-spectrum light emission at microscopic breakdown sites in metal-insulator-silicon tunnel diodes / J.G. Mihaychuk, M.W. Denhoff et al // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 98, N.5. – P. 054502.

5. Векслер М.И. Моделирование туннельного переноса электронов в системе полупроводник-кристаллический диэлектрик-Si(111) / М.И.Векслер // ЖТФ –2018. – Т. 52, вып.8 – С. 900 – 905.

6. Дюк К.Б. Теория туннельного перехода в системе металл-барьер-металл / К.Б.Дюк // в кн.: Туннельные явления в твердых телах. - Москва: Мир, 1973. – 424 с.

7. Векслер М.И. Повышение эффективности кремниевого туннельного МДП-инжектора горячих электронов при использовании оксидов с большой диэлектрической проницаемостью / М.И. Векслер // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 17. – С. 103-110.

8. Электронная структура и свойства двумерного диоксида кремния / Т.А. Хачатурова, В.Г. Бутько, А.А. Гусев // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т.115, вып.1, С. 48 – 51.

9. Гриценко В.А. Атомная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 727 – 737.

10. Chanana R.K. // IOSR J. Appl. Phys. 2014. V. 6. N 4. Ver. II. P. 5 – 61.

ВЛИЯНИЕ КВД И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА*

*Терешкин В.В., Крымский С.В., Автократова Е.В.,
Ситдииков О.Ш., Маркушев М.В.*

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, mvmark@imsp.ru

На примере высокопрочного алюминиевого сплава 1965 (Al-8,1Zn-2,3Cu-0,27Sc-0,10Zr-0,10Mn) анализировали эффект степени интенсивной пластической деформации (ИПД), реализованной кручением под высоким давлением (КВД), на кинетику и уровень пост-деформационного упрочнения/разупрочнения в условиях вылеживания при комнатной температуре. Для этого образцы диам. 20x1.5 мм, вырезанные из гомогенизированного слитка с размером зерна порядка 25 мкм, и содержащие высокую плотность сравнительно однородно распределенных дисперсоидов – наноразмерных выделений алюминидов переходных металлов (ПМ), были подвергнуты термомеханической обработке (ТМО), включавшей закалку, КВД от 0.1 до 10 оборотов при давлении 6 ГПа при комнатной температуре, и пост-ИПД естественное старение длительностью до 500 часов. Для сравнения, часть образцов: а - старили, не подвергая ИПД, и б - выдерживали 1 мин в КВД оснастке под давлением без кручения.

Результаты анализа структуры сплава, проведенного с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), и рентгеноструктурного анализа (РСА), представлены на Рис. 1 и в Таб. 1. Видно, что реализация ТМО сопровождалась непрерывным и более чем двукратным упрочнением сплава с демонстрацией аномально высокой твердости (Рис. 2). При этом трансформация структуры и соответствующие изменения твердости сплава проходили за три этапа. На первом, в результате осадки на 20 % и выдержки при 6 ГПа, отмечали прирост твердости на ~35 HV (Рис. 2), обусловленный увеличением плотности дислокаций почти на три порядка, почти трехкратным уменьшением области когерентного рассеяния (ОКР) и ростом внутренних напряжений (Табл. 1). При этом упрочнение сплава произошло без видимых изменений геометрии исходных зерен (Рис. 1а). Вторая стадия продолжалась до 1 об., в результате которой формировалась развитая ячеистая структура (Рис. 1б-г). При этом плотность дислокаций увеличилась незначительно (Табл. 1) вследствие активной перестройки дислокационно-ячеистой структуры с формированием плотных дислокационных стенок и малоугловых границ. Однако эти факторы привели к более выраженному, чем на предыдущей стадии, упрочнению сплава, превышавшему 50HV. Переход к третьему этапу, отмечавшемуся при КВД до 10 об., качественно преобразовывал структуру в неравновесную нанофрагментированную со средним размером близких к равноосной форме кристаллитов (зерен и субзерен) около 100 нм. (Рис. 1е-з).

Наиболее наглядно об этом свидетельствовали изменения электронограмм. Так на первом этапе они указывали на сохранение крупнозернистой структуры. На втором появлялись рефлексы от кристаллитов, окруженных малоугловыми границами, которые к 2 оборотам формировали кольца Дебая, свидетельствуя о развитии более дисперсных и разориентированных (суб)зерен. Обращает на себя внимание доминирующее упрочнение сплава при КВД всего до 1 об., обеспечившее порядка 85% твердости, достигаемой после 10 об. И что главное, такой высокий уровень обусловлен формированием однородной слабо-разориентированной структуры из-за присутствия высокой плотности наноразмерных дисперсоидов, препятствовавших скольжению дислокаций.

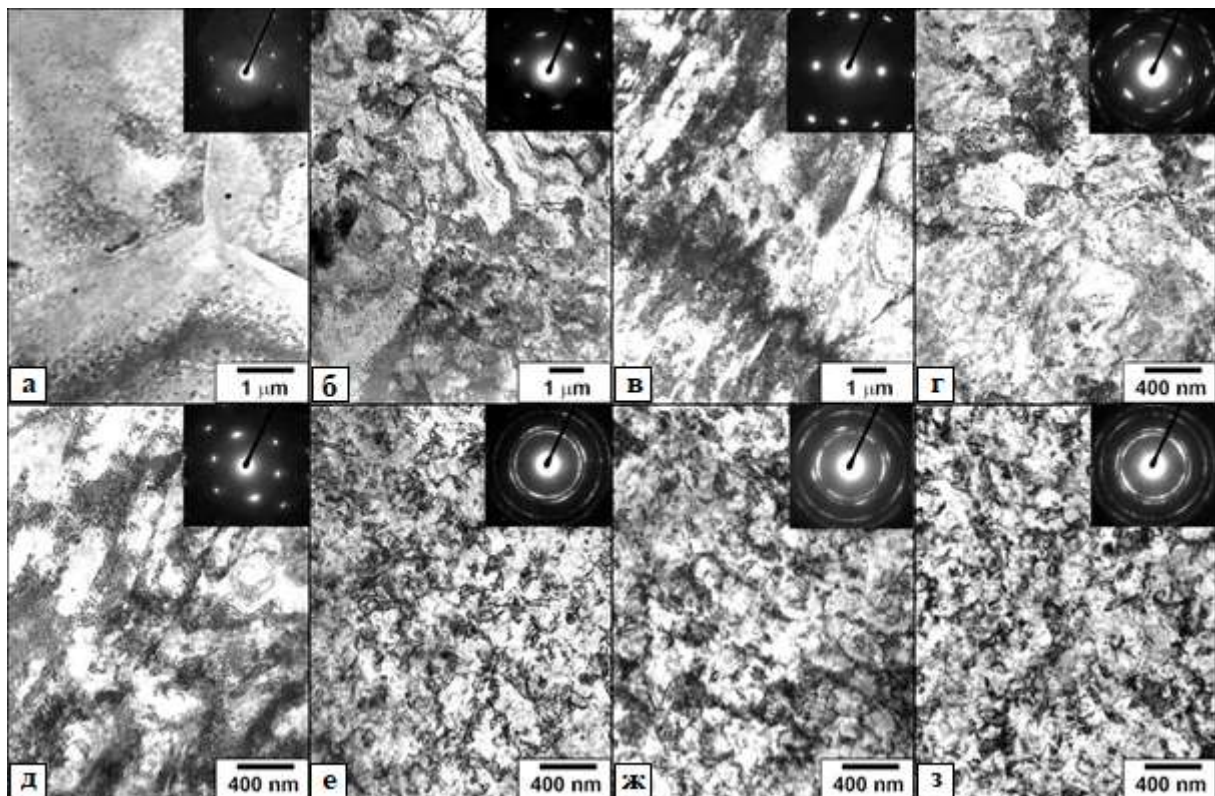


Рисунок 1. ПЭМ структура сплава 1965 после осадки (а) и КВД до 0,1(б), 0,3(в), 0,5(г), 1(д), 2(е), 5(ж) и 10(з) оборотов.

Таблица 1. Параметры структуры сплава 1965 по данным РСА.

| Состояние | ОКР, нм | Микронапряжения решетки, % | Плотность дислокаций, 10^{14} м^{-2} |
|-----------|------------|----------------------------------|---|
| Исходное | 114*/- | 10^{-6} /- | 0,006/- |
| Сжатие | 53/62 | 0,179/0,171 | 4,0/3.9 |
| КВД 0.1 | 38/50 | 0,127/0,185 | 4,0/4.5 |
| КВД 0.3 | 32/46 | 0,121/0,162 | 4,5/4.2 |
| КВД 0.5 | 33/46 | 0,147/0,155 | 5,3/4,1 |
| КВД 1 | 32/42 | 0,178/0,172 | 6,7/4,9 |
| КВД 2 | 29/44 | 0,146/0,168 | 6,1/4,6 |
| КВД 5 | 23/35 | 0,152/0,146 | 7,9/5,1 |
| КВД 10 | 25/35 | 0,169/0,167 | 9,3/5,8 |

*перед/после вылеживания 500 ч.

При последующем вылеживании твердость образцов, подвергнутых осадке и кручению до 1 об., непрерывно увеличивалась с ростом степени деформации и времени вылеживания, как в недеформированном сплаве (Рис.3). Такое поведение было вызвано превалированием упрочняющего эффекта от старения. В остальных ИПД состояниях их упрочнению предшествовало незначительное разупрочнение, величина и длительность которого контролировались степенью деформации. Однако, после 500 часового старения твердость сплава в этих состояниях восстанавливалась до значений, зафиксированных после КВД. Такое поведение было вызвано конкуренцией процессов статического возврата и зонного старения, а именно превалированием первого на начальной стадии вылеживания, и наоборот.

Таким образом, кинетика и величина эффекта старения сплава, как и следовало ожидать [1 – 3], определялись параметрами сформированной перед старением (нано)структуры матрицы. При этом максимальное упрочнение фиксировали в дислокационно-ячеистой структуре. При переходе же к более разориентированной нанофрагментированной структуре зонное старение сначала не успевало компенсировать разупрочнение, вызванное возвратом структуры матрицы (Рис. 3), о чем свидетельствовало уменьшение плотности дислокаций, внутренних напряжений и увеличение ОКР (Табл. 1). Одной из причин могло быть растворение формирующихся кластеров перестраивающимися дислокациями. Когда же интенсивность возврата уменьшалась, эффект старения превалировал и повышал твердость до уровня, зафиксированного после КВД, за счет сочетания трех упрочняющих эффектов: дисперсионного твердения от наноразмерных алюминидов ТМ, структурного упрочнения от деформационного наноструктурирования матрицы при КВД и зонного старения при вылеживании после ИПД.

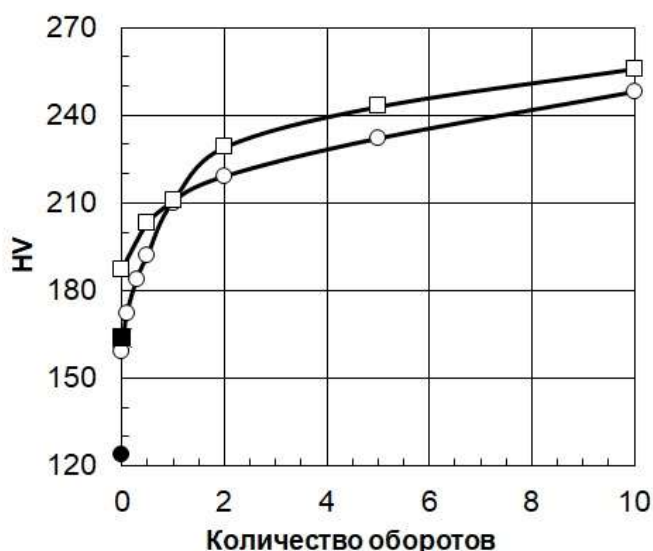


Рисунок 2. Зависимости твердости (HV) от степени деформации сплава 1965 после КВД (○) и последующего естественного старения (□). (•) и (■) твердость слитка после закалки и естественного старения, соответственно.

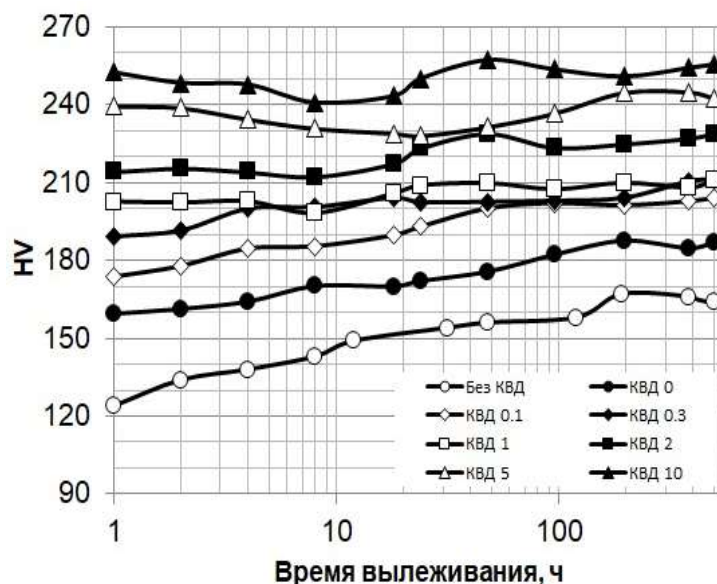


Рисунок 3. Кинетика естественного старения сплава 1965 до и после КВД до различных степеней. Состояния КВД 0-10 - после сжатия и соответствующего числа оборотов.

Заключение. КВД при комнатной температуре и давлении 6 ГПа всего до одного оборота оказывает доминирующий эффект в деформационном упрочнении высокопрочного алюминиевого сплава 1965 и приводит к почти 85% твердости, достигаемой после 10 оборотов. И такое упрочнение сплава обусловлено формированием лишь однородной малоразориентированной дислокационно-ячеистой наноструктуры. Одну из главных ролей в ее формировании играют наноразмерные алюминиды ПМ, препятствующие динамическому возврату за счет ограничения подвижности решеточных дислокаций. При последующем естественном старении до 500 часов изменения твердости сплава происходили в пределах 30 HV и зависели от степени деформации при КВД. В предварительно осаженном и прокрученном до 1 оборота сплаве старение приводило к его непрерывному упрочнению. Сильнее же прокрученные образцы перед упрочнением разупрочнялись пропорционально числу оборотов. В результате сплав после КВД в диапазоне 0,1-1 оборотов и последующего вылеживания приобретал твердость около 210 HV, а после КВД до 5 и 10 оборотов примерно 250 HV.

**Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию ИМСП РАН на базе ЦКП «Структурные и физико-механические исследования материалов».*

Список используемых источников

1. Маркушев М.В. Перспективные материалы. Т. VIII: учебное пособие под ред. Д.Л. Мерсона. Тольятти, Изд-во ТГУ (2019) с.227.
2. M.V. Markushev, E.V. Avtokratova, Yu.L. Burdastykh, S.V. Krinsky, O.Sh. Sitdikov. Lett. Mater. 10(4), 517 (2020).
3. М.В. Маркушев, Е.В. Автократова, О.Ш. Ситдииков. Письма о материалах. 7(4), 459 (2017).

АНАЛИЗ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ ЦЕМЕНТОВАННОЙ СТАЛИ 20MnCr5

Шерстеникин П.А., Мордасов Д.М.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
mit@tstu.ru*

Повышение качества продукции металлообрабатывающего производства, производительности процессов обработки резанием и снижение себестоимости полученных изделий в значительной степени определяется качеством используемого инструмента.

Обеспечение износостойкости металлообрабатывающего инструмента, возможно двумя путями:

- целенаправленное изменение структуры поверхностного слоя для его упрочнения;
- нанесение износостойких покрытий.

Одним из широко применяемых методов структурного изменения является диффузионное насыщение стальной поверхности углеродом. Этот процесс называется цементацией или науглероживанием.

Проведение процессов термической и химико-термической обработки является сложной технологической задачей. Разработанная технология должна обеспечивать высокую твердость и износостойкость поверхностного слоя инструмента в сочетании с высоким комплексом прочностных свойств сердцевины.

Качество процессов термической и химико-термической обработки принять контролировать металлографическими методами, предусматривающими подготовку образца (шлифа), выявление его микроструктуры, путем химического (или другого) травления и изучения ее при помощи микроскопа [1].

Настоящая работа посвящена металлографическому исследованию структуры цементованной стали 20MnCr5

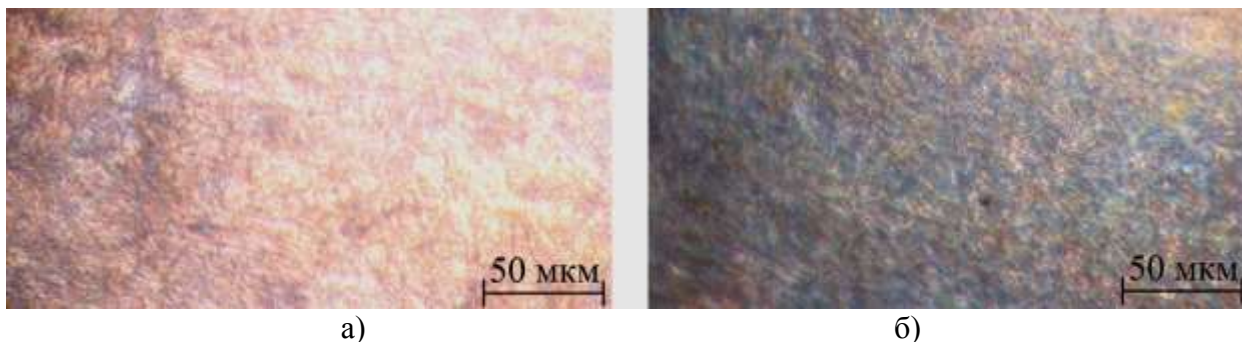
В табл. 1 представлены результаты определения химического состава стали при помощи спектрометра SPECTROMAXx.

Таблица 1. Результаты спектрального анализа цементованной стали 20MnCr5.

| | C | Si | Mn | Cr | Ca | P | S | Fe |
|--|-------|-------|------|------|--------|--------|-------|------|
| Сердцевина | 0,172 | 0,229 | 1,32 | 1,31 | 0,0006 | 0,0089 | 0,022 | 96,4 |
| Поверхностный слой | 0,660 | 0,247 | 1,37 | 1,31 | 0,0024 | 0,0110 | 0,025 | 95,8 |
| Примечание – содержание элементов в %. | | | | | | | | |

Наиболее существенные отличия поверхностного слоя и сердцевины отмечены по содержанию углерода и кальция - в поверхностном слое их больше на 300 %. Изменение содержания этих элементов связано с протеканием процессов диффузионного насыщения в твердом карбюризаторе.

На рис. 1 показана микроструктура образца, полученная при помощи микроскопа ММР-2Р, при увеличении 500х. Темная область на микрофотографии – цементованный слой, светлая – сердцевина. В результате измерений получено среднее значение толщины диффузионной зоны, равное 780 мкм.



а) б)
Рисунок 1. Микроструктура цементованной стали 20MnCr5:
а – сердцевина; б – цементованный слой

Цементованный слой (рис. 1, б) имеет структуру, которая по ГОСТ 8233-56 может быть охарактеризована как мелкоигльчатый мартенсит с размерами игл не более 4 мкм. Твердость поверхностного слоя составляет 61÷64 HRC.

Твердость сердцевины лежит в пределах 44÷49 HRC. Такая твердость характерна для бейнитной структуры (рис. 1, а).

Таким образом, сочетание науглероженного поверхностного слоя и бейнитной структуры сердцевины обеспечивает высокие прочностные свойства стали 20MnCr5.

Список используемых источников

1. Мордасов Д.М. Металлографический анализ стали X2CrNiMoCuN25-6-3 после различных режимов ее термической обработки // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 9 (111). - С. 3-6.

РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА Ф – 4 ПРИ ОДНООСНОМ ПРЕССОВАНИИ*

Аверичев О.А., Столин А.М., Столин П.А.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова, Черноголовка
averichev@ism.ac.ru;*

Современное развитие полимерной промышленности требует новых подходов и методов создания изделий из фторполимерных материалов. В настоящее время при изготовлении изделий из фторполимеров часто используют экономически затратные методы, такие как метод механической обработки, дающий большое количество отходов в виде стружки. В этой связи весьма важным является разработка экологически чистых и ресурсосберегающих технологических процессов твердофазной технологии, которая обладает рядом преимуществ:

- высокая производительность и экономия материала;
- отсутствие длительных и энергоемких стадий нагрева и охлаждения расплавленного материала;
- безотходность производства.

В настоящей работе обсуждается реологический подход к нахождению оптимальных условий холодного прессования новых триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена марки Ф-4 с различными наполнителями, которые должны обеспечить изделиям на их основе повышенные износо-, морозостойкость, прочность и эластичность для экстремальных условий эксплуатации. Проведено изучение кинетики процесса уплотнения композитных порошков на основе политетрафторэтилена Ф-4 с такими функциональными добавками, как углеродные волокна (УВ), углеродные нанотрубки (УНТ), каолинит ($Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$), диоксид кремния (SiO_2).

Методами твердофазной технологии было изучено реологическое поведение композитного материала. для чего проводилось измерение зависимости давления во времени. Далее, исключая время как параметр, строились зависимости давления от деформации и напряжения от плотности (пористости). Данный эксперимент проводился на испытательной машине «Инстрон» в режиме постоянной скорости. Максимальное усилие, вызываемое при нагружении, составляло 52,6 кН. Измерения проводились в специальной пресс-форме при комнатной температуре в широком интервале скоростей нагружения.

Выбор оптимальных условий прессуемости можно осуществлять на основе реологической кривой «напряжение – деформация», построенной на основании кривой «давление прессования – изменение высоты». Такая кривая

позволяет определять реологические характеристики материала, например, модуль сжатия, выявить механизм деформирования и находить оптимальные условия формуемости. Деформация рассчитывается как отношение текущей высоты заготовки к исходной высоте, принимая поперечное сечение цилиндрической заготовки в процессе деформирования неизменным. Напряжение можно принять равным давлению на плунжере пресса (в допущении однородности деформирования).

Из полученных зависимостей было выделено три стадии деформирования. Первая стадия ограничена значениями деформаций до 55 % и сопровождается линейным ростом напряжений, не превышающих 5 МПа. На этой стадии увеличение деформации происходит за счет свободного перемещения частиц порошка и заполнения пустот, при этом образуется контакт между частицами. Вторая стадия соответствует деформациям ϵ от 55% до 65%. и отражает очень крутой нелинейный рост напряжений (5-30 МПа) при замедленном росте деформаций. На этой стадии перемещение частиц происходит за счет аккомодации (приспособления) их между собой и частично за счет деформации объема частиц. Эта стадия требует больших усилий для дальнейшего гетерогенного деформирования материала. Именно эта стадия представляет наибольший технологический интерес, так как в материале накапливается определенная доля пластической деформации. Однако пластическое состояние имеет место не во всех точках материала, поэтому возникают трудности с выбором условий пластичности для пористых материалов. На третьей стадии (30-110 МПа) при увеличении напряжений в широком диапазоне происходит незначительный прирост деформации ($\Delta\epsilon \sim 5\%$). При этом процесс уплотнения происходит, в основном, за счет роста контактной поверхности при деформации частиц.

Были определены такие характеристики, как модуль сжимаемости G , коэффициент сжимаемости $k_{сж}$. Модуль сжимаемости численно равен тангенсу угла наклона линейного участка диаграммы напряжение-деформация. Коэффициент сжимаемости характеризует обратимое уменьшение высоты (объема) образца под действием давления и количественно определяется по формуле:

$$k_{сж} = -\frac{1}{h_{нач}} \cdot \frac{\Delta h'}{\Delta p'}, \quad (1)$$

где $\Delta h'$ и $\Delta p'$ – предельные значения изменения высоты и давления линейного участка. По физическому смыслу он характеризует способность материала к уплотнению на начальной (линейной) стадии, во время которой интенсивность уплотнения максимальна.

Для определения оптимального интервала давлений прессования строились реологические кривые зависимости напряжений σ от относительной плотности заготовок ρ , рисунок 1. Относительная плотность заготовки определялась как:

$$\rho_{отн} = \frac{\rho(t)}{\rho_c}, \quad (2)$$

где $\rho(t)$ – плотность заготовки в текущий момент времени, ρ_c – расчетная плотность компактной заготовки из того же материала.

Для рассматриваемых в данной работе композиций оптимальный интервал давлений прессования составил 30–80 МПа. В указанном интервале в материале накапливается определенная доля пластической деформации, обеспечивающая высокую прочность заготовкам, при этом плотность заготовок становится близкой к плотностям компакта.

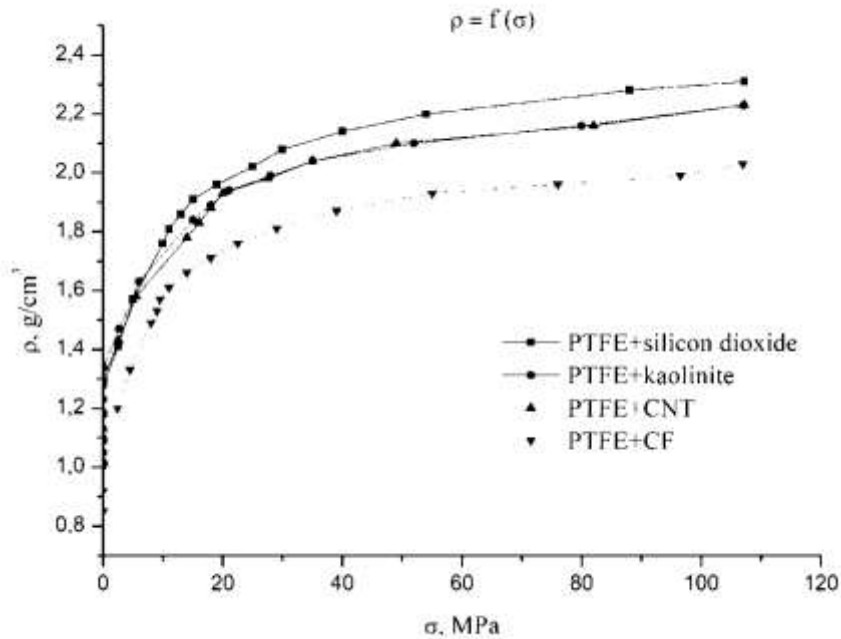


Рисунок 1. Зависимости плотностей композитных смесей от напряжения

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20056, <https://rscf.ru/project/22-13-20056>.*

ЦЕМЕНТАЦИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В ТВЁРДОМ КАРБЮРИЗАТОРЕ

Коняхина Н.С., Панченко Е.Б.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
conyahina.nina@yandex.ru*

Существует множество способов для повышения качества материала и улучшения его эксплуатационных характеристик. Востребованным направлением воздействия на металлы и сплавы для изменения химического состава, структуры и свойств в поверхностном слое является химико-термическая обработка. Для повышения прочности поверхности нержавеющей стали, а также для увеличения её коррозионной стойкости применяют такой вид обработки, как цементация.

Цементация – это процесс химико-термической обработки, заключающийся в насыщении поверхностного слоя атомами углерода. Самыми распространёнными средами для осуществления этого процесса является твёрдый карбюризатор и газовая среда, реже применяются жидкостной и вакуумный варианты. Самая прогрессивная газовая цементация не даёт на нержавеющей сталях необходимого науглероживания и не приводит к получению глубоких карбидосодержащих слоёв. Метод цементирования нержавеющей стали получил широкое распространение в металлургии.

При цементации происходит увеличение износостойкости и твердости материала, но при этом сохраняется вязкость сердцевины. Для этого поверхностный слой стали насыщается углеродом до эвтектоидной концентрации. Цементация нержавеющей сталей обычно ведётся на глубину от 0,5 до 2 мм. Очень редко происходит цементирование на большую глубину или меньшую глубину.

Таблица 1. Продолжительность цементации в твёрдом карбюризаторе при температуре 910 – 950 °С в зависимости от требуемой глубины слоя и размера ящика.

| Минимальный размер ящика, мм | Общая продолжительность процесса, ч при глубине слоя, мм | | | |
|------------------------------|--|-----------|-----------|-------------|
| | 0,5 – 0,7 | 0,7 – 0,9 | 0,9 – 1,2 | 1,2 – 1,5 |
| 100 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 – 7,5 | 7,5 - 9 |
| 150 | 4,5 – 6,5 | 5,5 – 6,5 | 6,5 – 8,5 | Св. 9 до 11 |
| 200 | 5,5 – 6,5 | 6,5 – 7,5 | 7,5 – 9,5 | 10 - 12 |
| 250 | 6,5 – 7,5 | 7,5 - 8,5 | 8,5 – 9,5 | 11 - 14 |

Твёрдым карбюризатором для осуществления науглероживания поверхности стали выступает древесный уголь. В березовый или дубовый уголь добавляют углекислый барий и кальций, возможна добавка углекислого натрия, а также воду. Соли и вода занимают не более 30% от общего объема цементационной смеси.

Сам процесс цементации осуществляется путём укладки изделий в специальный ящик, изготовленный из жаропрочного материала, заполненный необходимым объемом карбюризатора. Ящик загружается в камерную печь, предварительно нагретую до температуры 550 - 600 °С. Температура нагрева печи во время процесса составляет 910 – 950 °С. При необходимости ускорения процесса температуру можно повысить до 1000 – 1050 °С. Именно при таком температурном режиме происходят диффузионные изменения в структуре материала на уровне атомов. Температуру нагрева выбирают, учитывая концентрацию примесей и углерода [1].

Главным условием осуществления метода является правильно подобранное время выдержки и поддержка постоянной температуры в печи [2].

В процессе цементации изменяется не только свойства материала, но и его фазовый состав и атомная решетка, что требует дополнительной термической обработки в виде закалки и низкого отпуска. Закалка обеспечивает упрочнение науглероженного слоя и исправляет структуру перегрева, а благодаря низкотемпературному отпуску мартенсит закалки в поверхностном слое переходит в мартенсит отпуска. В целом поверхность получает такие же характеристики, как и при обычной закалке, но при этом существует возможность контроля в узком диапазоне температур, чтобы избежать различных дефектов материала [3][4]. Цементация нержавеющей стали немного сложнее, по сравнению с такой же обработкой другого материала, но в то же время это качественно улучшит характеристики этого вида металла.

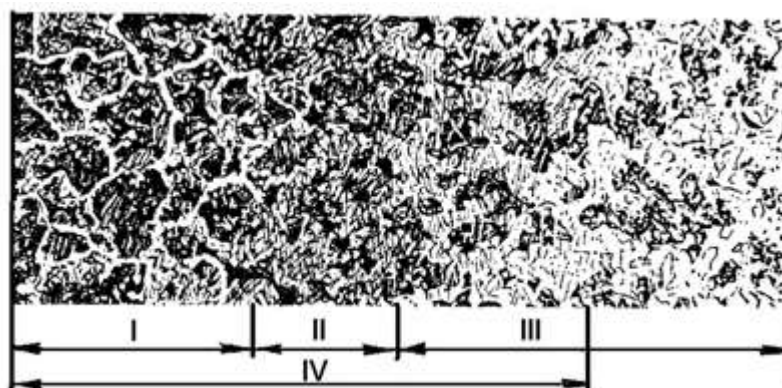


Рисунок 1. Микроструктура цементированной стали по зонам (x200):

I – заэвтектоидная, II – эвтектоидная, III – доэвтектоидная,

IV – глубина цементированного слоя

Основным недостатком такого вида химико-термической обработки является длительность процесса выдержки. Но несмотря на это, цементация в твёрдом карбюризаторе так же имеет ряд преимуществ:

– равномерность науглероженного слоя;

– возможность контролировать ход процесса с помощью образцов-свидетелей;

– доступность и низкая стоимость сырья для карбюризатора;

– простое в использовании и обслуживании оборудование.

После проведения цементации твёрдость науглероженного слоя достигает 58 – 61 единиц HRC, увеличивается предел выносливости материала, повышается износостойкость поверхности и сопротивление абразивному износу.

Список используемых источников

1. Полевой, С.Н. Упрочнение металлов: Справочник / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. // М.: Машиностроение, 1986. 320с., ил. – (Серия справочников для рабочих).

2. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов. / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. // М.: Металлургия, 1985. – 256с.

3. Металловедение и термическая обработка стали: В 3т. Справочник: 4-е изд. т.2. Основы термической обработки // Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1991. – 368с.

4. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов. // М.: Металлургия, 1986. – 480с.

ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНО – АБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ (Ti – C) – Fe МЕТОДОМ СВС – ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Михеев М.В., Болоцкая А.В., Столин А.М., Бажин П.М.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова РАН, Черногоровка, mixeev777@rambler.ru*

На сегодняшний день при производстве деталей в промышленности наблюдается тенденция к увеличению энергоэффективности процессов на производстве. Все более высокие требования предъявляются к чистоте поверхности изготавливаемых деталей. Механическая обработка функциональных поверхностей деталей определяет их эксплуатационные свойства, работоспособность и надежность, что влияет на экономику производства. В связи с чем, все большее внимание уделяется малоотходным процессам обработки деталей, в том числе отделочным операциям (шлифование, полирование, доводка) [1, 2]. Для получения высокой чистоты поверхности простых и сложно – профильных деталей широкое распространение получил метод магнитно-абразивной финишной обработки (МАФО). Данный метод базируется на применении магнитно – абразивных материалов (МAM), представляющих собой композицию из абразивной и магнитной составляющих. В качестве первой широко применяются карбиды, бориды и другие сверхтвердые материалы. В роли магнитной составляющей наибольшее применение нашло железо, обладающее необходимыми магнитными свойствами, а также сравнительно небольшой стоимостью.

Среди традиционных МAM сбалансированными по свойствам и себестоимости считаются материалы на основе системы TiC-Fe. Такие материалы возможно изготавливать двумя методами: псевдо-плавлением и самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС) [3]. Первый метод подразумевает длительное спекание в высокотемпературных печах с защитной атмосферой, с последующим измельчением полученных брикетов в размольных агрегатах, при этом для каждого технологического этапа характерны высокие энергозатраты, что в свою очередь приводит к увеличению стоимости псевдо – плавленных МAM. Альтернативным способом получения МAM на основе TiC-Fe является метод СВС – измельчения, совмещающий синтез в режиме горения и измельчение продуктов до порошкового состояния, в одном технологическом цикле и на одной установке. При этом отпадает необходимость в сложном высокотемпературном оборудовании и больших энергозатратах [4, 5].

Данная работа посвящена применению технологического процесса СВС – измельчения, с целью получить магнитно – абразивный материал на основе TiC-Fe, с различным содержанием железной составляющей, в условиях сочетания синтеза в режиме горения и сдвиговых деформационных

воздействий. Преимущества выбранного способа при синтезе порошковых материалов заключаются в возможности варьировать деформационные параметры (скорость деформирования, внешнее давление, тип деформирующего устройства), которые оказывают существенное влияние на структурообразование материала, при этом нивелируется ряд трудностей, связанных с измельчением до порошкового состояния прочных, трудно деформируемых продуктов синтеза в остывшем до комнатной температуры состоянии и отпадает необходимость использования шаровых мельниц и атриторов.

В результате проведенных экспериментов были получены опытные образцы порошковых материалов на основе TiC, с содержанием 20 и 30 масс. % Fe. Анализ микроструктуры показал, что в ходе проведения синтеза железо расплавляется и смачивает поверхность образовавшихся частиц карбида титана. Также показано, что меняя тип деформирующего устройства (конус, фреза) можно изменять качество получаемого порошка: размер зерна, его форму и морфологию.

Список используемых источников

1. Иноземцев, В.Е., Крукович, М.Г. Обеспечение качества поверхности металлических изделий при комплексных методах обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. №. 7 (68).

2. Kim, U.S., Park, J.W. High-Quality Surface Finishing of Industrial Three-Dimensional Metal Additive Manufacturing Using Electrochemical Polishing // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2019. Т. 6. №. 1. С. 11-21. doi 10.1007/s40684-019-00019-2

3. Мержанов, А.Г. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса. – Черноголовка: Территория, 2003.

4. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов на основе дисилицида молибдена в условиях давления со сдвигом: дисс. канд. техн. наук: 01.04.17 / Михеев Максим Валерьевич. – Черноголовка. 2018. 141 с.

5. Бажин, П.М., Столин, А.М., Михеев, М.В., Алымов, М.И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в условиях совместного действия давления со сдвигом // Доклады Академии наук. Наука. 2017. Т. 473. №. 5. С. 568-571.

ВЛИЯНИЕ МНОГОПРОХОДНОЙ ОБРАБОТКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ КОМПОЗИТОВ АА6063/ТlO₂, СоО, Fe₂O₃

Хайретдинов Н.Ф., Кабирова Д.Б., Фазлыхметов Р.Ф., Имаев М.Ф.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа
nafis@imsp.ru

Алюминиевые сплавы благодаря высокой удельной прочности, устойчивости к коррозии, удовлетворительной пластичности нашли широкое применение в автомобилестроении, атомной и аэрокосмической промышленности, судостроении, строительстве. Свойства алюминиевых сплавов можно улучшить, добавляя в материал матрицы армирующие частицы, получая так называемые композиты с металлической матрицей. Одним из методов создания композитов является обработка трением с перемешиванием (ОТП). ОТП позволяет, не доводя сплав до плавления, равномерно распределить упрочняющие частицы в металлической матрице. [1]. В последнее время получило развитие технология создания *in-situ* композитов. *In-situ* технология основана на синтезе наноразмерных упрочняющих частиц непосредственно в процессе ОТП [2]. Благодаря нагреву при ОТП становится возможным протекание химических реакций алюминия с некоторыми армирующими добавками. Например, при ОТП систем алюминиевый сплав-порошок металла или алюминиевый сплав - порошок оксида металла возможны реакции алюминия с армирующими элементами с образованием наноразмерных частиц интерметаллидов богатых алюминием и оксида алюминия [3, 4]. Для формирования *in-situ* композита применяют, как правило, многопроходную ОТП, что позволяет сформировать композит без внутренних полостей, равномерным распределением частиц и мелкозернистой микроструктурой в зоне перемешивания. *In-situ* композиты отличаются повышенным уровнем механических свойств [5].

В работе [6] провели термодинамическую оценку возможности протекания химических реакций взаимодействия алюминия с порошками Ti, Ni, Fe, TiO₂, NiO, Fe₂O₃ с образованием интерметаллидов и Al₂O₃ в процессе ОТП. Установлено, что использование оксидов металлов более предпочтительно, чем чистых металлов.

В данной работе провели сравнительный эксперимент по формированию *in-situ* композитов в системах алюминиевого сплава с оксидами TiO₂, СоО, Fe₂O₃. В листах алюминиевого сплава АА6063 толщиной 3 мм были вырезаны на фрезерном станке по 6 канавок шириной 1 мм, глубиной 1,5 мм и длиной 90 мм. Расстояние между канавками составляло 1,5 мм. Канавки плотно заполняли порошками TiO₂, СоО или Fe₂O₃. Для того чтобы закрыть канавки с порошком применяли предварительную ОТП с помощью заплечика без наконечника. Далее проводили основную ОТП с наконечником. Длина и диаметр

наконечника равнялись 2 и 6 мм, соответственно. Количество проходов составляло 10.



Рисунок 1. Заготовка перед ОТП.

Микротвердость образцов измеряли на шлифах, вырезанных на электроискровом станке поперек направлению обработки (рисунок 2). Измерения микротвердости по Виккерсу проводили на микротвердомере МВТ-71У4.2 с нагрузкой в 50 г и временем выдержки 10 с. Микротвердость измеряли вдоль линии, расположенной на расстоянии около 1 мм от поверхности контакта с инструментом.

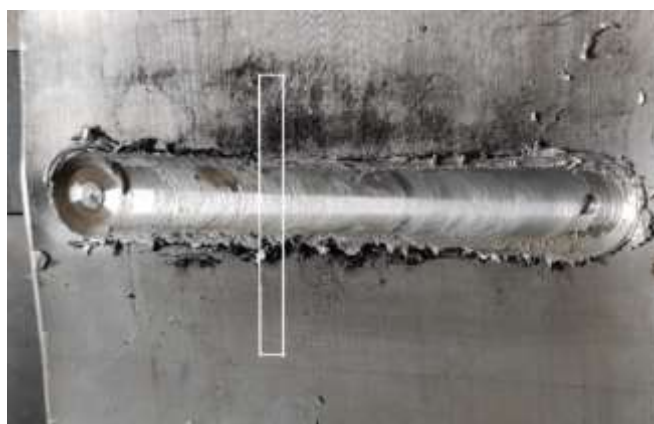


Рисунок 2. Заготовка после 10 проходов ОТП.

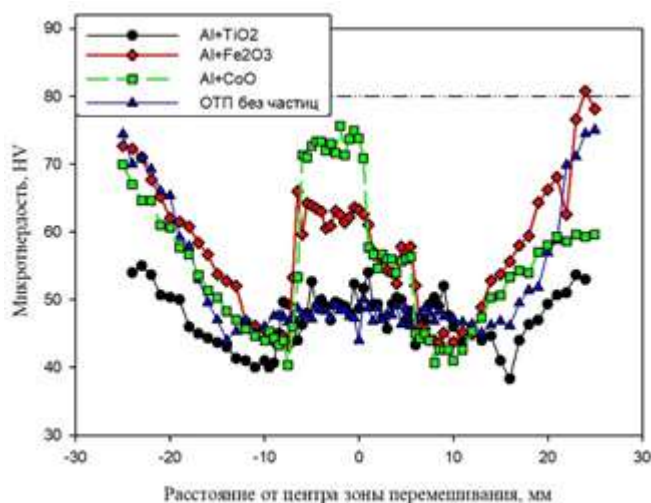


Рисунок 3. Распределение микротвёрдости в зоне ОТП композитов AA6063/TiO₂, CoO, Fe₂O₃ после 10 проходов.

На стороне набегания микротвердость композита AA6063/CoO выше микротвердости листа без частиц примерно 25 HV.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в композите AA6063/TiO₂ образование частиц TiAl₃ и Al₂O₃ если и идет, то очень медленно. Нагрев материала, который происходит в процессе ОТП композита AA6063/TiO₂, недостаточен для начала химических реакций.

В композите AA6063/Fe₂O₃ образование частиц интерметаллидов и оксида алюминия идет быстрее. Наиболее быстро формирование *in-situ* композита идет в системе AA6063/CoO.

Список используемых источников

1. D. K. Sharma, D. Mahant, G. Upadhyay. Mater. Today: Proc. 2020, v.26 (Part 2), p. 506.
2. A N. Gangil, A. N. Siddiquee, S. Maheshwari. Journal of Alloys and Compounds. 2017, v. 715, p. 91.
3. M.S.Weglowski, Friction stir processing—state of the art, Arch. Civil Mech. Eng.18(1)(2018)114–129
4. F.Khodabakhshi, A.P.Gerlich. J. Manuf. Processes. 2018, v.36, p.77.
5. N. Gangil, S. Maheshwari, A.N. Siddiquee. Mater. Manuf. Process., 2018, v.33 (7), p. 805.
6. A. Kh. Valeeva, M. F. Imayev. Letters on Materials. 2021, v.11 (4s), p. 544.

ФОРМУЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ TiC - (5–50 мас. %) NiCr В УСЛОВИЯХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СДВИГОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Антипов М.С., Бажина А.Д., Константинов А.С.,
Чижиков А.П., Бажин П.М., Столин А.М.*

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова РАН, Черногловка, mora1997@mail.ru*

На сегодняшний день большую популярность набирают материалы на безвольфрамовой основе типа TiC-NiCr, которые обладают повышенными физико-механическими свойствами, например, твердостью, прочностью и др. Материалы на основе TiC-NiCr могут применяться в виде защитных покрытий, нанесенных электроискровым легированием (ЭИЛ) и в областях машиностроения, авиа- и судостроения для изготовления деталей и узлов, работающих в зонах повышенного износа, а также в медицине – для изготовления имплантатов.

Передовыми методами на сегодняшний день в получении металлокерамики в порошковой металлургии являются литье [1] и высокотемпературное спекание [2]. Представленные методы имеют свой ряд достоинств и недостатков. Также можно выделить метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3], как энергоэффективный метод в получении металлических, керамических, а также металлокерамических изделий на основе TiC-NiCr. Сущность проведения СВС заключается в проведении экзотермической реакции в режиме послыонного распространения волны горения с образованием продуктов синтеза в виде соединений. Методом СВС возможно получать порошки и спеки, которые в дальнейшем необходимо диспергировать с последующей консолидацией при высоких температурах и длительном времени. Для получения компактных материалов и изделий с минимальной пористостью перспективными методами являются свободное СВС-сжатие [4] и СВС-экструзия [5], сочетающие процессы горения и высокотемпературное сдвиговое деформирование. Одним из важных критериев в проведении СВС-экструзии и СВС-сжатия является формуемость продуктов синтеза, которая определяется комплексом реологических, теплофизических и физико-механических свойств. Результаты, полученные в ходе проведения свободного СВС-сжатия, позволяют выдавать рекомендации к решению проблем получения изделий методом СВС в условиях высокотемпературного сдвигового деформирования.

В качестве исходных реагентов применялись коммерческие порошки: Ti (60 мкм, 99.1%), C (1 мкм, 99.1%) и NiCr (70 мкм, 99.9%). Технологический

процесс проведения свободного СВС-сжатия заключается в инициации послойного процесса горения в режиме СВС, с последующим отсчитыванием времени задержки и приложением давления (5 МПа) плунжера прессы В качестве временного интервала задержки перед приложением давления был выбран диапазон 0-2 с. Полученные значения после проведения экспериментов по СВС-сжатию были построены зависимости (рис. 1) степени деформации материала от массового содержания NiCr.

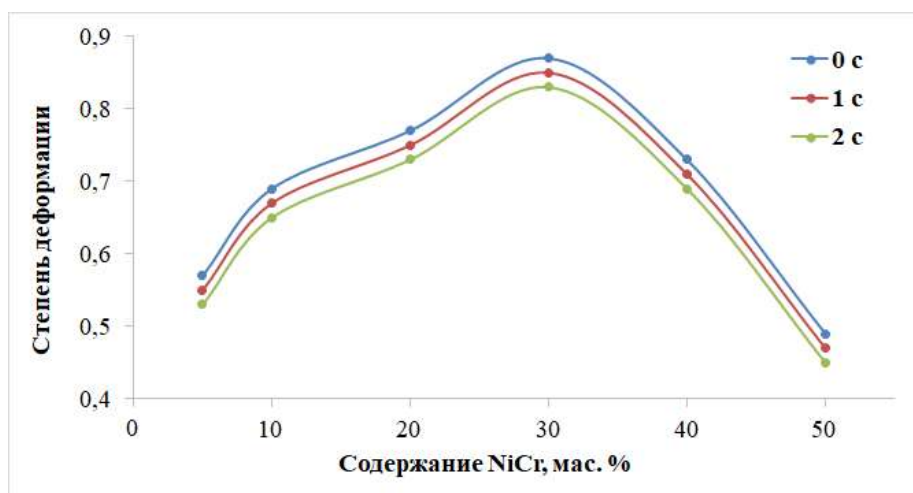


Рисунок 1. Зависимость степени деформации материала от массового содержания NiCr.

Установлено, что с увеличением времени задержки (от 0 до 2 с) степень деформации снижается. Увеличение времени задержки приводит к существенным теплотерям материала после прохождения фронта горения, в результате чего материала остывает и теряет способность к сдвиговому деформированию. Было установлено, что 20–40 мас. % нихрома является оптимальным содержанием в исходной смеси, которое соответствует максимальной степени деформации синтезированного материала при высокотемпературном сдвиговом деформировании.

Список используемых источников

1. Heidari E., Boutorabi S.M.A., Honaramooz M.T. et al. Ablation Casting of Thin-Wall Ductile Iron // *Int. J. Met.* – 2021. – V. 16. – № 1. – P. 166 – 177. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00579-7>
2. Zhong Q., Liu H., Xu L. et al. An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering // *J. Iron Steel. Res. Int.* – 2021. – V. 28. – № 11. - P. 1366-1347. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00576-4>
3. Барамыкина М. В. Наглядная модель СВС реакции / М. В. Барамыкина Е. А. Амосов // *Техника и технологии: пути инновационного развития: сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2014 года / Ответственный редактор: А.А. Горохов.* – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2014. – С. 41-43.

4. Prokopets A.D., Bazhin P.M., Konstantinov A.S. et al. Structure and Mechanical Characteristics of a Laminated Ti₃AlC₂ MAX Phase-Based Composite Material Prepared by a Free Self-Propagating High-Temperature Synthesis Compression Method // Inorg. Mater. – 2021. – V. 57. – № 9. – P. 937 – 941. <https://doi.org/10.1134/S0020168521090132>

5. Antipov M.S., Chizhikov A.P., Konstantinov A.S. et al. Sintered Material Based on Titanium Carbide to Increase the Service Life of Slide Gates // Refract. Ind. Ceram. – 2021. – V. 62. – № 2. – P. 208-211. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00584-7>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ Si₃N₄ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БОРИДОВ ТИТАНА

Болоцкая А.В., Михеев М.В., Бажин П.М.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова РАН, Черноголовка, moon@ism.ac.ru.*

В настоящее время во многих отраслях промышленности наблюдается повышенный спрос на материалы, обладающие высокими физико-механическими характеристиками. Создание новых материалов является весьма сложным и трудоёмким процессом, в связи с чем все большее количество учёных занимаются улучшением свойств уже известных материалов. Повышение физико-механических характеристик материалов возможно путем его модифицирования, либо за счет введения модификатора в объём материала, либо путем модифицирования поверхности за счет нанесения защитных покрытий и (или) воздействия высококонцентрированными потоками энергии [1, 2].

К одним из перспективных материалов можно отнести материалы на основе боридов титана, обладающих уникальным набором свойств, таких как: жаропрочность, тугоплавкость, сверхтвёрдость и износостойкость. Сочетание таких свойств делает материалы на основе боридов титана подходящими для производства электродных материалов, для нанесения защитных покрытий. Однако такие материалы обладают практически нулевой пластичностью, что затрудняет процессы их получения и нанесения [3, 4]. Для снижения хрупкости соединения в состав материала вводится металлическая связка, подбор которой осуществляется исходя из материала подложки, на которую будет наноситься покрытие.

Одной из наиболее перспективных технологий для получения электродных материалов является СВС–экструзия. Данная технология реализуется в условиях сочетания процесса горения с высокотемпературным

пластическим деформированием, что позволяет получать материалы на основе керамических, металлических и интерметаллидных соединений за одну технологическую стадию [5, 6].

Целью данной работы является установление особенностей процессов фазо-, структурообразования и формования керамических экструдированных СВС-материалов на основе боридов титана, получаемых с использованием модифицирующих наноразмерных частиц нитрида кремния, в условиях процесса СВС-экструзии. Порошковый нитрид кремния был получен по азидной технологии СВС в СамГТУ [7].

В результате проведенной работы, методом СВС-экструзии были получены экструдированные материалы на основе боридов титана, модифицированные наноразмерными частицами нитрида кремния в количестве 5(10) масс. %. Проведено исследование структуры, фазового состава и физико-механических свойств, полученных материалов. Установлено, что при взаимодействии наноразмерных частиц нитрида кремния с железной матрицей образуются новые высокотвердые фазы: VN, TiN, при этом происходит измельчение зёрновой структуры основных фаз TiB. Совокупность этих факторов приводит к повышению показателей микротвердости и твердости образцов (по Виккерсу) до 1,5 раз.

Список используемых источников

1. Pudov V., Dragoshanskii Y. N. Physical Modification of Products Made of Soft Magnetic Materials under Texturing Effects // Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2022. – Т. 910. – С. 1014 – 1019.

2. Быков, П.О. и др. Модифицирование стали барийсодержащими модификаторами // Наука и техника Казахстана. – 2022. – №. 2. – С. 73 – 80.

3. Hu, Y. et al. Laser engineered net shaping of quasi-continuous network microstructural TiB reinforced titanium matrix bulk composites: Microstructure and wear performance // Optics & Laser Technology. – 2018. – Т. 99. – С. 174 – 183.

4. Zhrebtsov, S. et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti-based metal-matrix composites during hot deformation // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 321. – С. 12016.

5. Алымов, М.И., Столин, А.М., Бажин, П.М. Исследование структуры и свойств защитных покрытий, полученных методом электроискрового легирования СВС-электродами (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88. – №. 2. – С. 40 – 48.

6. Болоцкая, А.В., Михеев, М.В. Модифицирование наноразмерными частицами нитрида кремния материалов на основе системы Ti - B - Fe, полученных методом СВС-экструзии // Физика и химия обработки материалов. – 2022, – №. 4. – С.37 – 44.

7. Титова, Ю.В. и др. Получение керамических нанопорошковых композиций по азидной технологии СВС // Металлургия машиностроения. – 2019. – №. 6. – С. 41 – 44.

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА С МЕДНОЙ ПЛАСТИНОЙ*

Мордасов М.Д., Завражин Д.О., Мордасов Д.М.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
mit@tstu.ru*

Одной из актуальных задач современного машино- и аппаратостроения является обеспечение качества неразъемного соединения тонкостенных крупногабаритных деталей. Решение данной задачи неразрывно связано с выбором наиболее оптимальной технологии и реализующего ее технологического оборудования.

Существует большое количество технологий низкотемпературной пайки [1-3], которые, несмотря на присущие им преимущества, обладают недостатками, не позволяющими применять их для пайки крупногабаритных тонкостенных конструкций.

Перспективной технологией для низкотемпературной пайки тонкостенных конструкций является термовоздушная пайка или пайка нагретым газом (рис. 1), которая заключается в том, что нагрев до температуры пайки деталей 1 с нанесенным на их поверхности флюсом 2 осуществляется потоком горячего воздуха или инертного газа 3, поступающего с выхода аппарата горячего газа 4. Припой подается после прогрева деталей до требуемой температуры, либо после нанесения флюса.

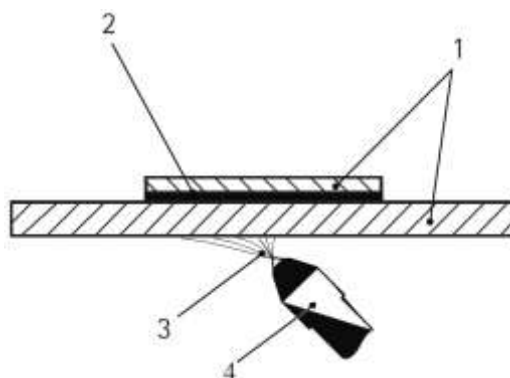


Рисунок 1. Низкотемпературная термовоздушная пайка.

С целью разработки технологии низкотемпературной пайки тонкостенных конструкций нами проведены исследования взаимодействия потока горячего воздуха с медной пластиной.

Для проведения исследований была выбрана пластина размером 130×200×0,6 мм из меди марки МЗр. Распределение температурного поля снималось с использованием тепловизора Fluke Ti32. Нагрев пластины осуществлялся потоком воздуха с выхода аппарата горячего воздуха с диаметром сопла 15 мм. Температура воздуха в выходном сечении сопла составляла 480°С, расстояние от сопла до нагреваемой поверхности 10 мм.

На рис. 2 представлены результаты исследований.

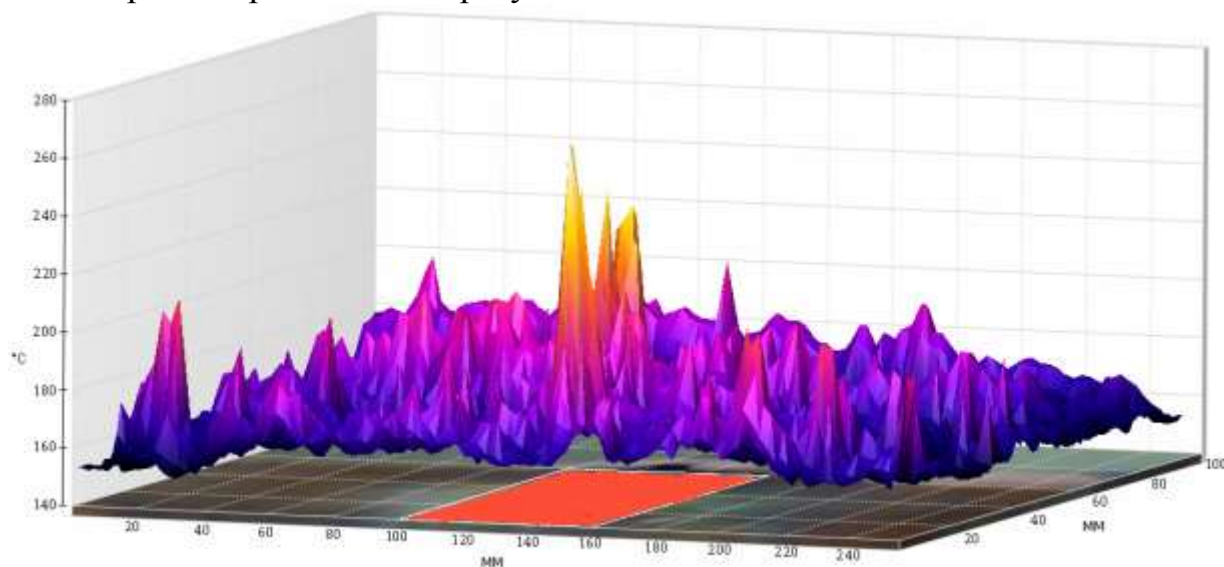


Рисунок 2. Распределение температуры на поверхности медной пластины.

На рис. 2 выделена область на поверхности пластины размером 60×60 мм, температура которой изменяется от 200°C до 240°C. Прогрев достаточно широкой области до таких температур позволяет осуществлять процесс пайки припоями, температура плавления которых не превышает 200°C. К таким припоям относятся ПОСИЗО (200°C), ПОС-61М (192°C), ПОС-61 (190°C), ПОССу61-0,5 (189°C), ПОСК50-18 (145°C), ПСрЗИ (141°C).

Таким образом, результаты исследований показывают эффективность применения потока горячего воздуха для прогрева тонких металлических пластин и могут быть использованы для разработки технологий их низкотемпературной пайки.

**Работа выполнена в рамках программы конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года» управления образования и науки Тамбовской области, проект № МУ2022-02/27.*

Список используемых источников

1. Власов, А. Печи для оплавления припоя RO300FC/C / А. Власов // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 5. – С. 41 – 43.
2. Мордасов, М.Д. Физико-химические основы низкотемпературной пайки стали 12X18Н10Т с медью / Д.М. Мордасов, Д.А. Черных, М.Д. Мордасов // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018». Казань, 2018. – С. 344 – 346.
3. Федоров, А.Л. Технология и оборудование низкотемпературной пайки / А.Л. Федоров. // Тольятти: Изд-во ТГУ. – 2021. – 127 с.

ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ*

Галиева Э.В.¹, Классман Е.Ю.¹, Степухов Е.М.^{1,2}

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

²*Уфимский университет науки и технологий, Уфа*

egorstepukhov@mail.ru

Введение.

Сравнительно недавно возникла потребность получать в жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) ультрамелкозернистую (УМЗ) и нанокристаллическую (НК) структуру [1-3]. Такая структура позволяет использовать эти материалы как промежуточную прокладку между свариваемыми под давлением в температурно-скоростных условиях сверхпластичности заготовками из, например, одноименных сплавов и получать качественные неразъемные соединения [2]. Принимая во внимание низкие технологические свойства этих сплавов с исходной крупнозернистой (КЗ) структурой для формирования НК структуры стали использовать такой метод интенсивной пластической деформации (ИПД), как кручение диска под давлением. Детально влияние ИПД на структуру и свойства никелевых сплавов изучено в работах [4,5]. Стоит отметить, что в сложнoleгированных ЖНС на формирование НК структуры сильное влияние оказывают когерентные упрочняющие интерметаллидные частицы. В частности, в никелевых сплавах типа ЭП962, Inconel 718 и ПДУ-1 формирование зерна размером 20...50 нм с высокоугловыми границами зерен происходит при $\epsilon=5,5$ оборотах [6]. Тем не менее, малоисследованным остается вопрос, связанный с получением указанных структур в жаропрочных никелевых сплавах. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния различных методов ИПД на формирование в ЖНС ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры.

Материал и методики исследования.

В качестве материалов исследования были выбраны деформируемые жаропрочные никелевые сплавы: ЭК79 и ЭП975. Деформационно-термическую обработку (ДТО) для получения УМЗ структуры проводили путем всесторонней изотермической ковки (ВИК). Кручение проводили на наковальне Бриджмена со скоростью $v=2$ об/мин при комнатной температуре. Микроструктуру изучали методом растровой и просвечивающей электронной микроскопии с использованием микроскопов MIRA 3LMH (TESCAN) и JEM-2000EX. Измерения микротвердости проводили на приборе MHT-10 Microhardness Tester.

Результаты работы.

Исходная микроструктура исследуемых сплавов представлена на рис. 1. В исходном состоянии исследуемые сплавы имеют КЗ структуру с размером γ -

фазы: ЭП975 ~150 мкм (рис. 1а,б), ЭК79 ~250 мкм (рис. 1г,д), внутри крупных зерен γ -фазы равномерно выделены дисперсные когерентные частицы γ' -фазы размером ~0,2 мкм (рис. 1 в,е). Значения микротвёрдости при этом: ~4810 МПа для ЭП975 и ~4920 МПа для ЭК79.

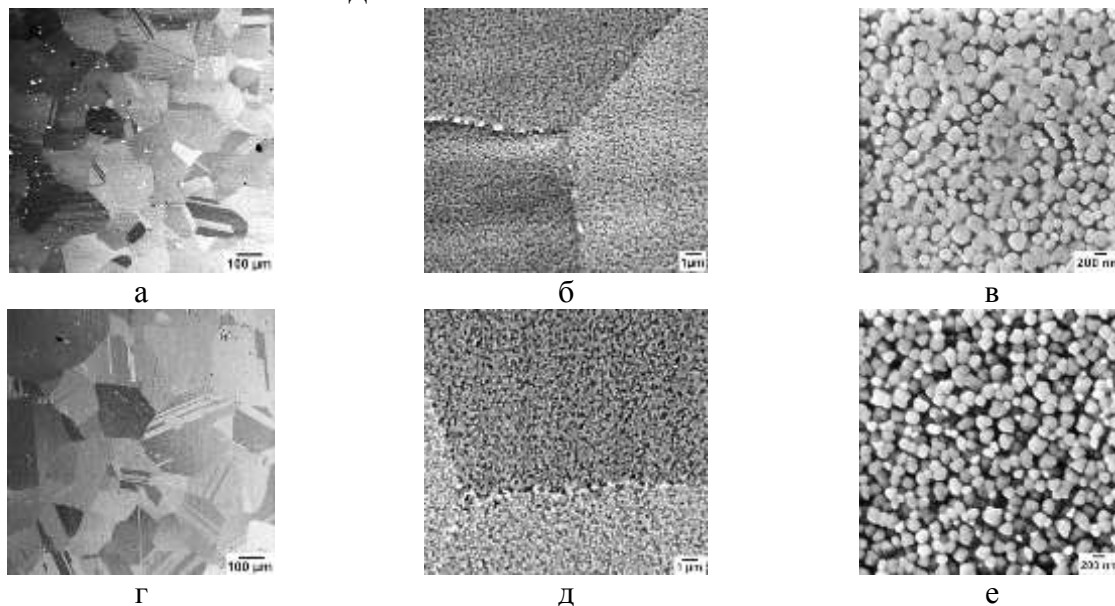


Рисунок 1. Исходная микроструктура ЖНС сплавов перед ИПД кручением: а, б, в – ЭП975, г, д, е – ЭК79.

По результатам исследования показано, что в процессе ВИК исходная крупнозернистая структура с поэтапным снижением температуры обработки в двухфазной $\gamma+\gamma'$ -области в никелевых сплавах ЭП975 и ЭК79 трансформируется в УМЗ структуру дулексного типа с размером зерен матрицы (γ -фазы) для ЭП975~0,6 мкм (рис. 2а), для ЭК79 ~0,3 мкм (рис. 2б).

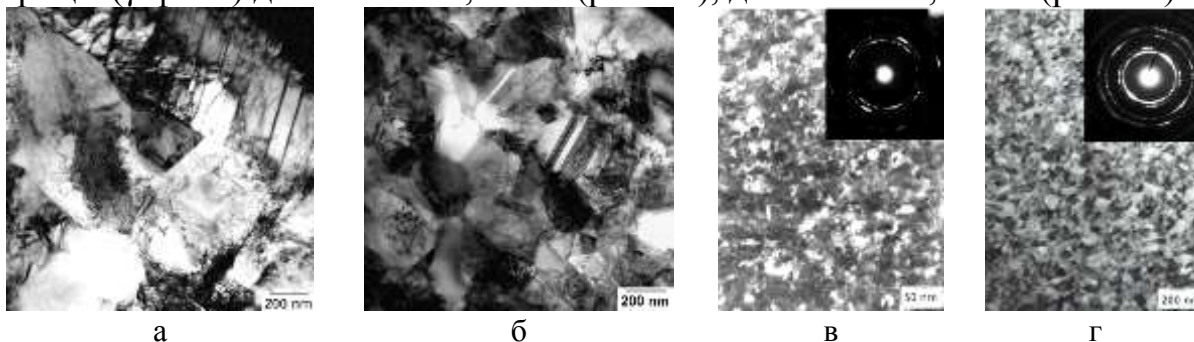


Рисунок 2. Микроструктура ЖНС сплавов после ИПД кручением: а – ЭП975, б – ЭК79.

ИПД кручением на наковальне Бриджмена (5 оборотов) приводит к формированию во всём объёме деформируемого материала НК структуры со средним размером зерен матричной γ -фазы: для сплава ЭП975 – 30...50 нм (рис. 2в) и 50...60 нм для сплава ЭК79 (рис. 2 г). Наличие отдельных рефлексов на кольцевых электронограммах (рис. 2 в, г), может свидетельствовать о наличии высокоугловых разориентировок между фрагментами. По результатам измерений установлено, что с измельчением размера зерна до УМЗ состояния микротвёрдость возрастает на ~17% для ЭП975 и на ~26% для ЭК79, а с увеличением числа оборотов до 5 наблюдается рост микротвёрдости: на ~37%

для ЭП975 и ~28% для ЭК79. Резкий скачок микротвердости на начальной стадии кручения (1 оборот) связан, по всей видимости, с увеличением плотности решеточных дислокаций на начальном этапе деформации [5,6].

Заключение.

Показано, что методы интенсивной пластической деформации — всесторонняя изотермическая ковка и деформация на наковальне Бриджмена — обеспечивают получение в ЖНС ультрамелкозернистую и нанокристаллическую структуры соответственно.

**Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-79-00271. Микроструктурные исследования осуществляли на оборудовании Центра Коллективного Пользования ИПСМ РАН.*

Список используемых источников

1. Валитов В.А. Формирование нанокристаллической структуры при интенсивной деформационно-термической обработке и ее влияние на сверхпластические свойства никелевого сплава с неизоморфными выделениями второй фазы / В.А. Валитов, Ш.Х. Мухтаров, Ю.А. Раскулова // Физика металлов и металловедение. – 2006. – Т. 102. – № 1. – С. 105 – 113.

2. Валитова Э.В. Моделирование процесса сварки давлением жаропрочного никелевого сплава с использованием ультрамелкозернистой прокладки / Э.В. Валитова, А.Х. Ахунова, В.А., Валитов, С.В. Дмитриев., Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов // Письма о материалах. – 2014. – Т.4. – №3. – С.190 – 194.

3. Валитова Э.В. Формирование ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры методами интенсивной пластической деформации в никелевом сплаве ХН58МБЮД / Э.В. Валитова, Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов, В.А. Валитов // Перспективные материалы. Спец. вып. – 2013. – №15. – С. 35 – 39.

4. Mukhtarov Sh. Processing and Mechanical Properties of Bulk Nanostructured Nickel Base Alloys / Mukhtarov Sh., Dudova N., Valitov V. // Materials Science & Engineering. – 2009. – Vol. 503. – P. 181 – 184.

5. Valitov V.A. Formation of Micro-, Submicro- and Nanocrystalline Structures in Nickel-Base Alloys / Valitov V.A., Kaibyshev O.A., Mukhtarov Sh.Kh., Gajnutdinova N.R. Formation of Micro-, Submicro- and Nanocrystalline Structures in Nickel-Base Alloys // Proceedings of the First Joint International Conference “Recrystallization and Grain Growth”, Springer-Verlag. –2001. – P. 563 – 568.

6. Утяшев Ф.З. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. Монография / Г.И. Рааб, В.А. Валитов. СПб.: Научно-технологические технологии, 2020. – 185 с.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСНО-НАПОЛНЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

Данилов В.М., Ярцев В.П.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
vm.danilov1997@gmail.com*

Современные методы проектирования и строительства на сегодняшний день требуют высокие эксплуатационные характеристики используемых материалов, в особенности для технологических объектов промышленности. При этом хорошие эксплуатационные характеристики и стойкость к агрессивным средам показывают различные полимерные материалы на связующем из эпоксидных смол [1].

Ввиду того, что политика и экономика как развитых, так и развивающихся стран делает большую ставку на максимально возможное ресурсосбережение, то разработка методов переработки отходов, получаемых в ходе обработки древесины является крайне актуальной задачей [2]. Отходы лесозаготовительных производств (опилки) не нашли должного применения в строительной отрасли. Ввиду этого добавление в полимерный композит пеллет, получаемых путем экструзии опилок, может решить этот вопрос.

Состав композитного материала включает в себя: связующее из эпоксидной смолы и наполнителя из прессованных опилок с добавлением песка. Соотношение компонентов определяется математическим планированием. Для исследования реализован трехфакторный план, где факторами являются смола (фактор z_1), песок (фактор z_2) и пеллеты (фактор z_3), а целевыми функциями являются прочность на сжатие и на изгиб [3].

В каждой точке такого плана выполняется условие: $z_1+z_2+z_3=1$. В выбранном плане рассматриваются четыре уровня: 0; 0,333; 0,5; 1. На основе анализа и пробных опытов из факторного пространства была выделена подобласть, характеризующаяся следующими координатами вершин неправильного симплекса: $A_1(x_1=0,5; x_2=0; x_3=0,5)$; $A_2(x_1=0,3; x_2=0,2; x_3=0,5)$; $A_3(x_1=0,3; x_2=0; x_3=0,7)$. В выбранной подобласти фактические значения долей компонентов смеси x_i изменялись в пределах: эпоксидно-диановая смола (x_1) – от 0,3 до 0,5; песок (x_2) – от 0 до 0,2; пеллеты (x_3) – от 0,5 до 0,7. Нижний уровень доли смолы (0,3) принят экспериментально, чтобы соединить части композита в единый материал.

Определение физико-механических характеристик проводилось для подготовленных образцов в виде балок размером $20 \times 20 \times 120$ мм (прочность на изгиб $R_{изг.}$, МПа) и образцов в виде куба с размером $20 \times 20 \times 20$ мм (прочность на центральное сжатие $R_{сж.}$, МПа). После того как образец был сформирован, его выдерживали не менее 2 часов в тепловой камере при температуре 100°C в течение 2 часов. По прошествию этого времени образцы термостатировали до комнатной температуры. Испытания на прочность образцов проводилось по

методике ГОСТ 10180–2012. Стоит отметить, что для получения каждой точки проводилось не менее 3 экспериментов. В дальнейшем значения усреднялись. Результаты эксперимента приведены на рисунке 1 и таблице 1.

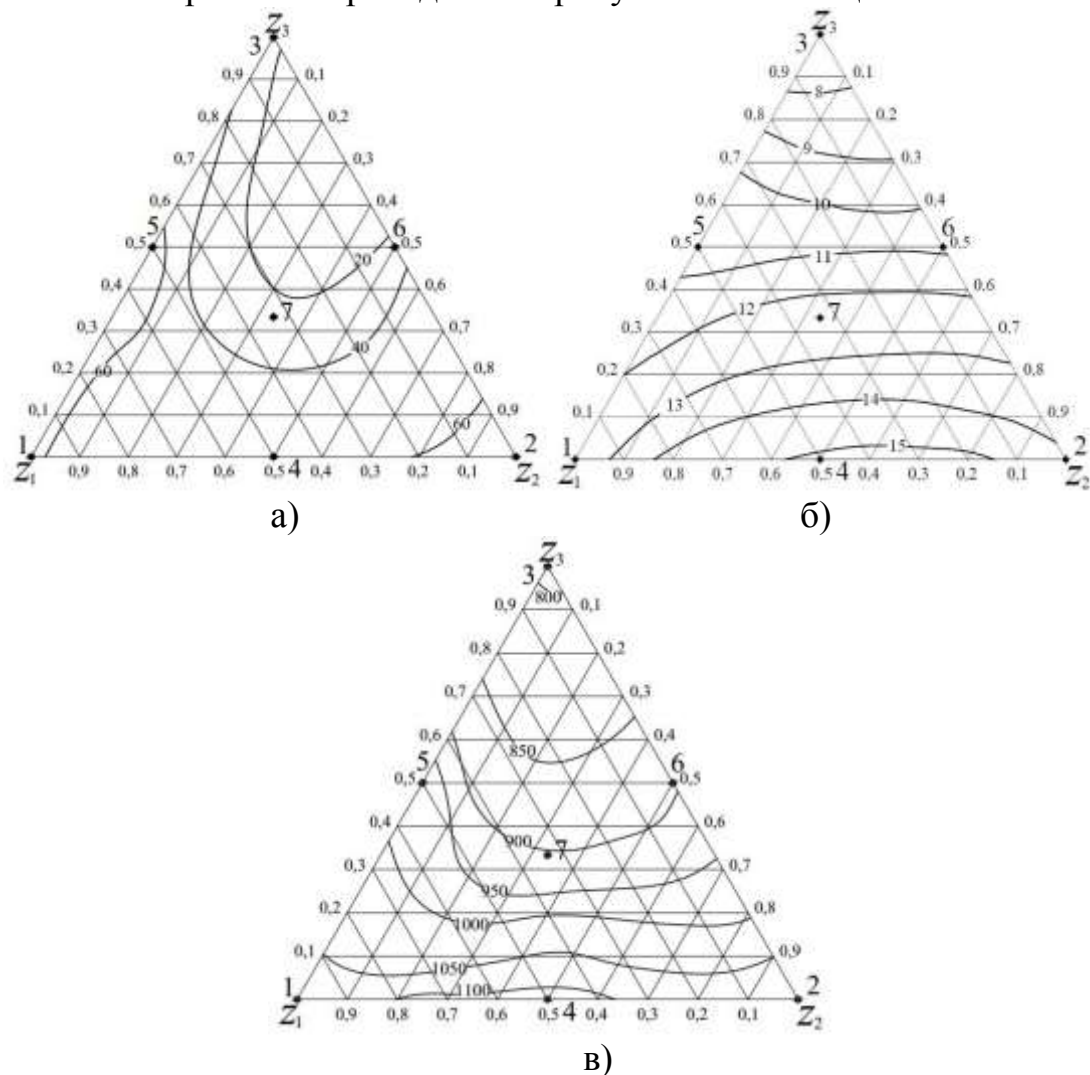


Рисунок 1. Значение $R_{сж}$ (а), $R_{изг}$ (б), ρ (в) полимерных образцов в зависимости от содержания компонентов в координатах псевдофакторов: смола (z_1), песок (z_2), pellets (z_3).

Таблица 1. Результаты исследования для древесно-наполненного композита

| Поз. | Факторы, используемые при математическом планировании | | | $R_{сж.}$, МПа | $R_{изг.}$, МПа | ρ , кг/м ³ |
|------|---|------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------------------------|
| | z_1 (смола) | z_2 (песок) | z_3 (пеллеты) | | | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 70,52 | 12,67 | 1097,69 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 80,75 | 21,99 | 1070,29 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 65,67 | 7,99 | 788,88 |
| 4 | 0,5 | 0,5 | 0 | 57,19 | 14,35 | 1102,06 |
| 5 | 0,5 | 0 | 0,5 | 64,59 | 15,11 | 975,64 |
| 6 | 0 | 0,5 | 0,5 | 66,00 | 13,24 | 890,99 |
| 7 | 0,333 | 0,333 | 0,333 | 77,37 | 7,64 | 900,86 |

Список используемых источников

1. Леонович, А.А. Древесноплитные материалы специального назначения / А. А. Леонович. – Изд.: Лань, 2019. – 160 с.
2. Дубоделова, Е.В. Особенности технологии топливных пеллет из древесины лиственных пород / Е.В. Дубоделова, Н.А. Сычева, И.А. Хмызов, Т.А. Снопкова, Т.В. Соловьева // Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. – №4(151), 2012.
3. Новикова, Н.О. Влияние заполнителя древесно-наполненного полимерного композита на прочность при изгибе / Н.О. Новикова, В.П. Ярцев // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки.– №5(21), 2018.

ТЕХНОЛОГИЯ ТВЕРДОФАЗНОГО АЗОТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБМАЗКИ

Панченко Е.Б., Коныхина Н.С.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
evgenpvh@mail.ru*

Для получения требуемых свойств поверхности стального изделия наиболее часто используют химико-термическую обработку. Самыми распространенными разновидностями такой обработки являются цементация и азотирование.

В данной статье будет рассмотрено насыщение азотом. Его проводят с целью повышения твердости, износостойкости и прочности поверхностного слоя, либо, в отдельных случаях, повышение коррозионной стойкости.

На сегодняшний день известно 4 основных технологии насыщения стальных изделий азотом: газовое, жидкостное, ионное и твердофазное.

Главным недостатком газового азотирования является его длительность. В зависимости от требуемой глубины азотированного слоя, температуры процесса оно занимает от 24 до 60 часов. Кроме того, требуется специальное оборудование и большое количество газообразного реагента (как правило, аммиака).

Жидкостное азотирование занимает намного меньше времени – 1-3 часа. Однако для его проведения используются цианистые соли, ядовитые в любом состоянии, либо бесцианистые, неядовитые в твердом состоянии и токсичные при их расплавлении. Несмотря на относительно непродолжительность процесса, из-за высокой теплопроводности солей на их расплавление уходит до 1 часа, что требует дополнительных временных затрат. Также жидкостное азотирование имеет очень узкий диапазон температур – 520-580 °С. При работе печи-ванны потребляется большое количество энергии, этот фактор сильно ограничивает рабочее пространство ванны [1].

Основным недостатком ионного азотирования является пониженная итоговая твердость поверхностного слоя по сравнению с азотированием, что обусловлено повышенного количества аустенита. Также немаловажным фактором является дороговизна и сложность оборудования для осуществления такой обработки [2].

Твердофазное азотирование является наиболее простым в осуществлении. Оно не требует специального оборудования и может проводиться в широком диапазоне температур. В связи с этим такой способ обработки лучше всего подходит для экспериментального насыщения азотом с целью опробования технологии или исследования влияния азотирования на свойства и структуру материала.

Чаще всего для твердофазного азотирования используют порошкообразные смеси или пасты. Известен следующий состав для пасты:

20% карбамида $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$; 20% желтой кровяной соли $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$; 60% сажи газовой ДГ-100. Во время приготовления реагента компоненты разбавлялись поливинилацетатной эмульсией [3], [4].

Состав требовал изменения по нескольким причинам. Первая заключалась в низкой температуре планируемого азотирования (500-540 °С), при которой желтая кровяная соль не диссоциирует, а значит, практически не участвует в процессе насыщения. Поэтому данная соль была убрана, а оставшиеся 20 процентов занял карбамид. Следующее изменение произошло из-за присутствия различных примесей в газовой саже, что может негативно сказаться на качестве азотирования. Из-за этого сажа была заменена графитовым порошком. Последнее изменение коснулось связующего вещества. Затвердевший поливинилацетат разрушается при температуре 100-170 °С и не удерживает пасту во время проведения процесса. Ввиду этого, связующим веществом выступает жидкое стекло, которое при высоких температурах, наоборот, застывает и прочно удерживает пасту на образцах.

Технология проведения твердофазного азотирования с новым составом состоит из следующих этапов:

1. Сначала проводится приготовление пасты. В массовом соотношении 60% графитового порошка и 40% карбамида смешиваются в однородную массу, во время чего они разбавляются жидким стеклом и тщательно перемешиваются.

2. Стальные образцы обмазываются полученной пастой слоем примерно 1,5 мм. После обмазка должна быть высушена.

3. После сушки образцы, покрытые смесью, помещаются в контейнер, который герметизируется.

4. Контейнер помещается в печь и выдерживается при определенной температуре заданное время. В данном случае это 2 часа при температуре 500 °С.

5. После выдержки контейнер извлекается из печи, образцы выгружаются и очищаются от остатков пасты и промываются ацетоном.

Список используемых источников

1. Куксенова, Л.И. Эффективность азотирования конструкционных сталей / Л.И. Куксенова, С.А. Герасимов, В.Г. Лаптева, М.С. Алексеева, С.В. Лазарев. – Москва : Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, 2011.

2. Арзамасов, Б.Н. Ионная обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

3. Перспективные процессы химико-термической обработки конструкционных сталей / В. Н. Гадалов, И. А. Макарова, А. В. Ляхов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 567-575. – ISSN 2071-6168

4. Летова О.В. Азотисто-углеродистая паста для нитроцементации стали при низких и высоких температурах // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – №2. – С. 75-76.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭД-20

Чуприкова А.А., Фижбах Т.В., Ермаков А.С., Чудин И.А., Репин М.С.

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Существует четыре основные группы материалов, наиболее часто используемых в практике конструирования: керамика, полимеры, металлы и композиты.

В последние годы материалы были существенно усовершенствованы, что характеризует собой качественный прорыв в области создания композитов. Улучшенные характеристики материалов задали направление технического прогресса в большинстве отраслей на замену конструкциями из композиционных материалов устаревших металлических конструкций. Это определяет задачи и направления разработок композитов и конструкций из них.

Одними из наиболее востребованных в настоящее время по праву считаются ПКМ. Существенное повышение характеристик таких материалов достигается различными видами армирующих элементов и/или наполнителей (в том числе и наноразмерными).

В работе проводились исследования свойств полимерного композита на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Смолу ЭД-20 рекомендуют использовать в случаях, когда нет возможности производить работы в сухом теплом помещении, а также невозможно как следует прогреть изделие для окончательной полимеризации. В таких неоптимальных условиях вероятность получения приемлемого результата при использовании отечественной смолы выше, чем при использовании импортной.

В производстве в состав эпоксидных композитов используют отвердители, пластификаторы, противостарители и другие добавки, обеспечивающие улучшение структуры и свойств материала. Нами для отверждения был выбран ЭТАЛ-45М, в составе которого имеются пластифицирующие добавки. Модификация структуры и свойств обеспечивалась внесением углеродных наноматериалов серии «Таунит-М» (производства ООО «Нанотехцентр», Россия, г.Тамбов) в виде сыпучего порошка с размером частиц 40-100 нм в объеме от 0,5 до 1,5 масс.част.

Эффективное влияние УНТ на ПКМ зависит от равномерного распределения нанонаполнителя в связующем, а это в свою очередь сказывается на эксплуатационных характеристиках наномодифицированного полимерного композиционного материала.

Распределение углеродных наноматериалов в эпоксидной матрице осуществлялось на трехвалковой мельнице «ЕХАКТ 80Е» с последующим воздействием ультразвуком на установке ИЛ100-6/4. Связующее смешивалось с отвердителем ЭТАЛ-45, вакуумировалось, формовалось в готовые формы и

отверждалось в течение 24 часов. После чего готовые образцы извлекались из форм. [2, 3]

Образцы отливались в прямоугольную форму согласно ГОСТ 32656-2014 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) «Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение».

Физико-механические характеристики экспериментальных образцов проводили на универсальной испытательной машине УТС-101-5. Были исследованы свойства материалов при одноосном растяжении. Скорость перемещения захватов составляла 50 мм/мин. Диаграммы испытаний всех образцов имели схожий вид (рис. 1).

Пластическое деформирование структуры начиналось практически сразу – при деформации от 0,2-0,3%.

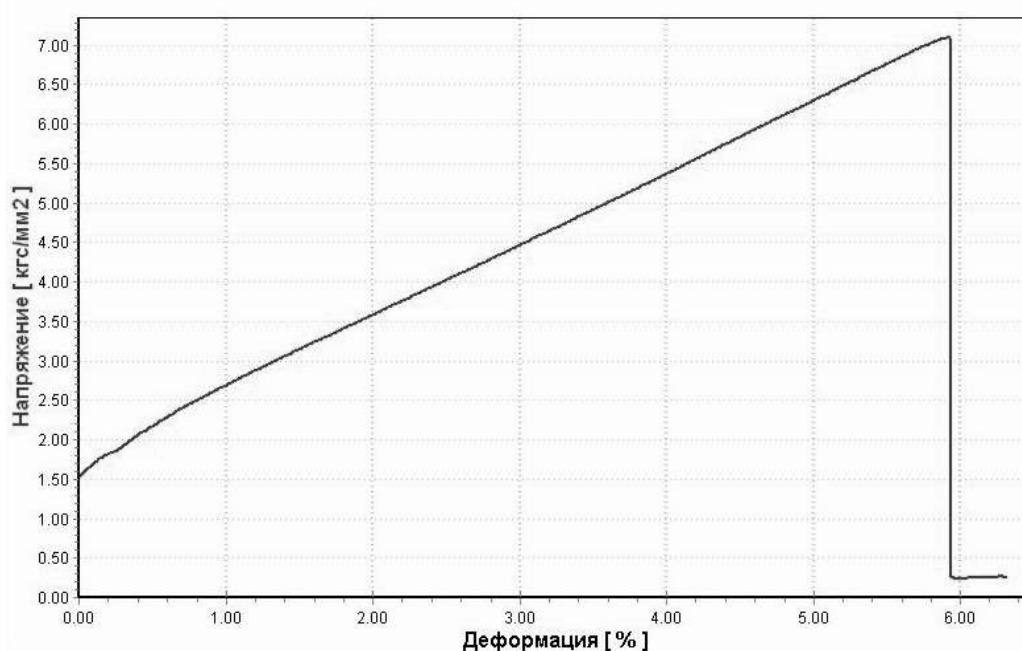


Рисунок 1. Стандартная диаграмма одноосного растяжения образцов на основе эпоксидной смолы ЭД-20.

По результатам испытаний можно отметить значительное повышение прочностных характеристик композитов на 12 – 25 % в зависимости от объема внесенных наноматериалов. При этом отмечено некоторое снижение их эластичности, что вполне совпадает с общими физико-химическими закономерностями при создании композиционных материалов. В результате изменения структуры полимерной матрицы происходит ее одновременное упрочнение и охрупчивание. Однако, значения снижения эластичности незначительны и находятся в допустимых пределах.

Таблица 1. Физико-механические характеристики образцов эпоксидной смолы ЭД-20 и композитов на ее основе при одноосном растяжении.

| | ЭД-20 | ЭД-20 + 0,5 УНТ | ЭД-20 + 1 УНТ | ЭД-20 + 1,5 УНТ |
|----------------------------|-------|--------------------|------------------|--------------------|
| Прочность, МПа | 59 | 67 | 74 | 72 |
| Относительное удлинение, % | 4,4 | 4,1 | 4,3 | 4,1 |

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности модификации эпоксидных смол углеродными наноматериалами. Это позволит применять изделия из эпоксидных смол в тяжелонагруженных механизмах и заменить ими некоторые металлические детали.

Список используемых источников

1. Zavrazhin, D.O. Nanomodified epoxy materials with improved operating characteristics / D.O. Zavrazhin, T.A. Lutovinova, C.V. Zavrazhina // Key Engineering Materials. 2021. Т. 887 КЕМ. С. 138-143.
2. Завражин, Д.О. Основы реологии полимеров и технологические методы переработки полимерных материалов / Д.О. Завражин, О.Г. Маликов, П.С. Беляев // Учебное электронное издание. Тамбов, 2017.
3. Галыгин, В.Е. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов / В.Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин // Учебное электронное издание на компакт-диске. Тамбов, 2013.
4. Лутовинова, Т.А. Наномодифицированные эпоксидные материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками / Т.А. Лутовинова, А.А. Чуприкова, Ю.С. Поветкина // В сборнике: Механические свойства современных конструкционных материалов. Сборник материалов. 2020. С. 104-105.
5. Чуприкова, А.А. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники полимерными нанокompозитами / А.А. Чуприкова, Ю.С. Поветкина, М.А. Фунбаю // В сборнике: Молодежная наука - развитию агропромышленного комплекса. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2020. С. 286-289.

РАЗРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДА ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА*

*Чижиков А.П., Антипов М.С., Константинов А.С., Бажин П.М.,
Столин А.М., Жидович О.А.*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, chij@ism.ac.ru*

В современной металлургической промышленности существует актуальная проблема разработки и внедрения новых огнеупорных материалов и изделий на их основе. В частности, требуется разработка новых материалов для изготовления плит для скользящих или шиберных затворов сталеразливочных ковшей. Производство современных огнеупоров сталкивается с рядом трудностей ввиду сложности обработки таких материалов. Высокие температуры плавления, хрупкость и труднодеформируемость огнеупорных материалов вынуждает создавать сложные технологические цепочки производства. Синтез исходных материалов, их консолидация, формование и уплотнение происходит на разных установках на разных технологических этапах. Это создает необходимость контролировать большое число технологических параметров, усложняя тем самым контроль качества готовых изделий. Таким образом, снижение количества технологических этапов является перспективным подходом к оптимизации процесса получения современных огнеупорных материалов.

Успешное развитие современного научно-промышленного сектора невозможно без разработки новых материалов с улучшенными физико-механическими свойствами и новых энергоэффективных способов получения готовых изделий из таких материалов. Выполненные на сегодняшний день научные исследования в области изучения деформационных процессов керамических материалов, а также в области макрокинетики СВС-систем говорят о перспективности использования процессов, сочетающий СВС и сдвиговое высокотемпературное деформирование. В ходе исследования указанных процессов было установлено, что дальнейшее направление данных исследований следует развивать в двух направлениях: расширения номенклатуры объектов исследования и дополнения существующих знаний теории горения, материаловедения и структурной макрокинетики реологическим подходом, и развития нового направления – структурной реологии. Развитие структурной реологии керамических материалов позволит установить влияние параметров и условий процесса получения на свойства конечного изделия. Таким образом, известная цепочка «состав-структура-

свойства» может быть модифицирована до «состав – способ получения – структура – свойства».

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбраны композиционные материалы на основе стабилизированного оксидом иттрия оксид циркония. Чистый оксид циркония при комнатной температуре имеет моноклинную кристаллическую структуру, а при высокой температуре претерпевает фазовые превращения сначала в тетрагональную, а затем в кубическую фазу. При комнатной температуре стабильной является только моноклинная фаза. При этом, переход из тетрагональной фазы в моноклинную сопровождается значительным изменением объема, что приводит к разрушению изделий. Однако, добавление стабилизирующих компонентов позволяет избежать фазовых переходов. Такими стабилизирующими компонентами являются, например, CaO , MgO , CeO_2 и др., наибольшее распространение получала добавка Y_2O_3 . Введение до 10 мол. % в зависимости от температуры процесса позволяет стабилизировать либо тетрагональную, либо кубическую фазу ZrO_2 . В качестве огнеупорного материала наиболее перспективной является тетрагональная фаза. Она обладает высокой прочностью, трещиностойкостью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью и износостойкостью. Синтез композиционных материалов в настоящей работе осуществлялся по двум химическим маршрутам реакции. Во-первых, за счет проведения СВС с восстановительной стадией. В качестве восстановителя использовались порошки циркония различной дисперсности. Восстанавливая порошком циркония различные оксиды (B_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 и др.) и за счет введения в систему дополнительных компонентов (например, бор или углерод) и Y_2O_3 были получены композиционные материалы с матрицей на основе стабилизированного ZrO_2 , дисперсно-упрочненного частицами боридом и карбидов. Вторая химическая схема получения композиционных материалов на основе стабилизированного оксида циркония заключалась во введении инертной добавки ZrO_2 и Y_2O_3 в систему с высоким тепловым эффектом, например, $\text{Ti} + \text{C}$ или $\text{Ti} + \text{B}$. Регулируя количество экзотермической смеси и инертной составляющей возможно регулировать температуру горения системы. Это позволило получить стабилизированный ZrO_2 с различным содержанием Y_2O_3 , поскольку необходимое количество стабилизирующей добавки имеет температурную зависимость. Таким образом, в ходе выполнения настоящей работы были разработаны оптимальные составы исходных смесей реагентов для последующего получения керамических композиционных материалов на основе стабилизированного оксидом иттрия оксида циркония методом свободного СВС-сжатия.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10182, <https://rscf.ru/project/22-79-10182/>.*

ДОБАВКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ

Ефанова Д.А., Макеев П.В.

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

efanova.dasha@mail.ru

Под понятием «биоразлагаемые полимеры» понимаются полимерные материалы, которые могут самопроизвольно разрушаться в результате естественных микробиологических и химических процессов.

Наиболее актуальное использование биоразлагаемых полимеров относится к применению в двух сферах – медицине и защите окружающей среды.

В настоящее время уже существуют некоторые виды биоразлагаемых полимеров. Биоразлагаемые полимеры можно классифицировать на три основных класса, классифицируемых в зависимости от используемых мономеров и структуры, образующегося биополимера: полинуклеотиды, полипептиды и полисахариды.

Рассмотрим растительное сырье, которое используется в данное время для изготовления биоразлагаемых полимеров. К биоразлагаемым полимерам из природного сырья относятся: полимеры на основе крахмала и целлюлозы, РНА (полигидроксиалканоат), и другие полиэферы.

Одним из известных биополимеров стал полимер на основе кукурузного крахмала. В данном случае выращивают специализированные сорта кукурузы. Из полученной в ходе сбора урожая биомассы извлекают крахмал или сахар, очищают и подвергают химической и биотехнологической (при помощи ферментов и микроорганизмов) переработке. В дальнейшем полученный биополимер часто смешивают с синтетическим полимером.

Одним из самых первых биополимеров был полимер изготовленный на основе целлюлозы. Первый полимер из модифицированной целлюлозы был создан еще в 20 веке и получил название целлулоид. Целлюлозу обработали смесью азотной и серной кислоты, а затем смешали с камфарой. Сейчас Целлулоид представляет из себя пластмассу на основе коллоксилина (нитрата целлюлозы), пластификатора (касторовое масло) и красителя.

Полигидроксиалканоат или РНА – это синтезированный бактериями полимер, также известный как биополимер. Запасные полимеры некоторых микроорганизмов синтезируются при отсутствии азота и фосфора при наличии углерода и энергии. Накапливаются в микроорганизмах в виде гранул и при необходимости расщепляются. РНА являются отличными конкурентами привычным нам полимерам, но, что является их отличительной способностью, легко разлагаются в окружающей среде.

Из чего бы не были сделаны биополимеры, смешиваемые в итоге с синтетическим полимером, вопрос их переработки и утилизации все еще

остается. Так как такие полимеры лишь частично состоят из биоразлагаемого продукта их также стоит собирать, сортировать и отправлять на мусороперерабатывающие заводы.

Нашей целью же является создать биополимер, который сможет разлагаться в обычной окружающей среде. Для этого необходимо выбрать экономически и экологически правильную добавку, которая сможет укрепить положение биополимеров на рынке и в целом в мире.

Анализируя заводы, находящиеся на территории Тамбовской области, можно сделать вывод, что в ходе технологических процессов на различных производствах получаются отходы, которое используется не в полной мере или, применение которому еще не найдено.

Заводы по производству сахара из свёклы славятся своим количеством отходов. Основными отходами данного производства является свекловичный жом, фильтрационный осадок и меласса. Свекольный жом представляет собой волокнистый материал. Поставляется жом в виде сухих хлопьев, либо в прессованных гранулах. Одним из таких заводов является Кирсановский сахарный завод. При среднем выходе сахара 10 – 12% от общей массы переработанной свёклы в нём образуется до 80% жома. В основном эти отходы используют в качестве корма для домашнего скота. Однако ежегодно жом образуется тоннами. Количество данных отходов просто некуда девать. Поэтому вопрос о применении свекольного жома является довольно актуальным для экономики.

Химический состав свекольного жома (в пересчете на сухое вещество) составляет: 45 – 47 % целлюлозы, до 50 % пектиновых веществ, 2 % белка, 0,6 – 0,7 % сахара, около 1 % минеральных веществ, и в небольшом количестве также присутствуют аминокислоты и витамины. В состав аминокислот входят: аланин, валин, лейцин, аргинин, фенилаланин, тирозин, пролин и триптофан. В зависимости от условий хранения жом может иметь кислую реакцию. В ходе уже известных исследований, путем спектрального анализа в жоме также были найдены: бор, железо, медь, марганец, никель, серебро, цинк и другие компоненты.

Основываясь на химическом составе свекольного жома, предыдущих исследованиях биополимеров и актуальности использования свекольного жома в качестве добавки для изготовления биополимера в Тамбовской области, можно сделать вывод, что свекольный жом может отлично подойти в качестве добавки для получения биоразлагаемого полимера. Основываясь на теоретических данных, биоразлагаемый полимер из свеклы будет разлагаться в 3 – 4 раза быстрее обычного пластика.

Список используемых источников

1. Технические материалы на основе свекловичного жома / Б. А. Кулишов, Л.А. Зимагулова, Ле Ань Туан, А.В. Канарский // Вестник технологического университета 2015. Т.18, № 23.
2. Власова Г., Макаревич А. Биоразлагаемые пластики в индустрии. // WWW.himhelp.ru

3. Васнев, В.А. Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1997. Т. 39.
4. Фомин, В.А., Гузеев В.В. Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования. // Пластические массы, 2001, №2. – С.42.
5. Родионов, А.И. Техника защиты окружающей среды / А.И. Родионов, В.Н. Клушин и др. // М.: 1989. – 512 с.
6. Кузнецова, Н.А. Получение композиционного материала на основе отходов ЦСП и вторичного полистирола // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции. 2017. С. 119 – 121.
7. Макеев, П.В. Переработка отходов полимерных материалов на валково-шнековом агрегате / П.В. Макеев, А.С. Клинков, И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 6. № 1 (104). С. 119 – 123.
8. Клинков, А.С. Ресурсосберегающая технология переработки отходов полимерных материалов / А.С. Клинков, П.В. Макеев, И.В. Шашков, Д.Л. Полушкин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 3 (47). С. 292 – 300.
9. Шашков, И.В. Инновационная технология рециклинга отходов термопластов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития. Сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов. Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2011. С. 158 – 162.
10. Макеев, П.В. Анализ эффективности разработанных технологий утилизации отходов термопластов / П.В. Макеев, А.С. Клинков, И.В. Шашков, В.Г. Однолько // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17. № 4. С. 1002 – 1006.
11. Рециклинг и утилизация тары и упаковки / А.С. Клинков [и др.]. // М-во образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО «Тамбовский гос. технический ун-т». Тамбов, 2010.
12. Полушкин, Д.Л. Новая технология вторичной переработки и утилизации пленочных полимерных материалов / Д.Л. Полушкин, А.С. Клинков, М.В. Соколов, И.В. Шашков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2006. Т. 12. № 1. С. 76 – 82.
13. Шашков, И.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2005.

УДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА С КОРУНДОВОЙ МАТРИЦЕЙ

*Прилипко С.Ю., Кудрявцев Ю.А., Волкова Г.К., Беличко Д.Р.,
Глазунова В.А., Бурховецкий В.В., Линник Д.С.*

Государственное бюджетное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк, suprilipko@mail.ru

Важным структурной особенностью, определяющей свойства композиционных материалов, является наличие непрерывной матрицы и распределенных в ней наполнителей. Как правило, керамико-органические композиты состоят из органической матрицы с керамическими частицами в качестве наполнителей [1, 2]. Целью данной работы было получение композита, в котором каждый компонент был бы представлен в виде непрерывной подструктуры с их взаимным проникновением. Такое строение материала при его разрушении способно было бы замедлять движение трещины из-за её разветвления на границах керамика-полимер и, как следствие, рассеивания её энергии.

Пористые образцы, различающиеся величиной пористости и внутренней структурой, были получены твердофазным спеканием из порошков Al_2O_3 различной морфологии. Порошки различались формой частиц, их размерами, а также типом кристаллической решетки. Химический состав всех порошков был одинаковый, добавки не применялись. Давление холодного изостатического прессования составляло от 200 до 1000 МПа. Температура спекания составляла $1450^{\circ}C$. В результате спекания были получены образцы с пористостью от 25 до 55% при теоретической плотности $3,99 \text{ г/см}^3$.

Испытания на четырехточечный изгиб продемонстрировали большое влияние на прочность не только плотности образцов и давления их предварительного прессования, но и морфологии исходных порошков и, как следствие, полученной микроструктуры керамики (рисунок 1).

Далее изучалось изменение прочности образцов при заполнении пор полимерными составами. Задача эксперимента заключалась в получении композитного материала, в котором каждый компонент имел бы непрерывную структуру. Основываясь на ранее полученных результатах, для получения композита были выбраны порошки, обеспечивавшие получение пористой керамики с наибольшей удельной прочностью. В качестве полимерного наполнителя использовался эпоксидный полимер катионной полимеризации УП-650Т. Основными требованиями при выборе полимера были длительность отверждения с минимальным изменением размера при этом, а также высокой степени адгезии с керамикой.

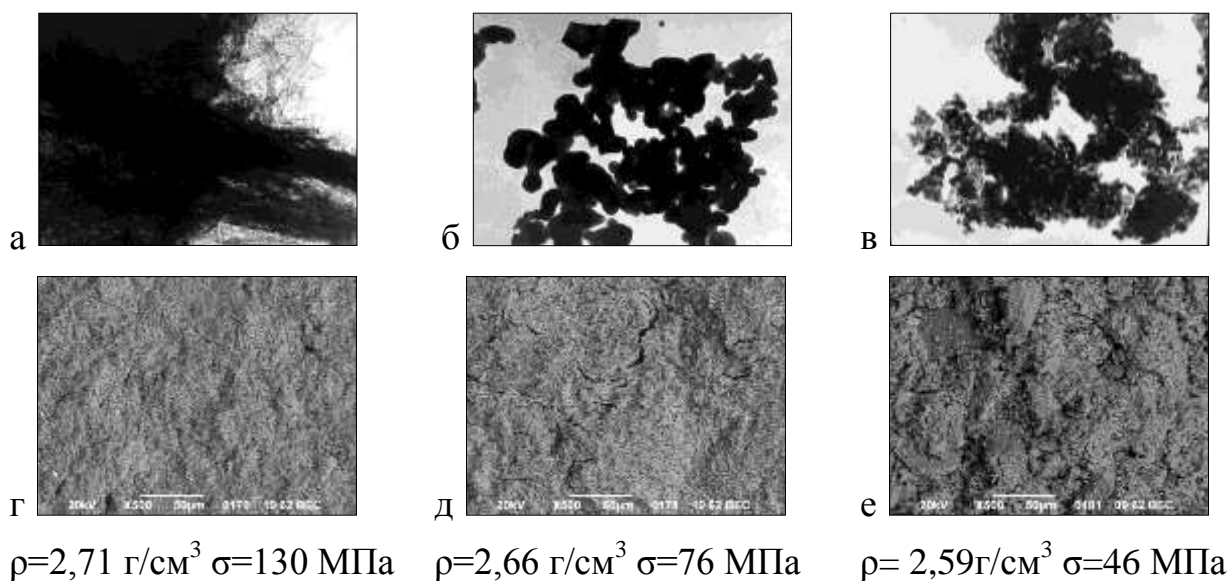


Рисунок 1. Влияние морфологии исходного порошка (а, б, в) на микроструктуру (г, д, е) и прочность керамики.

Нужно отметить, что при отсутствии керамического каркаса образец данного полимера был гибким. Тем не менее, заполнение пустот в пористых керамических образцах привело к существенному росту удельной прочности полученного композита (рисунок 2). Также отмечался значительный рост трещиностойкости.

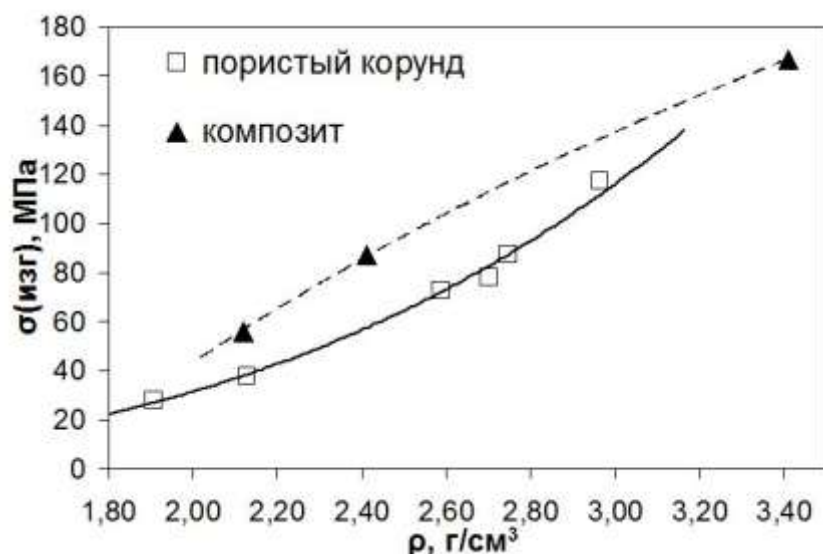


Рисунок 2. Зависимость прочности на изгиб от плотности для исходной корундовой матрицы и корундовой матрицы заполненной полимером.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения эпоксидных смол для получения полимер-керамических композитов. Предложенные композиты с керамической матрицей способны соединять в себе достоинства обоих компонентов: высокую прочность и износостойкость при низком удельном весе и устойчивости к коррозии. Решена задача получения керамической структуры с открытой пористостью, которая

обеспечивала бы полное заполнение пор керамической матрицы упрочняющими полимерными составами. Получен композитный материал с удельной прочностью на изгиб выше, чем у исходной пористой керамики.

Список используемых источников

1. Охлопкова, А.А. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями / А.А. Охлопкова, О.А. Адрианова, С.Н. Попов // Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т неметал. материалов. Якутск : Изд-во СО РАН, 2003. – 222 с.
2. Кропотин, О.В. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена / О.В. Кропотин, Ю.К. Машков, В.А. Егорова, О.А. Кургузова // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – № 5. – С. 66-70.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ ДВОЙНОГО КАРБИДА (Ti,Zr)C

Семенчук И.Е. , Щербаков В.А., Грядунов А.Н.

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, semenchuk-ilya@mail.ru;*

Получение ультратугоплавких композитов является важным направлением в развитии современных технологий машиностроения, металлообработки, атомной энергетики, авиационно-космической техники. К ним относятся композиты, состоящие из твердых растворов на основе карбидов титана и циркония, обладающие чрезвычайно высокой температурой плавления (более 3000°C), высокой механической прочностью, стойкостью к окислению и циклическим тепловым нагрузкам. Это позволяет сохранять изделиям длительную работоспособность в экстремальных условиях.

Для получения ультратугоплавких композитов с минимальной остаточной пористостью, обычно используют методы:

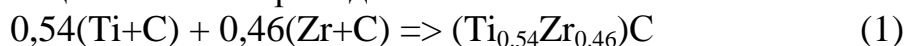
1) Горячего прессования при температурах 1900-2100°C и нагрузках ~20-50 МПа.

2) Искровое плазменное спекание (SPS, spark plasma sintering) , которое позволяет при меньших температурах получать плотные образцы.

3) Золь-гель метод

Все эти методы являются энергозатратными, многостадийными, требующими значительного времени и средств на их осуществление. В ИСМАН разработан эффективный метод получения ультратугоплавких композитов, сочетающий экзотермический синтез в режиме электротеплового взрыва (ЭТВ) и консолидацию горячего продукта в условиях квазиизостатического сжатия. Метод ЭТВ отличается от SPS тем, что вместо предварительно синтезированных и инертных в химическом отношении тугоплавких соединений TiC и ZrC используют реакционную смесь коммерческих порошков металлов и технического углерода (сажи), способную к экзотермическому взаимодействию. Новизна метода ЭТВ заключается в том, что в одну стадию осуществляется экзотермический синтез твердых растворов карбидов и их консолидация под действием внешней нагрузки. Метод обладает высокой эффективностью, так как отсутствуют промежуточные стадии синтеза монокарбидов, их измельчения и фракционирования.

В настоящей работе представлены результаты по синтезу ультратугоплавкого композита на основе системы TiC-ZrC методом ЭТВ под давлением. Лабораторная установка для осуществления синтеза ЭТВ описана в [1]. Экзотермическую реакцию синтеза проводили по схеме:



Реакционную смесь готовили из порошков титана (марки ПТМ), циркония (марки ПЦрК-1) и углерода (марки П804-Т) в планетарной мельнице АГО-2. Полученную смесь помещали в реакционную пресс-форму и осуществляли экзотермический синтез в режиме ЭТВ под давлением 100 МПа. В работе изучено влияние длительности активированного смешивания на формирование фазового состава и микроструктуры ультратугоплавких композитов.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что ультратугоплавкий композит, полученный с использованием смеси активированной в течение 10 минут, содержит три карбидные фазы: $Zr_{0.14}Ti_{0.86}C$, $Zr_{0.52}Ti_{0.48}C$ и $Zr_{0.74}Ti_{0.26}C$. Увеличение времени смешивания до 40 минут приводит образованию однофазного твердого раствора $Zr_{0.5}Ti_{0.5}C$. При использовании смеси активированной в течение 90 минут два твердых раствора: $Zr_{0.14}Ti_{0.86}C$ и $Zr_{0.74}Ti_{0.26}C$ с субмикронной структурой. Различие фазового состава конечного продукта можно объяснить влиянием длительности активации исходных порошков и температуры ЭТВ.

Полученные результаты согласуются с данными микроструктурного анализа. Установлено, что при активации в течение 40 минут средний размер частиц составляет 3-5 мкм, а при 90 минутах – 0,1-0,2 мкм. Показано, что микротвердость полученных композитов из смеси активированной в течение 40 минут составляет 13,2 ГПа, а при синтезе композита из смеси активированной в течение 60 минут – 18, 53 ГПа. Важно отметить, что методом ЭТВ под давлением непосредственно в процессе синтезе сформировался двух фазный композит $Zr_{0.16}Ti_{0.84}C$ и $Zr_{0.73}Ti_{0.27}C$ с субмикронной структурой.

Таким образом, впервые методом ЭТВ под давлением с использованием механоактивированной смеси титана, циркония и сажи в одну стадию синтезирован ультратугоплавкий композит на основе системы TiC-ZrC с субмикронной структурой. Показано, что фазовый состав композита зависит от длительности механической активации исходной смеси и температуры экзотермического синтеза. Важно отметить, что методом ЭТВ под давлением двухфазный композит $Zr_{0.16}Ti_{0.84}C$ и $Zr_{0.73}Ti_{0.27}C$ с субмикронной структурой получен непосредственно в процессе экзотермического синтеза без стадии длительного отжига.

Список используемых источников

1. В.А. Щербаков, А.В. Щербаков, С.А. Бостанджиян // Физика горения и взрыва. 2019. №1. С. 83–91.

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ*

Мордасов М.Д., Завражин Д.О., Мордасов Д.М.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
mit@tstu.ru*

На предприятиях машино- и приборостроения часто возникают задачи изготовления габаритных тонкостенных изделий из меди, таких, как корпуса теплообменников, объемные и коаксиальные резонаторы и т.п.

При сборке таких изделий возникает ряд прикладных научных проблем, связанных с выбором технологии пайки, которая наилучшим образом обеспечивает качество неразъемного соединения, или разработкой новых технологий, если существующие не удовлетворяют поставленным требованиям.

Широкое распространение в промышленности находит пайка в печах, поскольку при этом обеспечивается равномерный нагрев соединяемых изделий без их деформации даже при больших габаритах изделий [1-3].

Несмотря на очевидные преимущества данной технологии, основным недостатком является отсутствие на Российском рынке печей с большими габаритами рабочих камер. Представленное на рынке оборудование импортного производства предназначено для пайки небольших объектов в электронной промышленности. Зарубежные производители предлагают изготовление под заказ, однако стоимость такого оборудования высока, а в условиях часто меняющейся номенклатуры и типоразмеров изделий, изготовленная и приобретенная печь может оказаться бесполезной для пайки других деталей.

Разновидностью пайки в печи является пайка в вакууме [4]. Она успешно применяется для соединений многих металлов, в том числе и меди. Этот вид пайки производится в вакуумных печах или контейнерах, загруженных в обычные печи. Паяные швы, полученные при использовании нагрева в вакууме, отличаются чистотой исполнения, прочностью металла шва и высокой коррозионной стойкостью.

К недостаткам способа пайки в вакууме следует отнести сложность применяемого оборудования.

Пайка электросопротивлением [5], при которой нагрев осуществляется теплом, выделяющимся при протекании электрического тока через паяемые детали, с успехом применяется при пайке идеально плоских деталей, а также в электротехнике для соединения проводов.

К недостаткам способа пайки электросопротивлением следует отнести возможность перегрева контактирующих поверхностей массивных деталей, например медных массивных проводников, вследствие чего происходит неравномерный нагрев паяемого соединения; возникает нестабильность контакта электрод-деталь, трудности в воспроизведении постоянного режима,

неравномерности в подводе теплоты, из-за прерывистого включения источника питания для предотвращения перегрева угольных электродов, а также невозможность пайки деталей с поверхностями, отличными от плоских.

Для пайки массивных деталей широко применяется пайка погружением в расплавы солей, находящихся в соляных печах-ваннах [6]. Соли обычно служат источником тепла и оказывают флюсующее действие, поэтому дополнительного флюсования при пайке не требуется. При пайке погружением в ванну с припоем предварительно офлюсованные детали нагревают в расплаве припоя, который при температуре пайки заполняет соединительные зазоры.

Пайка погружением имеет следующие недостатки: повышенный расход электроэнергии, связанный с потерей теплоты через зеркало жидкой ванны в результате излучения и конвекционного обмена; создание дискомфортных условий вследствие теплоизлучения и испарения вредных для здоровья компонентов расплавов; необходимость устранения наплывов припоев с изделия после пайки погружением в жидкий припой и большая трудоемкость опиловочных работ; необходимость удаления воздушных «мешков» изделия, особенно при горизонтальном расположении зазоров; существенные остаточные деформации; низкая коррозионная стойкость декоративно-защитных покрытий на изделиях, паянных погружением в расплавы солей; значительный расход солей (флюсов) и припоя; необходимость рафинирования расплавов жидких ванн от примесей.

Массивные детали вследствие большой теплопроводности, превышающей в 6 раз теплопроводность железа, паяют газовыми горелками [7, 8]. Основными преимуществами такой технологии являются низкие затраты на оборудование, а также возможность механизации и автоматизации процесса; к недостаткам относятся необходимость работы с открытым огнем, другим существенным недостатком является сложность осуществления низкотемпературной пайки, так как температура пламени горелки достигает 3150°C. Единственным способом регулирования температуры в этом случае является увеличение и точное поддержание расстояния между горелкой и паяемыми поверхностями, что технически сложно реализуемо.

В электронике нашла применение технология пайки нагретым газом [9]. Паяемое изделие располагается в зоне выхода горячего газа. Тепловой режим пайки обеспечивается за счет изменения расхода газа и температуры нагревателя, а также скоростью перемещения паяемого изделия относительно паяльной головки.

Узкая область применения пайки нагретым газом обусловлена отсутствием на российском рынке соответствующего технологического оборудования. В последние несколько лет начало развиваться производство аппаратов горячего воздуха в России. В настоящее время такое оборудование успешно применяется для сварки полимеров.

Основным преимуществом, позволяющим применять аппараты горячего воздуха для низкотемпературной пайки металлов является наличие контура точного регулирования температуры, а также возможность доработки устройств с точки зрения применения в качестве теплоносителей защитных

газов. Наличие в комплекте оборудования различных насадок позволяет изменять ширину прогреваемого участка.

Таким образом, способы низкотемпературной пайки крупногабаритных деталей, основанные на использовании тепла пламени или горячего газа, являются наиболее дешевыми и универсальными, позволяют паять как массивные детали, так и тонкостенные. Основной научной задачей при разработке таких технологий является выбор и/или разработка флюсов, а также исследование процессов взаимодействия нагретых газовых потоков с металлическими пластинами различной толщины и химического состава.

**Работа выполнена в рамках программы конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года» управления образования и науки Тамбовской области, проект № МУ2022-02/27.*

Список используемых источников

1. Вахрушев, О. СЕНО. Печи конвекционной пайки для среднесерийного производства / О. Вахрушев // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 25-29.
2. Сизов, А. Конвекционные печи оплавления серии OmniFlex / А. Сизов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 6. – С. 28 – 30.
3. Власов, А. Печи для оплавления припоя RO300FC/C / А. Власов // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – № 5. – С. 41 – 43.
4. Zieger, В.Е. High temperature brazing in single chamber vacuum furnaces / В.Е. Zieger // Heat processing, 3. – 2016, pp. 104 – 108.
5. Иванов, Н.И. Исследование процесса пайки электросопротивлением медных проводов прямоугольного сечения / Н.И. Иванов, М.Ю. Карамышев // Современные материалы, техника и технологии. – № 6 (39), 2021. – С. 71 – 77.
6. Патент РФ № 2113945 МПК В23К 3/06, В23К 1/08 Линия пайки погружением в расплавленный припой / Лифтман И.Б. и др. – 1998.
7. Федоров, А.Л. Технология и оборудование низкотемпературной пайки / А.Л. Федоров. – Тольятти: Изд-во ТГУ. – 2021. – С. 34.
8. Мордасов, М.Д. Физико-химические основы низкотемпературной пайки стали 12Х18Н10Т с медью / Д.М. Мордасов, Д.А. Черных, М.Д. Мордасов // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018». Казань, 2018. – С. 344-346.
9. Новиковский, Е.А. Пайка металлов / Е.А. Новиковский. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – 63 с.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТНОГО ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНАЯ ПЛЕНКА

Изотов А.И., Кильман Г.В., Сироткин В.В., Шалаев Р.В.

*ГБУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»,
г. Донецк, ДНР, sharos@donfti.ru*

Введение. Контакт металл–полупроводник (барьер Шоттки) привлекает внимание исследователей уже не одно десятилетие. Как известно, именно с контактом металл-полупроводник принято связывать начало исследований в области полупроводниковой электроники в конце XIX века, а с начала 60-х годов прошлого века – современный этап в развитии СВЧ-электроники. Что касается вовлечения в практику новых полупроводниковых материалов, то достаточно перспективными в этом отношении на сегодняшний день представляются углеродные материалы [1-2]. Традиционная кремниевая платформа не отвечает многим современным требованиям, и все чаще в качестве ее потенциальной замены в отдельных нишах исследователи называют именно углерод. Благодаря огромному разнообразию аллотропных форм этот материал обладает немалым потенциалом во многих областях, но для электроники он представляет особый интерес.

Учитывая все вышесказанное, создание и исследование контакта “металл-углерод” представляется довольно актуальной задачей. В данной работе мы рассмотрели некоторые электрические свойства такого контакта.

Основные результаты. Образцы для исследований были получены методом магнетронного распыления графита в атмосфере аргона: углеродные графитоподобные пленки наносились на подложки из диэлектрика и металла (титан или инструментальная хромистая сталь). Плазма создавалась с помощью магнетрона постоянного тока планарной конструкции с плоским катодом и кольцевым анодом. Условия напыления образцов на всех видах подложек были одинаковы: давление газа в камере составляло 150 мТорр, время роста пленок 40 минут, температура подложки 350°C, ток магнетрона 40 мА.

Электрические свойства полученных образцов изучались в термокамере в диапазоне от 20°C до 150°C. Согласно работе [2] проводимость перпендикулярную направлению роста пленки называют поперечной, а вдоль направления роста – продольной. Поперечная проводимость измерялась двухзондовым методом в пленках на стеклянной подложке (чтобы исключить влияние хорошо проводящей металлической подложки) в диапазоне напряжений от -10 В до +10 В. Продольная проводимость измерялась в пленках, напыленных на металлические подложки. Измерения проводились в структуре: подложка–углеродная пленка–измерительный контакт. Были получены температурные зависимости сопротивления углеродных пленок и вольт-амперные характеристики контакта металл-углерод. По температурным

зависимостям графическим путем была оценена ширина запрещенной зоны полученных образцов.

Выращенные пленки демонстрируют преимущественно графитоподобные свойства: цвет варьируется от темно-серого до почти черного, адгезия относительно слабая. Температурная зависимость сопротивления пленок носит классический полупроводниковый характер: уменьшение сопротивления с ростом температуры ($dR/dT < 0$). Таким образом показано, что в результате работы были получены углеродные пленки с полупроводниковыми свойствами.

По наклону графика $\ln R(1/T)$ зависимости сопротивления возможно оценить ширину запрещенной зоны полученной углеродной пленки. Мы выбрали высокотемпературный участок графика, где проводимость классического полупроводника преимущественно определяется собственной проводимостью. Расчеты показали, что ширина запрещенной зоны пленки составляет примерно 0.29 эВ (в предположении, что мы имеем нелегированный или слаболегированный полупроводник).

Таким образом, при напылении такого рода пленок на металлические подложки получаем контакт типа “металл-полупроводник”, который и является предметом исследования в данной работе. Рассмотрим некоторые особенности этих контактов.

Вольт-амперные характеристики полученных контактов нелинейны и несимметричны (см.рис.1), следовательно, можно говорить о получении выпрямляющего контактного перехода “металл-полупроводник” (с потенциальным барьером Шоттки). В настоящее время существует немалое количество диодов на основе барьера Шоттки, а предъявляемые к ним требования довольно сильно различаются и зависят от области применения. Полупроводниковые материалы, наиболее часто используемые в современных диодах — кремний, карбид кремния и арсенид галлия. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Если же говорить о материале, использованном в данной работе, то вольт-амперная характеристика демонстрирует, как минимум, одно его очевидное преимущество по сравнению с большинством других материалов: контакт на его основе переходит в открытое состояние при очень малых значениях напряжения (~50-100 мкВ). Данное свойство может быть интересным во многих прикладных областях, что позволяет говорить о перспективности дальнейших исследований в этом направлении.

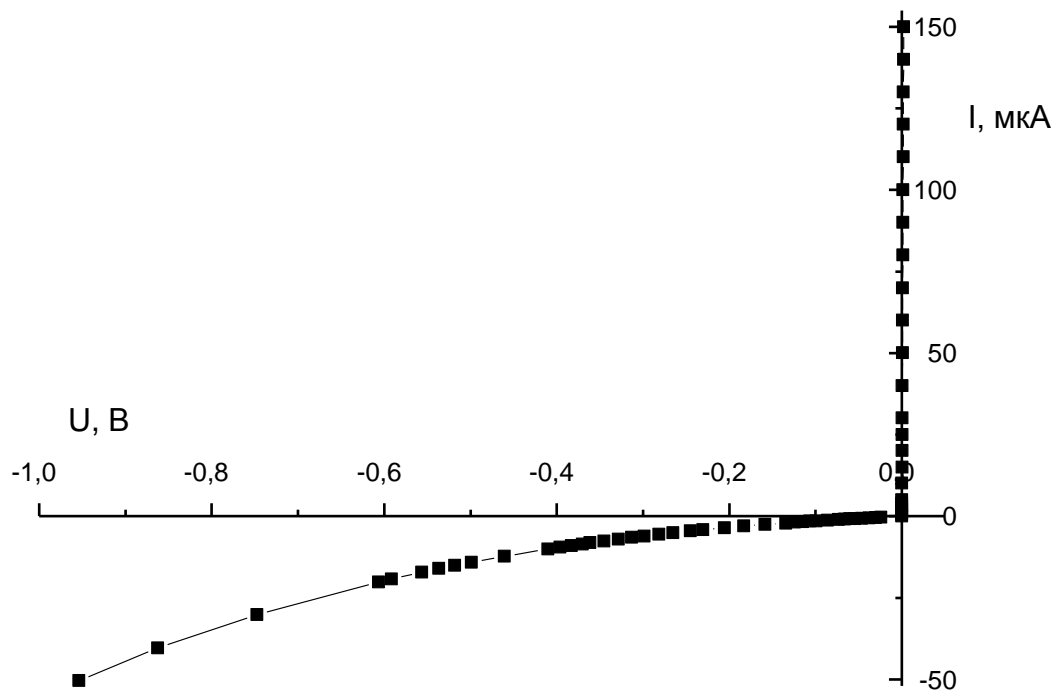


Рисунок 1. Вольт-амперная характеристика контакта «хромистая сталь-углерод».

Заключение. Предварительные исследования полученных образцов позволяют высказать предположение, что графитоподобные углеродные пленки могут успешно применяться в выпрямляющих переходах «металл-полупроводник» с барьером Шоттки. Согласно данным вольт-амперных характеристик, контакт «металл-углеродная пленка» переходит в открытое состояние при очень малых значениях напряжения, таким образом, можно говорить о том, что предлагаемый полупроводниковый материал в некоторых областях будет обладать определенными преимуществами перед традиционными материалами.

Список используемых источников

1. Калинин, Ю.Е. Электрические свойства тонких пленок аморфного углерода, полученных методом ионно-лучевого напыления / Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников // ЖТФ. – 2017. – Т. 87, вып. 11. – С. 1722 – 1728.
2. Хвостов, В.В. Свойства углеродных пленок с высокой анизотропией проводимости / В.В. Хвостов, О.А. Стрелецкий, В.В. Якунин, И.П. Иваненко, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. – 2012. – № 1. – С. 78 – 82.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИН

Фишбах Т.В., Ермаков А.С., Чуприкова А.А., Чудин И.А., Репин М.С.

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Резиновая промышленность является крупнейшим потребителем таких полимеров, как синтетические и натуральные каучуки, термопласты и реактопласты, химические волокна.

Каучуки обладают пласто-эластическими свойствами, поэтому они способны смешиваться с ингредиентами и приобретать желаемую форму под действием механических усилий.

Технические свойства каучуков подразделяются на технологические, характеризующие способность сырого (невулканизованного) каучука и резиновых смесей на его основе к переработке при изготовлении резиновых изделий, и эксплуатационные, характеризующие работоспособность вулканизатов в различных условиях эксплуатации.

Целью данной работы будет исследование проведения ускоренного контроля и испытания физико-механических свойств стандартной резиновой смеси.

В таблице 1 приведены основные данные листования пластицированного каучука СКС-30АКРМ-15(СКМС-30АКРМ-15) на вальцах СМ 1530 550/550 П.

Таблица 1. Технологические значения процесса листования каучука.

| Наименование технологического параметра | Значение |
|---|--|
| Температура в начале листования, °С, не более | |
| -переднего валка | 35 |
| -заднего валка | 30 |
| Время листования пластицированного каучука, мин | 1-2 |
| Время среза пластика рулонами, мин | 1-2 |
| Способ охлаждения | Воздушный |
| Способ хранения | На стеллажах или поддонах, отдельными закладками |

Рулоны пластика пересыпают химически охлажденным мелом и перестылают тканью или полиэтиленовой пленкой после охлаждения. Пластик каучуков используют не более четырех раз, после чего данный пластикат возможно использовать при изготовлении резиновых смесей для производства резиновых пластин или утилизируют на полигоне захоронения.

Загрузка основного производственного оборудования приведена в таблице 2.

Таблица 2. Параметры загрузки одного цикла.

| Наименование оборудования | Масса загрузки расчетная, кг | Объем загрузки, л | Съем смеси, л/мин |
|---------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| Резиносмеситель РС-71/17 | 50,26 | 49,76 | 5,238 |

Охлаждение резиносмесителя после изготовления пластиката требует соблюдения следующих условий (не менее): при температуре окружающего воздуха ниже плюс 10°C – 8 минут; при температуре окружающего воздуха выше плюс 10°C – 20 минут. Температура охлаждающей воды не более 18°C. Допускаемое отклонение времени загрузки $\pm 0,1$ минуты. Температура в смесительной камере при крашении резиновой смеси – не более 95°C. Смешение производят при закрытом верхнем затворе и под давлением сжатого воздуха не менее 0,4 Мпа.

Серу вводят в два приема (при необходимости через сито). Охлаждение резиновой смеси производят в камере для охлаждения резиновых смесей. Листы резиновой смеси перестилают тканью или полиэтиленовой пленкой через два листа.

На верхний лист партии маркировочным мелом наносят марку резиновой смеси и номер партии.

Испытываться могут специальные образцы из вулканизата для установления механических характеристик резины, из которой изготавливаются те или иные образцы или готовые детали. Кроме того, различают стандартные испытания, предусмотренные существующими ГОСТами, и специальные испытания, диктуемые особенностями эксплуатации резиновых изделий.

Численные результаты испытаний, хотя и являются объективными критериями для оценки свойств резины или отдельных деталей, не являются, однако, физическими константами, поскольку они зависят от режима деформации, формы испытываемых изделий и других особенностей методики испытаний.

При проведении физико – механических испытаний резиновой смеси в лабораторных условиях проверяются такие показатели как условная прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, сопротивление раздиру, относительная остаточная деформация после разрыва, условное напряжение при 70% удлинении, изменение показателей после старения в воздухе за 24 часа при 100 °С (относительное удлинение при разрыве и условная прочность при растяжении), коэффициент морозостойкости при минус 40 °С.

Так же при проведении ускоренного контроля определяются такие показатели как пластичность и время начала подвулканизации на приборе типа Муни при температуре 120°C.

Для отработки технологического режима были изготовлены 3 партии изделий (табл. 3).

Таблица 3. Структурные и физико-механические показатели партий резин.

| Наименование показателя | Значение показателя | | | |
|---|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | норма | 80'x167°C | 120'x167°C | 80'x175°C |
| Содержание свободной серы, % | Не более 0,7 | 0,51 | 0,3 | 0,16 |
| Условная прочность при растяжении, МПа | Не менее 11,8 | 25,3 | 21,3 | 18,3 |
| Относительное удлинение при разрыве, % | Не менее 500 | 650 | 850 | 900 |
| Изменение показателей после старения, % – условной прочности – относительного удлинения | От 0 до минус 30 | минус 43,0 минус 46,7 | минус 13,1 минус 20,3 | минус 19,6 минус 23,1 |

При оценке внешнего вида изделий отличия не отмечены. Однако, после проведения контрольных испытаний можно сделать вывод о том, что в режиме 1 содержание свободной серы близко к предельно допустимому значению. При этом, значения прочности и относительного удлинения после старения не соответствуют требованиям.

Образцы 2 и 3 вполне удовлетворяют всем предъявляемым требованиям, но необходимо учесть вероятность осмоления натурального каучука при высоких температурах, что подтверждается данными об изменении показателей после старения.

Таким образом, для производства можно рекомендовать режим 2, несмотря на то, что он занимает в 1,5% раза больше времени на производство.

Список используемых источников

- ГОСТ 10722-76. Каучуки и резиновые смеси. Метод определения вязкости и способности к преждевременной вулканизации.
- Галыгин, В.Е. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин // Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 180 с.
- Фунбаю, М.А. Исследование режимов вулканизации каучука / М.А. Фунбаю, Т.В. Фижбах, А.А. Чуприкова, Т.А. Лутовинова // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы XIII Международной научно-инновационной молодежной конференции. 2021. С. 52-54.

ИЗУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРИ ХОЛОДНОМ ОДНООСНОМ ПРЕССОВАНИИ ШИХТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ Ti-AL-Nb-MO-B*

*Константинов А.С., Чижиков А.П., Болоцкая А.В., Столин П.А.,
Антипов М.С., Бажин П.М.*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
структурной макрокинематики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук, Черноголовка
konstanta@ism.ac.ru*

К свойствам современных жаропрочных сплавов с каждым годом повышаются требования. На сегодняшний день промышленные сплавы не в полной мере удовлетворяют этим требованиям, особенно предъявляемым к изделиям авиакосмической техники ответственного назначения. Интерметаллиды на основе TiAl(Nb,Mo) показывают превосходные свойства (удельная прочность и высокое сопротивление ползучести при повышенных температурах). С целью улучшения физико-механических свойств на сегодняшний день внимание направлено на интерметаллиды на основе многокомпонентных систем модифицированных небольшим количеством бора - TiAl(Nb,Mo)B, который является структурно-модифицирующей примесью в интерметаллиде [1]. Работы в этом направлении активно ведутся в мировом сообществе и имеют большие перспективы практического применения.

В настоящей работе было проведено исследование реологических закономерностей при холодном одноосном прессовании шихтовых заготовок на основе Ti-Al-Nb-Mo-B. Такие работы позволяют из одного эксперимента построить реологическую кривую и установить зависимость плотности шихтовой заготовки от времени приложения давления [2].

Работы проводились на машине сжатия РЭМ-20А при постоянной скорости перемещения плунжера пресса $U=10$ мм/мин. В предложенной схеме реализован реологический подход для определения наиболее благоприятных условий прессования шихтовых заготовок (рис. 1). Для проведения экспериментальных работ была использована стальная пресс-форма с диаметром загрузочной камеры 12 мм. Высота засыпки исследуемых порошковых смесей составляла $h_n = 40$ мм. Собранная пресс-форма, вместе с содержащейся в ней порошковой смесью, устанавливалась под плунжер пресса. Далее плунжер пресса приводился в действие.

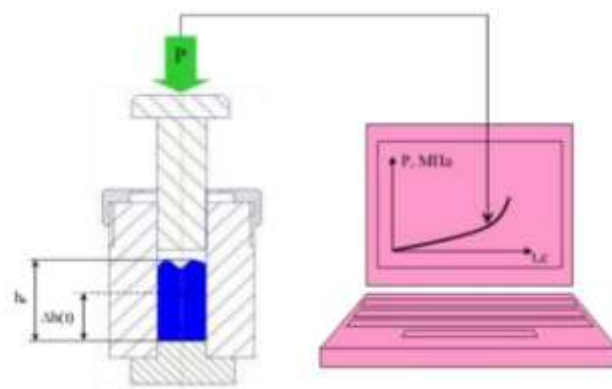


Рисунок 1. Принципиальная схема эксперимента.

В качестве объектов исследования были выбраны порошковые реагенты, взятые в следующих соотношениях: Ti-(42-45)Al-(2,5-7)(Nb, Mo)-(0,1-0,4)В. В результате проведенных исследований найдены зависимости напряжения от деформации, которые можно условно разделить на три стадии. На первой стадии происходит линейный рост напряжений, сопровождаемый увеличением деформации, за счет перемещения частиц порошка в поры. На второй стадии происходит уплотнение материала за счет аккомодации частиц. На третьей стадии происходит деформация самих частиц. В результате проведенных исследований были определены реологические характеристики (модуль упругости, конечное значение линейного участка роста, модуль сжимаемости, время релаксации), установлены оптимальные интервалы плотности шихтовых заготовок для дальнейшего проведения синтеза в условиях свободного СВС-сжатия [3] и получения компактных материалов на основе TiAl(Nb,Mo)В.

Список используемых источников

1. Galetz, M.C. Oxidation-induced microstructural changes of the TiAl TNM-B1 alloy after exposure at 900 °C in air. / M.C. Galetz, A.S. Ulrich, C. Oskay and al. // *Intermetallics*. 2020. Vol. 123. No. 106830.
2. Бажин, П.М. Деформация как мера способности политетрафторэтилена к формованию изделий при переработке в твердой фазе. / П.М. Бажин, А.М. Столин, В.М. Бузник // *Химическая технология*. 2019. Т. 20. № 2. С. 64-69.
3. Bazhina, A. Structure, phase composition and mechanical characteristics of layered composite materials based on TiB/xTi-Al/ α Ti ($x = 1,1.5,3$) obtained by combustion and high-temperature shear deformation. / A. Bazhina, A. Chizhikov, A. Konstantinov, N. Khomenko, P. Bazhin, V. Avdeeva, O. Chernogorova, E. Drozdova // *Materials Science & Engineering A*. 2022. Vol. 858. No. 144161.

**Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00040, <https://rscf.ru/project/22-19-00040>.*

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА*

Мордасов М.Д.¹, Мордасов Д.М.¹, Tembe M.O.²

¹- *ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
mit@mail.nnn.tstu.ru;*

²- *Polytechnic Institute of Porto, Porto.*

Важным аспектом в формировании структуры полимерцементного материала является определение оптимального соотношения полимерной и минеральной части, так как чрезмерное использование полимера негативно влияет на процесс гидратации цемента, а, следовательно, на эксплуатационные свойства полученной композиции.

В работе рассмотрен полимерцементный состав на основе эпоксидной смолы и водной дисперсии сополимера стирола, акриловой кислоты и бутилакрилата. Использование эпоксидной смолы в материале обусловлено её высокими прочностными показателями, водостойкостью, хорошей адгезией к металлу, дереву, каменным материалам и низкой усадкой. Водная дисперсия сополимера стирола, акриловой кислоты и бутилакрилата в составе полимерцементного материала способствует положительному влиянию на процесс гидратации цемента, повышает пластичность, прочность и химическую стойкость материала.

Данное исследование посвящено оценке влияния полимерцементного соотношения на формирование микроструктуры полученного материала. Исследования проводились на базе Португальского политехнического университета P.Porto в лаборатории Interdisciplinary Studies Research Center (ISRC). Сканирующая электронная микроскопия проводилась на установке: Environmental Scanning Electron Microscope with X-Ray Microanalysis and Electron Backscattered Diffraction analysis: FEI Quanta 400 FEG ESEM / EDAX Genesis X4M. Составы исследованных образцов представлены в таблице 1. Исследование производилось при одинаковом водоцементном соотношении В/Ц = 0,6 и трепелоцементном соотношении Т/Ц = 0,1. Выбор оптимальной концентрации трепела и соотношения полимерных составляющих внутри полимерной добавки проведены ранее в работах [1] и [2] соответственно.

Таблица 1. Состав исследованных образцов.

| | Полимерцементное соотношение (П/Ц) | Водоцементное соотношение (В/Ц) | Трепелоцементное соотношение (Т/Ц) |
|------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Образец №1 | 0,2 | 0,6 | 0,1 |
| Образец №2 | 0,5 | 0,6 | 0,1 |
| Образец №3 | 0,75 | 0,6 | 0,1 |

| | | | |
|------------|---|-----|-----|
| Образец №4 | 1 | 0,6 | 0,1 |
|------------|---|-----|-----|

На рис. 1 приведены микрофотографии структуры полученных полимерцементных материалов при увеличении $\times 100$.

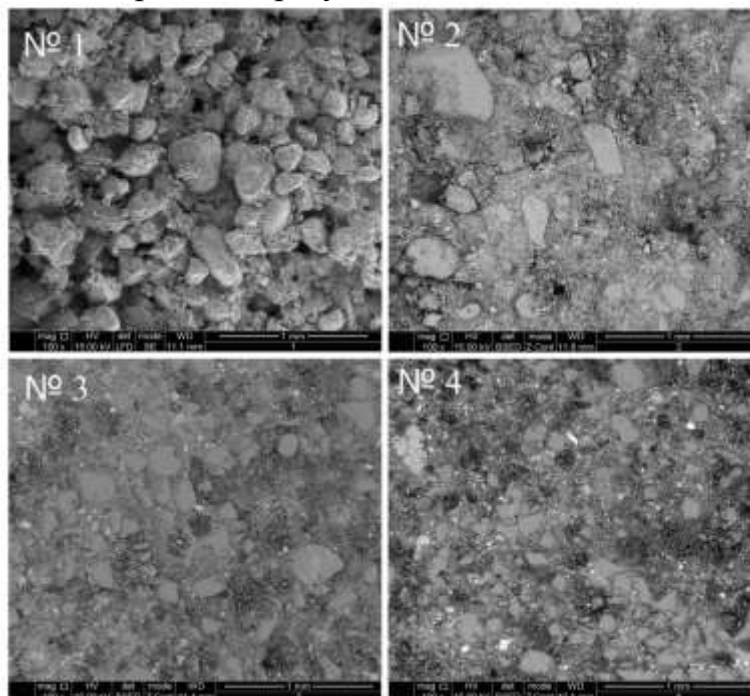


Рисунок 1. Микроструктура полимерминерального композиционного материала при увеличении $\times 100$

На микрофотографии образца №1 (П/Ц = 0,2) (рис. 1) отчетливо видны частицы песка, покрытые полимерцементным связующим, и границы между ними. Структура полученного материала состоит из плохо связанных между собой кластеров, контактная зона между которыми неплотная.

Повышение полимерцементного соотношения с П/Ц = 0,2 до П/Ц = 0,5 (образец №2, рис. 1) способствует увеличению количества полимерцементного связующего в контактной зоне и более плотному соединению частиц наполнителя. При данной концентрации полимера микроструктура плотно упакована, но неравномерна.

При значениях полимерцементного соотношения П/Ц = 0,75 и П/Ц = 1 наблюдается равномерная плотноупакованная структура, причем у образца №4 распределение грубодисперсного наполнителя (песка) более равномерное. Это может быть связано с тем, что полимерная составляющая, выполняя роль пластификатора, способствует улучшению подвижности и пластичности смеси, что предотвращает коагуляцию во время отливки.

Образец №1 с полимерцементным соотношением 0,2 значительно отличается по строению от остальных. При содержании такого количества полимерного связующего (П/Ц = 0,2) формируется много отдельных несвязанных кластеров (см. выделенные области на рис. 2, а), которые не участвуют в формировании полимерцементной матрицы, а ведут себя как наполнители. Следовательно, эксплуатационные свойства данного материала будут практически идентичны обычному цементно-песчаному составу.

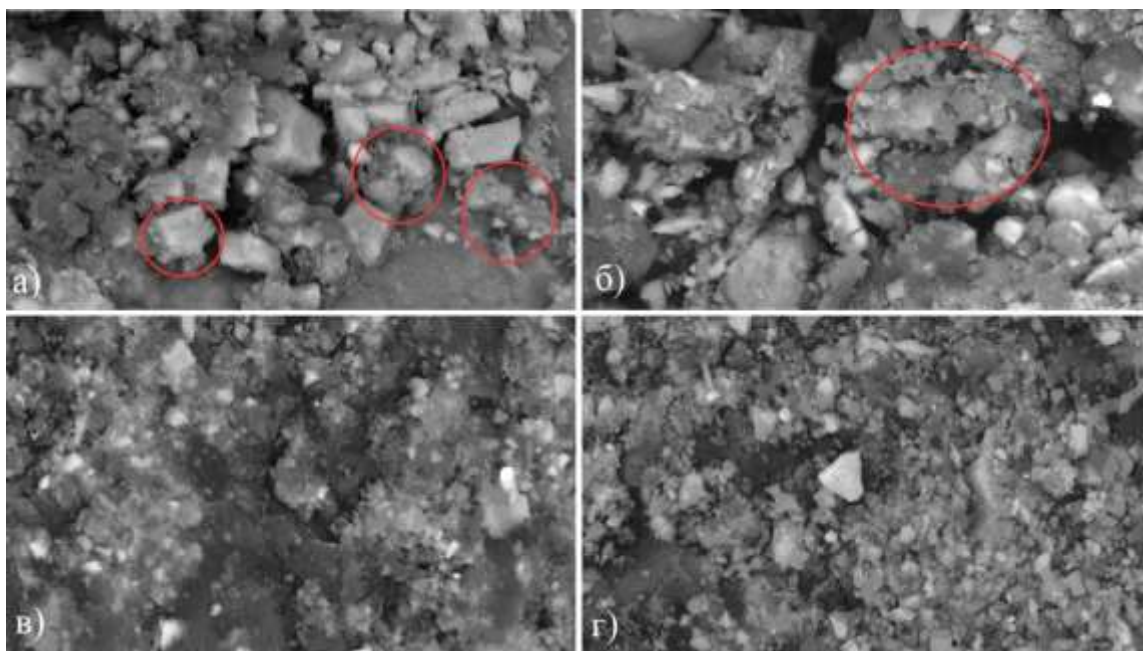


Рисунок 2. Микроструктура образцов №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г) при увеличении $\times 5000$.

По мере увеличения содержания полимерного компонента (до $\text{П/Ц} = 0,5$) происходит повышение концентрации несвязанных кластеров и зарождение перколяционных узлов (см. выделенную область на рис. 2, б), распределение которых по объему материала способствует значительному увеличению прочностных характеристик полученного композита. Но данного количества полимерной добавки не достаточно для формирования перколяционного кластера.

При большем содержании полимерного компонента $\text{П/Ц} = 0,75$ (рис. 2, в) и $\text{П/Ц} = 1$ (рис. 2, г) наблюдается образование перколяционного кластера и формирование полимерцементной матрицы, обладающей повышенными показателями, прочности и пластичности, за счет синергетического действия полимерной и минеральной составляющих.

**Исследование проведено при грантовой поддержке по договору №49ГССС15-Л/78647.*

Список используемых источников

1. Мордасов, М.Д. Влияние содержания аморфного кремнезема на физико-механические свойства полимер-минерального композиционного материала / М.Д. Мордасов, Д.М. Мордасов, В.С. Верченков // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития. – 2020. – С. 78 – 81.

2. Мордасов, М.Д. Влияние отвердителя на механические свойства эпоксидной смолы ЭД – 20 / М.Д. Мордасов // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы XI Международной научно-инновационной молодежной конференции. – 2019. – С. 104 – 106.

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИТУМА ДОРОЖНОГО СПЕЦИАЛЬНОГО, МОДИФИЦИРОВАННОГО ГИБРИДНЫМ УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ*

*Евлахин Д.А., Таров Д.В., Слепов Д.С., Столяров Р.А.,
Ягубов В.С., Зеленин А.Д., Ананьев А.В.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
evlahin.daniil2002@yandex.ru*

Стремительное развитие дорожной промышленности нуждается в разработке инновационных материалов, предназначенных для получения дорожных покрытий с эффектом самозалечивания дефектов. В связи с этим данная работа посвящена разработке инновационной технологии получения дорожного битума, впервые модифицированного гибридным наполнителем на основе углеродных наноматериалов отечественного производства.

Микроволновая техника использовалась для нагрева асфальта в процессе производства, на месте укладки, удаления льда в холодных странах и самозалечивания трещин [1]. Применение микроволнового нагрева является инновационной прорывной технологией по сравнению с индукционным нагревом, так как меньшей подводимой энергии и времени обработки дорожного покрытия, что приводит к значительному снижению его стоимости [2]. Интенсифицировать процесс СВЧ обработки предлагается посредством включения добавок, поглощающих микроволны, например, таких как стальная вата [3], их дозировка примерно в 10 раз меньше, чем требуется для нагрева того же уровня с использованием индукционного метода [2]. При этом скорость микроволнового нагрева намного выше, чем при индукционном. Вместо индукционного нагревателя мощностью 50 кВт достаточно микроволновой печи мощностью 1,2 кВт для достижения такой же скорости нагрева.

Наряду с положительными эффектами данный подход имеет ряд серьезных недостатков [4]:

- металлическая фибра имеет довольно высокую стоимость;
- существенно осложняет подбор и изготовление составов а/б смеси в силу формы частиц и сниженной адгезии битума к нержавеющей стали.

Перспективными материалами способными заменить металлическую фибру являются углеродные нанотрубки (УНТ) [5]. Однако, для практической реализации данного подхода, а также повышения его рентабельности необходимо максимально снизить концентрацию углеродного наномодификатора.

Применение гибридного наполнителя, состоящего из УНТ и графеновых нанопластинок (ГНП), позволит снизить концентрацию модификатора в

полимерно-битумном вяжущем за счет реализации синергетического эффекта в электропроводности и восприимчивости к СВЧ излучению.

Создать необходимые научно-технические заделы в области проектирования технологий получения и модификации целого спектра асфальтобетонных материалов с эффектом самозалечивания является актуальной задачей.

Существующие на сегодняшний день научно-технические решения не способны подготовить к введению и гомогенно распределить углеродный наномодификатор, состоящий из УНТ и ГНП, в дорожном битуме [6,7].

Таким образом, цель настоящей работы заключалась в разработке технологической схемы установки получения битума дорожного специального, модифицированного гибридным наполнителем.

В рамках научно-исследовательской работы спроектирована технологическая схема установки получения битума дорожного специального, модифицированного гибридным наполнителем, представленная на рисунке 1.

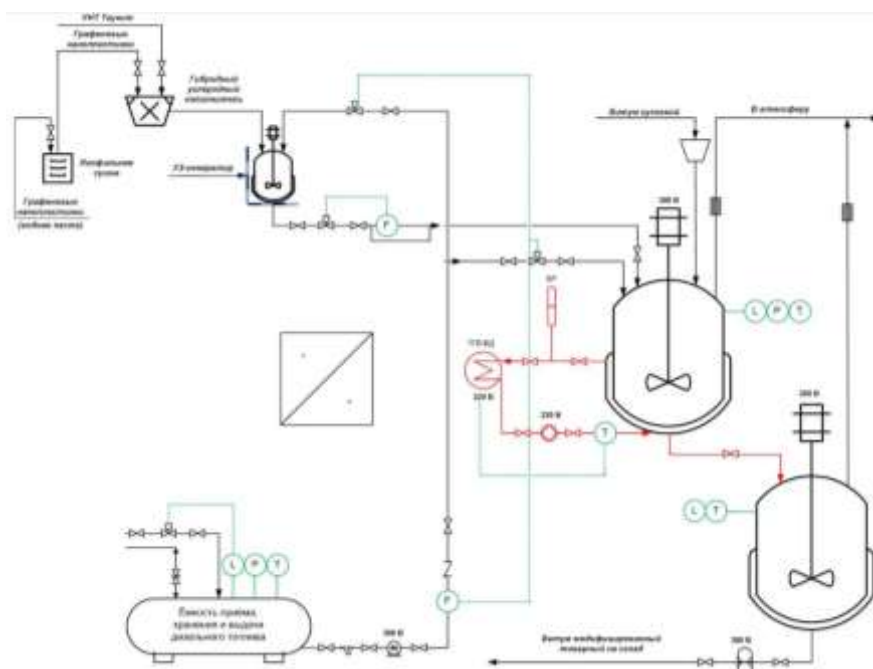


Рисунок 1. Эскизная технологическая схема установки получения битума дорожного специального, модифицированного гибридным наполнителем.

Согласно данной схеме на первом этапе производится подготовка гибридного наполнителя. Гибридный наполнитель УНТ и ГНП. В силу условий получения ГНП выпускаются в виде водной пасты с различным содержанием сухого остатка. Водная паста ГНП подвергается лиофильной сушке для удаления воды. После чего навеска высушенных ГНП поступает в механоактиватор лопастного типа «WF-20В», где смешивается с навеской УНТ. Далее гибридный наполнитель смешивается с дизельным топливом и обрабатывается ультразвуком. В отдельный смеситель помещается разогретое до 110 °С дизельное топливо и кусковой битум. Таким образом происходит со расплав и со растворение битума БНД90/130. В полученный расплав вводится

приготовленная ранее дисперсия гибридного наполнителя в дизельном топливе. После чего полученный композит перегружается в емкость для хранения.

Таким образом, полученные в ходе проведенной научной работы результаты будут способствовать развитию качества и эффективности дорожно-строительных и ремонтных работ за счет предложения рынку востребованных высококачественных материалов и технологий дорожного строительства и ремонта, базирующихся на их применении.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Управления образования и науки Тамбовской области и координационного совета по вопросам высшего образования и науки в рамках научного проекта № МУ2022-02/18 «Грант для поддержки прикладных исследований молодых ученых 2021 года».*

Список используемых источников

1. Gulisano, F. Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps / F. Gulisano, Gallego J. // *Constr. Build. Mater.*, V. 278. 2021, P. 121993, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121993>.

2. Gallego, J. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing / J. Gallego, M.A. Del Val, V. Contreras, A. Páez // *Constr. Build. Mater.*, V. 42. 2013, P. 1-4, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.007>.

3. Gulisano, F. Microwave Healing Performance of Asphalt Mixture Containing Electric Arc Furnace (EAF) Slag and Graphene Nanoplatelets (GNPs) / F. Gulisano, J. Crucho, J. Gallego, L. Picado-Santos // *Appl. Sci.*, V. 10. 2020, <https://doi.org/10.3390/app10041428>.

4. Кумков, Н.Р. Модификация битума различными микро- и нанодисперсными наполнителями для обеспечения эффективного поглощения свч электромагнитного излучения / Н.Р. Кумков, И.Н. Бурмистров, С.В. Арзамасцев, Д.В. Кузнецов, И.А. Ильиных, С.Л. Мамулат // В сборнике: Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. Доклады VIII Международной конференции. Саратов, 2019. С. 137-139.

5. Мамулат, С.Л. О подходах к модификации битумных вяжущих / С.Л. Мамулат, Ю.С. Мамулат, И.А. Бурмистров // *Мир дорог*. 2019. № 117. С. 41-46.

6. Патент 2766581 Российская Федерация, МПК⁵¹ C01B 32/158 (2017.01) C01B 32/159 (2017.01) C01B 32/182 (2017.01) B82Y 30/00 (2011.01). Модифицирующая добавка для асфальтобетона / Д.И. Шварцман, М.А. Напартович, М.И. Гершевич; заявитель и патентообладатель Шварцман Д. И., Напартович М. А., Гершевич М. И. – № 2021128984; заявл. 05.10.2021; опубл. : 15.03.2022, Бюл. № 8. – 9 с.: ил.

7. Патент 2717068 Российская Федерация, МПК⁵¹ C08L 17/00 (2006.01). Способ получения модифицирующей композиции для асфальтобетонных смесей / С.А. Комаров; А.А. Мамиев. – № 2019111999; заявл., 19.04.2019; опубл.: : 17.03.2020, Бюл. № 8. – 11 с.: ил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ НАНОДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕАВТОКЛАВНЫХ ГАЗОБЕТОНОВ

Альджабуби Д.З.М., Буракова И.В., Бураков А.Е., Ткачев А.Г.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
aldjabubi.dzm@mail.tstu.ru*

С каждым годом газобетон становится всё более востребованным в самых разных сферах строительства, поскольку он является объективно самым дешевым стеновым материалом. В то же время, наряду с высокими теплоизоляционными свойствами, неавтоклавный ячеистый бетон, как правило, характеризуется невысокой прочностью каркаса и моноразмерной пористой структуры композита. Указанные недостатки возможно компенсировать, с одной стороны, использованием активных модифицирующих компонентов, в том числе наноструктурированных, способных повысить характеристики несущей матрицы композита, а с другой – комплексной поризацией системы, что обеспечит формирование гетеропористой ячеистой структуры бетона с пониженной плотностью. На сегодняшний день актуальной проблемой является улучшение эксплуатационных свойств газобетонных композитов при сохранении их теплозащитной способности. Для повышения прочностных свойств ячеистого бетона применяются различные модифицирующие добавки. Это позволяет в достаточно широких пределах изменять выходные характеристики бетонов, создавать материалы с требуемым комплексом свойств [1, 2].

Одними из наиболее широко применяемых эффективных модификаторов являются лигносульфонаты — для строительства самое универсальное, безвредное и доступное вещество, улучшающее текучесть и реологические свойства материалов, повышающее их прочность, долговечность и износостойкость. Снижает восприимчивость к солевой агрессии и температурным колебаниям, применяется при производстве: цемента, гипса, бетона, кирпича, керамзита, керамических изделий, ДСП, клеев и смол, красителей и пигментов. Лигносульфонат представляет собой анионный поверхностно-активный полимер, способный вызывать электростатическое отталкивание и стерические затруднения, его часто применяют в качестве понизителя содержания воды в добавках к бетону. Лигносульфонат улучшает текучесть цементного теста, служит эффективным диспергатором [2, 3]. Лигносульфонаты не содержат опасных для человека компонентов и их квалифицированное использование является важным для экологии.

Последние экспериментальные данные говорят о том, что модифицированный лигносульфонат имеющий достаточно упорядоченную структуру и в значительной степени очищенный от загрязняющих его и

влияющих на его состав примесей, может обладать суперпластифицирующим действием.

Сегодня ведется интенсивный поиск путей эффективной, модификации лигносульфонатов с целью получения на их основе пластифицирующих добавок, не имеющих негативных черт. Это обусловлено их доступностью, дешевизной, хорошей растворимостью в воде, возможностью их получения в жидком, порошкообразном, гранулированном виде, отсутствием неприятных запахов, нетоксичностью, достаточно высокими исходными реологическими свойствами, способностью легко поддаваться модифицированию, значительно улучшая при этом свои свойства.

В то же время в ряде исследований было показано, что существенно улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства различных бетонов позволяет внесение углеродных наноструктурных добавок. В частности, в работе [4] изучали влияние углеродных нанотрубок (УНТ) на механические характеристики автоклавных и неавтоклавных блоков из ячеистого бетона. Было обнаружено, что включение УНТ усиливает кристаллизацию бетона и, кроме того, повышает прочность на сжатие и изгиб, уменьшает эффекты ползучести. В другом исследовании Han et al. [5] удалось провести сравнительную оценку прочности на сжатие и изгиб вяжущих композитов, включая и исключая многослойные графены. Они заметили, что включение этих материалов может улучшить прочность на сжатие и изгиб на 54 и 21% соответственно. Кроме того, был сделан вывод о том, что благодаря выдающимся механическим и термическим свойствам, большому влиянию наноразмерных эффектов, низкой плотности и надежной химической и термической стабильности графен способен эффективно армировать цементные композиты в масштабах от нано-микро до мезо-макро-шкалы.

Таким образом, авторы в данном исследовании предлагают оригинальный метод получения эффективного состава газобетона, модифицированного гибридной добавкой оксида графена и лигносульфоната, для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств.

Для приготовления смесей неавтоклавного газобетона были использованы следующие сырьевые компоненты: портландцемент М500 (Paladium, г. Жуковский, Россия), песок сухой ГОСТ 8736-2014, строительная гашеная карбонатно-известковая мука (ООО «СтройКомплект», г. Воронеж, Россия), алюминиевая пудра, а также обычная водопроводная вода (соотношение вода/цемент составляло 0,4). Для определения прочности на сжатие были изготовлены бетонные кубики размером 70*70*70 мм. После укладки смеси в формы производилось уплотнение бетонной смеси на вибрационной площадке, отвечающих требованиям ГОСТ 17674-72 с обязательным наличием вертикальной составляющей колебаний. На 7 день формы разбирались, кубики вынимались для продолжения набора прочности (28 дней). Для определения предела прочности на сжатия использовали пресс ИП-500 (ЗАО «ЗИПО», г. Армавир). В качестве модифицирующей добавки использовали нанокompозит ОГ/ЛС. Доля внесения ОГ/ЛС составляла от 0,001 до 0,01 масс. %. Также исследовалось влияние исходного ЛС и суспензии ОГ на

прочностные характеристики. Установлено, что при добавлении 0,002 масс.% нанодобавки ОГ/ЛС происходит увеличение предела прочности на сжатие по сравнению с контрольным образцом на 20-25 %, что является существенным приростом прочностных характеристик для газобетонов.

Список используемых источников

1. Ouyang, X. Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate – A potentially useful water reducer / X. Ouyang, X. Qiu, P. Chen // *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, 2006. – V. 282-283. – P. 489-497.
2. Zhou, X. Process for calcium xylonate production as a concrete admixture derived from in-situ fermentation of wheat straw pre-hydrolysate / X. Zhou, X. Zhou, X. Tang, Y. Xu // *Bioresour. Technol.*, 2018. – V. 261. – P. 288-293.
3. Mario, M. Water reducers/retarders. In *Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)*. – NY: William Andrew Publishing, 1996. – P. 286-409.
4. Keriene, J. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes / J. Keriene, M. Kligys, A. Laukaitis, G. Yakovlev, A. Špokauskas, M. Aleknevicius // *Construct. Build. Mater.*, 2013. V. 49. – P. 527-535.
5. Han, B. Enhancing mechanisms of multi-layer graphenes to cementitious composites / B. Han, Q. Zheng, S. Sun, S. Dong, L. Zhang, X. Yu, J. Ou // *Compos. Appl. Sci. Manuf.*, 2017. – V. 101. – P. 143-150.

ВЛИЯНИЕ СОЛЬВАТНОЙ ОБОЛОЧКИ НА РЕАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ОКИСЛЕННОГО ГРАФИТА

Бубнова Е.В., Здерева А.В., Ростова Д.П., Кровякова Е.И., Швеиц М.Е.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
veta.bubnova@mail.ru*

Нanomатериалы на основе графена представляют большой интерес благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам и их применению в различных сферах деятельности. Графеновые структуры нашли применение в качестве добавки в композитные материалы, моторные масла, значительно улучшающие их свойства.

В данной работе рассмотрена структура окисленного графита, его реакционная способность и изменение таких показателей, как жесткость, индекс электрофильности и химический потенциал молекулы в зависимости от размера сольватной оболочки.

Для изучения реакционной способности молекулы окисленного графита был построен кластер, состоящий из четырех графеновых слоев. Рассчитали число карбоксильных групп в молекуле графита из соображений 0,2 ммоль/г. Для данного кластера число карбоксильных групп равно 1.

Для оптимизации полученной молекулы был использован субстративный метод ONIOM, в котором карбоксильная группа оптимизировалась методом DFT с функционалом PBEh-3c, а четыре графеновых слоя и молекулы растворителя – полуэмпирическим методом ХТВ2 [1]. Был использован именно такой подход, поскольку карбоксильная группа представляет наибольший интерес, на ней расположены граничные орбитали молекулы графита.

В качестве растворителя использовалась вода. Для расчета сольватной оболочки молекулы был использован метод неявного учета растворителя ALPB с добавлением молекул воды в явном виде от одной до четырех для образования водородных связей.

Для описания реакционной способности молекулы удобно использовать индекс электрофильности и жесткость по Пирсону, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$\omega = \frac{\mu^2}{2 \cdot \eta} \quad (1)$$

где μ – химический потенциал:

$$\mu = \frac{E_{\text{НВМО}} + E_{\text{ВЗМО}}}{2} \quad (2)$$

где $E_{\text{НВМО}}$ - энергия нижней вакантной молекулярной орбитали, $E_{\text{ВЗМО}}$ - энергия верхней занятой молекулярной орбитали.

Абсолютная жесткость по Пирсону:

$$\eta = \frac{E_{\text{НВМО}} - E_{\text{ВЗМО}}}{2} \quad (3)$$

Граничные молекулярные орбитали (МО), верхняя занятая МО (ВЗМО) и нижняя вакантная МО (НВМО), позволяют оценить реакционную способность

и кинетическую устойчивость молекулы. ВЗМО связана со способностью системы отдать электрон, а НВМО – со способностью принять электрон [2].

Большая энергетическая щель ВЗМО–НВМО характеризует высокую химическую стабильность соединения. Химическая жесткость η молекулы определяется её сопротивлением деформации из-за электрического поля и эффекта химических реакций.

Общий индекс электрофильности ω соединения определяется энергией стабилизации при приеме дополнительной электронной плотности и характеризует электронный перенос и стабильность, поэтому он хорошо описывает общую реакционную способность соединения [3].

В ходе расчетов были получены структуры сольватных оболочек молекул графита, которые приведены на рис. 1.

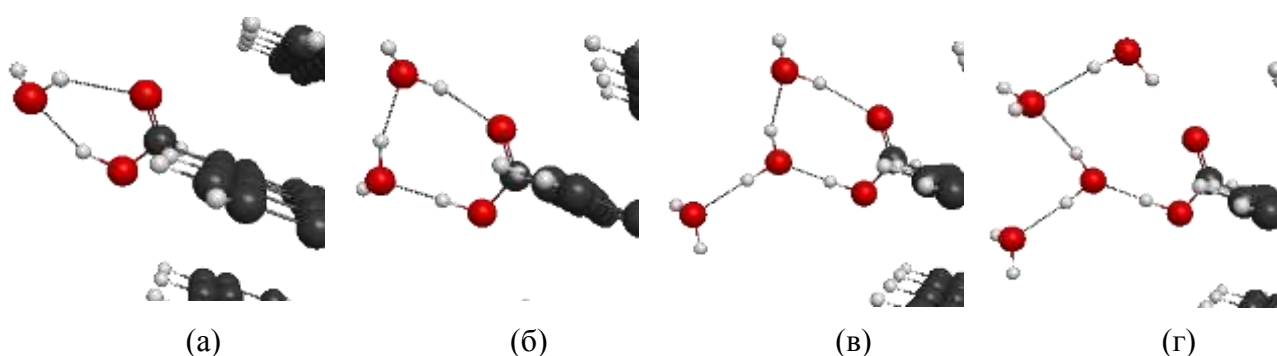


Рисунок 1. Структуры сольватных оболочек с разным количеством молекул воды: (а) – 1 молекула; (б) – 2 молекулы; (в) – 3 молекулы; (г) – 4 молекулы.

Рассчитаны значения жесткости молекулы. Результаты представлены на графике (рис. 2).

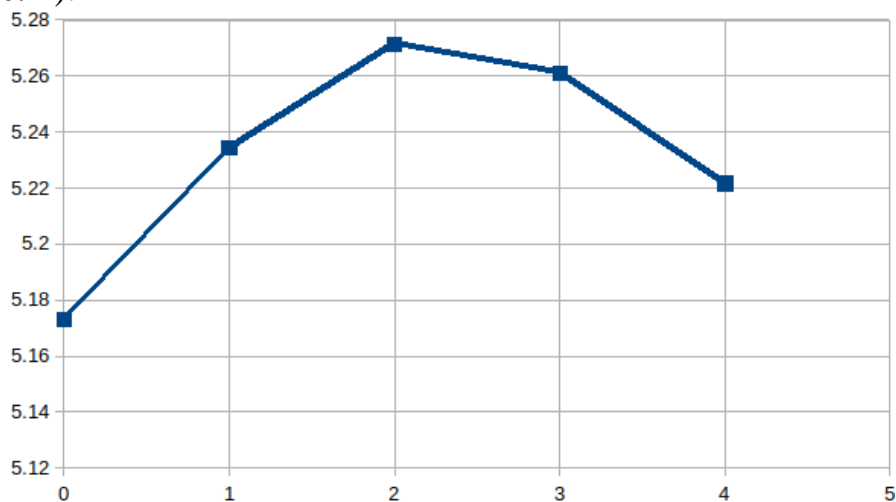


Рисунок 2. Значения жесткости молекулы графита в зависимости от количества молекул воды.

Рассчитаны значения индекса электрофильности, результаты представлены на график (рис. 3).

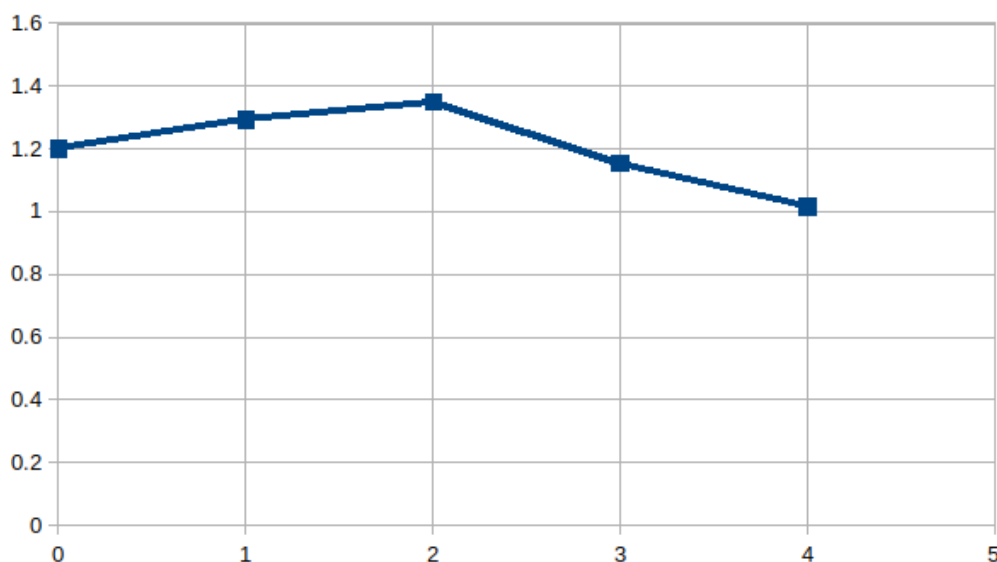


Рисунок 3. Значения индекса электрофильности графита в зависимости от числа молекул воды.

Найдены значения энергии молекулы окисленного графита и построен график зависимости выделяющейся энергии при присоединении каждой новой молекулы воды от количества молекул воды в сольватной оболочке. Данные представлены на рис. 4.

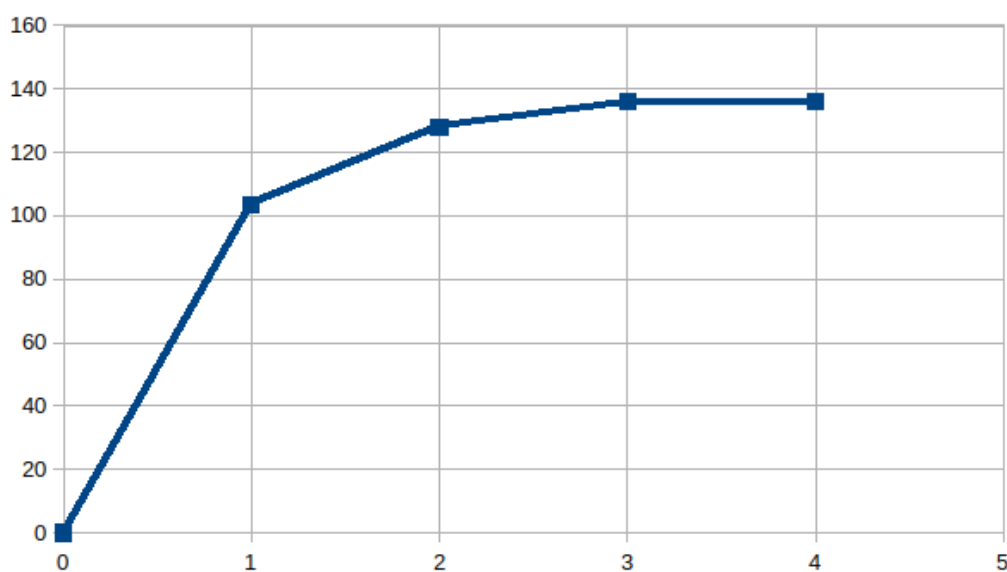


Рисунок 4. Значения энергии в зависимости от числа молекул воды в сольватной оболочке.

Выводы:

На основании полученных данных можно судить о том, что первая сольватная оболочка молекулы окисленного графита состоит из двух молекул воды. Далее оболочка может увеличиваться до трех и четырех молекул.

С увеличением количества молекул воды в сольватной оболочке общий индекс электрофильности уменьшается, наблюдается пик при двух молекулах воды в сольватной оболочке. Графит становится более электрофильным за счет влияния полярного растворителя, смещающего электронную плотность в молекуле. Значение индекса электрофильности графита без сольватной

оболочки 1,875. Снижение индекса электрофильности значительно, растворитель оказывает влияние на электрофильность графита.

Жесткость молекулы достигает своего пика при сольватной оболочке, состоящей из двух молекул воды, затем постепенно снижается. Значения жесткости более 5 эВ позволяют судить о том, что молекула жесткая. Жесткость молекулы графита без сольватной оболочки составляет 5,22 эВ. Снижение жесткости графита при добавлении растворителя несущественно.

Список используемых источников

1. Adamo, C. Toward reliable density functional methods without adjustable parameters: The PBE0 model / C. Adamo, V. Barone // *J. Chem. Phys.* – 1999. – Vol. 110, № 13. – P. 6158–6171.

2. Koopmans, T.A. Über die Zuordnung von Wellenfunktionen und Eigenwerten zu den Einzelnen Elektronen Eines Atoms // *Physica.* – 1934. – Vol. 1, № 1–6. – P. 104–113.

3. Parr, R.J. Electrophilicity index / R.J. Parr, L. v. Szentpaly, S. Liu // *J. Am. Chem. Soc.* – 1999. – Vol. 121, № 9. – P. 1922–1924.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО БИТУМА ДОРОЖНОГО СПЕЦИАЛЬНОГО, МОДИФИЦИРОВАННОГО ГИБРИДНЫМ УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ*

*Евлахин Д.А., Таров Д.В., Слепов Д.С., Столяров Р.А.,
Ягубов В.С., Зеленин А.Д., Ананьев А.В.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
evlahin.daniil2002@yandex.ru*

Асфальтобетон, будучи пористым композиционным материалом, подвержен воздействию множества механизмов деформации и разрушения целостности покрытия, связанному с высокой транспортной нагрузкой, перепадами температуры, воздействием агрессивных сред, водонасыщением и многократными циклами замораживания-оттаивания, приводящими к снижению сцепления каменных материалов с битумным вяжущим. При этом, качество и срок службы асфальтобетона во многом определяется силами адгезии и смачивания битумным вяжущим шероховатых поверхностей инертных материалов, которые могут быть оптимизированы за счет применения: оптимально подобранных составов и соотношения компонентов битумной смеси; полимерных добавок, улучшающих, наряду с адгезионными, и когезионные эксплуатационные; применения поверхностно-активных веществ; наноструктурной модификации битумных вяжущих посредством добавления углеродных наноматериалов. Последний из приведенных способов является наиболее перспективным, поскольку применение углеродных наноматериалов в качестве модификатора битумного вяжущего повышает не только его служебные характеристики [1], но и придает ему важное функциональное свойство, а именно восприимчивость к СВЧ излучению [2-4], что открывает возможность к «самовосстановлению» и «самозалечиванию» дорожных покрытий.

Однако, на сегодняшний день не существует технических решений, а именно, аппаратов для получения дорожного битума, модифицированного углеродными наноматериалами. Имеющиеся современные технические решения в основном адаптированы для использования макро- и микроразмерных модификаторов и наполнителей [5,6].

Поэтому, цель настоящей работы заключалась в разработке и проектировании аппарата для получения битума дорожного специального, модифицированного углеродными наноматериалами.

В рамках научно-исследовательской работы спроектирован аппарат с мешалкой и рубашкой (рис.1) для получения битума дорожного специального, модифицированного гибридным наполнителем.

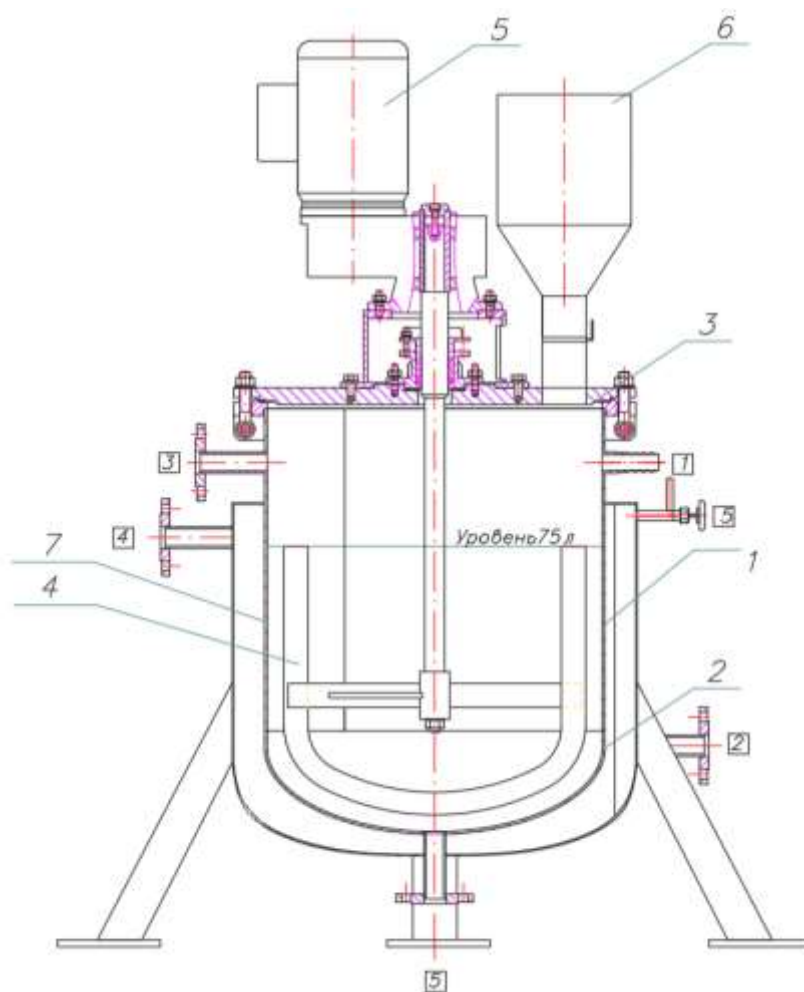


Рисунок 1. Аппарат с мешалкой и рубашкой для получения дорожного битума с гибридным наполнителем.

Аппарат вместимостью $0,1 \text{ м}^3$ представляет из себя цилиндрическую обечайку 1 (рис.1), оснащенную эллиптическим днищем 2 и отъемной плоской крышкой 3. Внутри аппарата расположена рамная мешалка 4, которая приводится в движение с помощью мотор-редуктора 5 мощностью $0,75 \text{ кВт}$ и частотой вращения 49 об/мин . Также аппарат оснащен бункером для битума 6 и рубашкой 7, предназначенной для нагрева битумной смеси модифицированной гибридным наполнителем.

Работа аппарата происходит следующим образом. Через штуцер 1 в аппарат загружается дизельное топливо, которое подогревается до $110 \text{ }^\circ\text{C}$ с помощью рубашки 7. В качестве теплоносителя используется вода, поступающая из водяного теплогенератора высокого давления в штуцер 2. Одновременно запускается мешалка 4. Затем в разогретое дизельное топливо из бункера 6 порционно подается битум. Далее происходит процесс получения со расплава со раствора битума в дизельном топливе. В полученный расплав через штуцер 3 поступает предварительно подверженная ультразвуковой обработке дисперсия гибридного наполнителя в дизельном топливе. Композиция перемешивается в течение 1 ч . Готовый битум, наномодифицированный гибридным наполнителем, из штуцера 5 перекачивается в емкость хранения. Производительность спроектированного аппарата составляет 15 кг/ч .

Результатом научно-технической является спроектированный аппарат для получения битума дорожного специального, модифицированного углеродными наноматериалами, что соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Тамбовской области, а именно «Индустрия наносистем», и критической технологии «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» (постановление администрации области от 29.12.2012 №1704) и способствует развитию качества и эффективности дорожно-строительных и ремонтных работ за счет предложения рынку востребованных высококачественных материалов и технологий дорожного строительства и ремонта, базирующихся на применении последних достижений в области нанотехнологий и углеродных наноматериалов.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Управления образования и науки Тамбовской области и координационного совета по вопросам высшего образования и науки в рамках научного проекта № МУ2022-02/18 «Грант для поддержки прикладных исследований молодых ученых 2021 года».*

Список используемых источников

1. Кумков, Н.Р. Модификация битума различными микро- и нанодисперсными наполнителями для обеспечения эффективного поглощения свч электромагнитного излучения / Н.Р. Кумков, И.Н. Бурмистров, С.В. Арзамасцев, Д.В. Кузнецов, И.А. Ильиных, С.Л. Мамулат // В сборнике: Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология. Доклады VIII Международной конференции. Саратов, 2019. С. 137–139.
2. Gulisano, F. Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps / F. Gulisano, Gallego J. // Constr. Build. Mater., V. 278. 2021, P. 121993, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121993>.
3. Gulisano F., Crucho J., Gallego J., Picado-Santos L. Microwave Healing Performance of Asphalt Mixture Containing Electric Arc Furnace (EAF) Slag and Graphene Nanoplatelets (GNPs) / Appl. Sci., V. 10. 2020, <https://doi.org/10.3390/app10041428>.
4. Мамулат, С.Л. О подходах к модификации битумных вяжущих / С.Л. Мамулат, Ю.С. Мамулат, И.А. Бурмистров // Мир дорог. 2019. № 117. С. 41-46.
5. Патент 2745689 Российская Федерация, МПК⁵¹ B01F 3/14 (2006.01) C10C 3/00 (2006.01) C08L 95/00 (2006.01). Установка для производства полимерно-битумных вяжущих / Азизов Р.Р.; заявитель и патентообладатель Звонарева Е.Ю. – № 2020114674; заявл. 24.04.2020; опубл. : 30.03.2021, Бюл. № 10. – 10 с.: ил.
6. Патент 2780313 Российская Федерация, МПК⁵¹ E01C 19/02 (2006.01). Установка для модификации битума с мешалками / Золотов Е.М. – № 2022107931; заявл., 25.03.2022; опубл.: : 21.09.2022, Бюл. № 27. – 16 с.: ил.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

Земцова Н.В., Щегольков А.В.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
natasha_paramonova_68@mail.ru, energynano@yandex.ru*

Развитие робототехнических комплексов основано на технологиях новых материалов и в частности материалов для электропривода. Для электроприводов могут быть использованы - электроактивные полимеры [1, 2], которые обладают свойствами преобразования электрической энергии в механическую.

В работе [3] предлагается использовать конструкцию привода с минимальной энергией - основанный на сдвиговой деформации.

Низкая диэлектрическая проницаемость исполнительных механизмов на основе эластомеров (силикона) приводит к их эксплуатации при очень высоком напряжении (до нескольких кВ), поэтому существует риск электрического пробоя и разрыва в процессе механической деформации. Для решения этого вопроса в работе [4] используется инкапсулированный полидиметилсилоксан (PDMS) и частицы сажи (PCB), которые заполняются силиконом с высоким содержанием винилсилана (VRS) для получения гибридной пленки PCB/VRS с улучшенными механическими и изоляционными свойствами [4].

Следует отметить, что температура оказывает влияние на электровязкоупругий отклик эластомера под электрическим напряжением. Увеличение чувствительности эластомера характерно для режима от 50 °С до 110 °С. Модифицирование эластомеров многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) может оказать существенное влияние на повышение мощности полимерных датчиков и приводов, а также на увеличение показателей электропроводности и теплопроводности.

В методической основе исследований электроактивных эластомеров модифицированных МУНТ должны быть подходы на комплексном изучении электро- и теплофизических, электрореологических свойств, а также влияние концентрации МУНТ, температуры и напряженности электрического поля.

Изготовление образцов функционального материала на основе эластомеров, модифицированных МУНТ:

Эластомерная матрица определяет целый ряд знаковых электрофизических свойств образцов наномодифицированных эластомеров.

Для исследования эластомерных матриц используются, такие марки силиконов, как (PolyPlast и Силагерм 8040, 8030, 8020) и МУНТ (полученные на основе CVD метода и синтеза при воздействии СВЧ на катализатор). Подбор и оценка матриц эластомера позволяет улучшить такие свойства

электроактивных материалов, как: гибкость, равномерность распределения проводящих дисперсных наполнителей и термоустойчивость.

Для равномерного распределения модификаторов в матрице эластомеров используется метод ультразвукового и механического перемешивания. Применение МУНТ позволяет создать наноструктурированный эластомер, который при приложенном электрическом напряжении обеспечивает устойчивые тепловыделения с постоянной температурой.

Методика экспериментальных исследований

Оборудование и приборы для исследования электрофизических параметров наномодифицированных эластомеров представлены на рисунке 1.

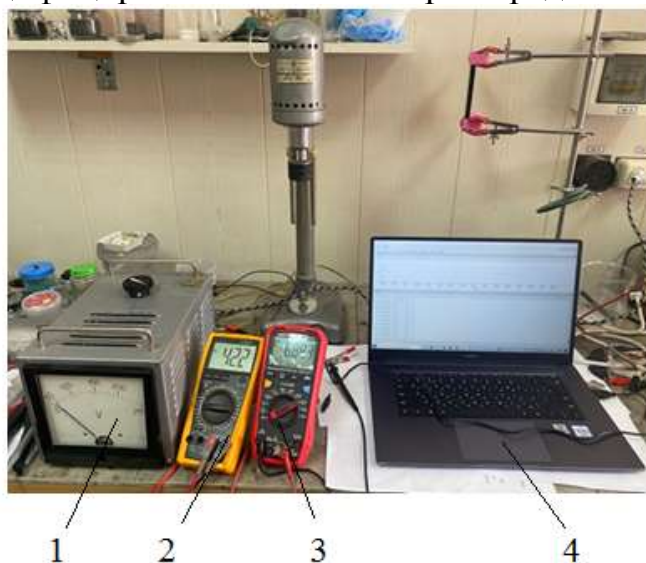


Рисунок 1. Приборы, оборудование и персональный компьютер (ноутбук):
1 – ЛАТР; 2 – Мультиметр VC9808+; 3 – Мультиметр UNI-TUT61E+;
4 – Ноутбук HUAWEI MateBook D15 (256GB)

В качестве источника питания используется ЛАТР, который позволяет проводить исследования при мощности образцов эластомеров до 1 кВт и возможностью регулирования напряжения от 2 до 240 В. Для выпрямления переменного напряжения используется диодный мост. Для увеличения напряжения используется схема на основе конденсаторов и диодов, что позволяет повышать напряжение до 3-4 кВ.

Для оценки электрофизических параметров используется мультиметры (UNI-T UT61E+ и UNI-T UT61D+) подключаемые к компьютеру (HUAWEI MateBook D15 (256GB)). Диапазон измерения силы тока для UNI-T UT61E+ при разрешении $0,01\mu\text{A}$ до $220\mu\text{A}$ и погрешности $\pm (0,5\%+10)$.

Для исследования температурного поля на поверхности наномодифицированных эластомеров используется тепловизор (Testo-875-1).

На рисунке 2 представлен интерфейс программного обеспечения для мультиметров UNI-T UT61E+ и UNI-T UT61D+, подключаемых к ноутбуку HUAWEI MateBook D15 (256GB) по USB порту.

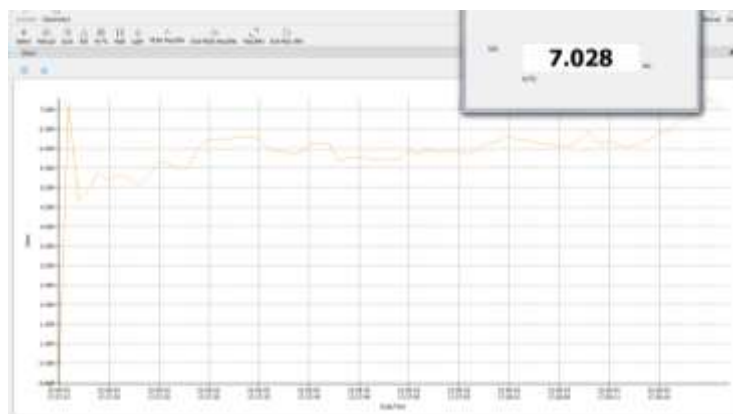


Рисунок 2. Интерфейс программного обеспечения для мультиметров UNI-T UT61E+ и UNI-T UT61D+, подключаемых к ноутбуку HUAWEI MateBook D 15 (256GB).

Разработанная методика позволяет проведение исследований в широком диапазоне, как свойств эластомеров, так и возможных режимов эксплуатации. Представленная концепция получения и применения электроактивных материалов с программируемой деформацией соответствует направлению Индустрии 4.0 и носит инновационный характер. Сочетание в одном материале разнообразных функций (тензометрии и электроактивности) обеспечивает формирование компактных и энергоэффективных устройств, для которых могут быть доступны широкие спектры применения: от сферы промышленных задач до биотехнологий.

Список используемых источников

1. Meng Li. Electroactive anti-oxidant polyurethane elastomers with shape memory property as non-adherent wound dressing to enhance wound healing / Meng Li, Jing Chen, Mengting Shi, Hualei Zhang, Peter X. Ma, Baolin Guo // *Chemical Engineering Journal*, Vol. 375, 2019, 121999, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.121999>.
2. Kunanuruksapong, R. Poly(p-phenylene) and acrylic elastomer blends for electroactive application / R. Kunanuruksapong, A. Sirivat // *Materials Science and Engineering: A*, Volumes 454–455, 2007, P.453-460, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.033>.
3. Wenjie Sun. Dielectric elastomer minimum energy structure with a unidirectional actuation for a soft crawling robot: design, modeling, and kinematic study / Wenjie Sun, Huwei Liang, Fei Zhang, Haitian Wang, Yanjun Lu, Bo Li, Guimin Chen // *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 107837, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107837>.
4. Jianjian Huang. Vinylsilane-rich silicone filled by polydimethylsiloxane encapsulated carbon black particles for dielectric elastomer actuator with enhanced out-of-plane actuations / Jianjian Huang, Fang Wang, Li Ma, Zhiqiang Zhang, Erchao Meng, Chao Zeng, Hao Zhang, Dongjie Guo // *Chemical Engineering Journal*, Vol. 428, 2022, 131354, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131354>.

ГРАНУЛИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ CaSiO_3 И ZnO

Солоненко А.П., Шевченко А.Е.

*Омский государственный медицинский университет, Омск,
anssolonenko@gmail.com*

Биоматериалы из силикатов кальция все чаще рассматриваются как перспективные средства восстановления поврежденных костных тканей. Они способны растворяться и инициировать образование биоапатита *in vivo*. Однако высокий уровень pH, возникающий в месте их введения ввиду быстрой резорбции импланта, губителен для живых клеток. Решение проблемы возможно за счет допирования силикатов кальция цинком с целью формирования в материале цинксодержащей кальций-силикатной фазы с малой растворимостью.

В данной работе по эмульсионной технологии получена серия опытных образцов сферических гранул из синтетических порошков волластонита (β - CaSiO_3) и ZnO (до 25 масс.%), а также 15% раствора желатина, использованного в качестве связующего.

Общий вид гранул представлен на рис. 1. Размеры частиц варьируют в диапазоне от 0.1 до 3 мм, преобладает фракция с диаметром 1 - 2 мм. Методом ИК-Фурье-спектроскопии в составе образцов идентифицированы β - CaSiO_3 (565, 645, 681, 900, 932, 960, 1010, 1062 cm^{-1}) и желатин (1260 - 1400, 1550, 1650 cm^{-1}). На дифрактограммах гранул (рис. 2а) также присутствуют пики, соответствующие фазе ZnO (карточка № 01-070-8070 «ICCD PDF-4+»), их интенсивность возрастает одновременно с увеличением содержания оксида в материалах.

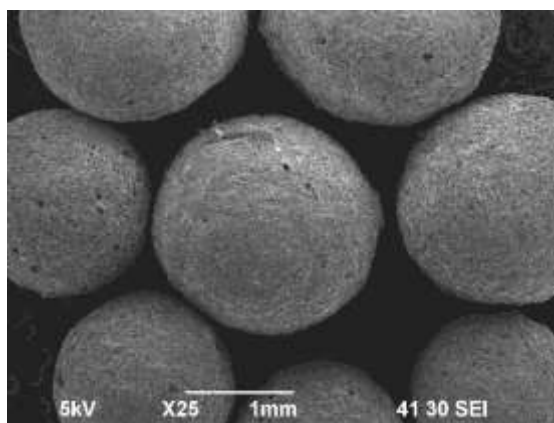


Рисунок 1. Микрофотография образца гранул.

Для полученных образцов гранул выполнен термогравиметрический анализ. Установлено, что потери массы вызваны удалением остаточной влаги (порядка 4 масс.%, 25 - 200 °C) и выгоранием желатина (порядка 17.5 масс.%, 200 - 500 °C). При температурах около 1000 °C начинается взаимодействие β - CaSiO_3 и ZnO с образованием $\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ (хардистонит, ХТ). Далее при $t \approx 1200$ °C волластонит переходит в α -модификацию. Названные фазы

обнаруживаются методами ИК-Фурье-спектроскопии и РФА (рис. 2б) в составе прокаленных при 1250 °С гранул. Расчётное содержание $\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$ в композитах составляет от 0 до 97 масс. %.

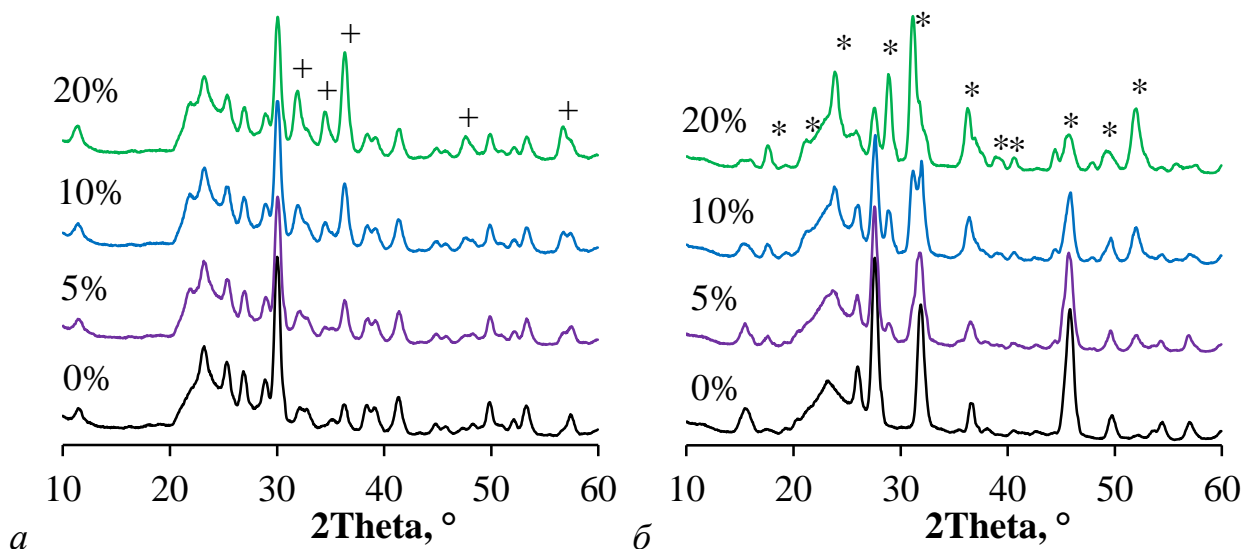


Рисунок 2. Дифрактограммы исходных (а) и прокаленных (б) гранул с варьируемым исходным содержанием ZnO (+ ZnO, * $\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$).

Исходные и прокаленные гранулы имеют пористую структуру (рис. 3). Диаметры пор варьируют от нескольких микрон между керамическими частицами до долей миллиметра во внутреннем объеме частиц.

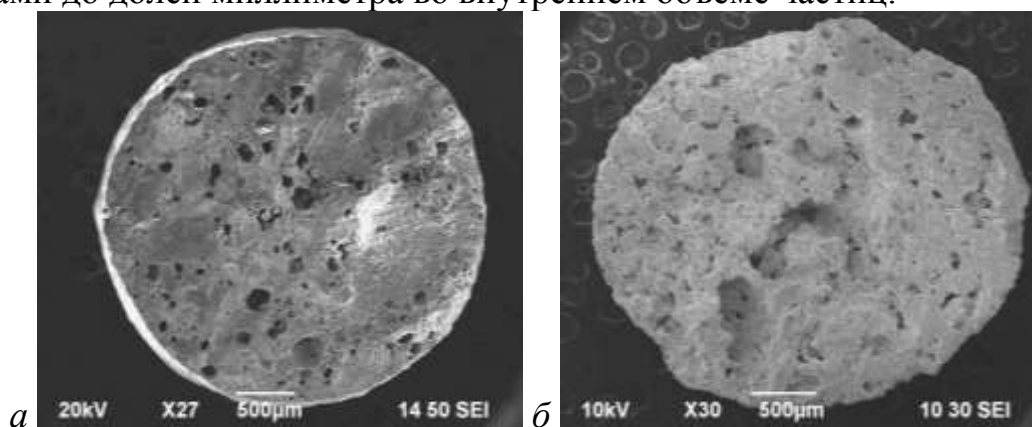


Рисунок 3. Микрофотографии внутренней структуры гранул из $\beta\text{-CaSiO}_3$ с желатином (а) и $\text{CaSiO}_3 - \text{ZnO}$ 25% после прокаливания при 1250 °С (б).

Таким образом, в данной работе получена серия гранулированных материалов, включающих наряду с волластонитом варьируемое количество хардистонита, скорость резорбции которого, согласно литературным данным, ниже чем у CaSiO_3 .

Полученные материалы могут быть в перспективе применены в медицине для восстановления поврежденных участков костных тканей.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПЬЕЗОДВИЖИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА СВИНЦА ДЛЯ АДАПТИВНОГО МИКРОЗЕРКАЛА

Шестерикова Д.А., Шестериков А.Е.

*Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники, Томск, darya.mokhina@mail.ru.*

В работе представлены результаты исследований, направленные на разработку пьезодвижателя на основе тонкопленочного пьезоматериала. Пьезодвижатель является исполнительным механизмом в конструкции адаптивного зеркала. Предложенная в данной работе идея требует формирования три пьезодвижателя для одного пикселя зеркала. Пьезодвижатели будут сформированы по тонкопленочной технологии, что позволит реализовывать на одной подложке множество рабочих элементов пьезодвижателя.

Адаптивные зеркала применяются для исследования космоса, в системах оптической связи, где необходимо коррекция волнового фронта, в лазерной технологии, в автомобильной промышленности, в астрономии, в спектроскопии, в фотолитографии. Один из основных недостатков уже существующих микрозеркал является наличие свободного воздушного промежутка между отдельными элементами. Такие промежутки искажают волновой фронт, снижают точность коррекции [1].

Пьезоэлектричество в материалах можно объяснить асимметричным центром кристаллической структуры или молекулярной цепи, который индуцирует спонтанную поляризацию или поляризацию под действием приложенной силы. В целом пьезоэлектрические материалы можно разделить на три группы: пьезокерамика, монокристаллы и полимеры [2].

Основными параметрами при выборе пьезоэлектрических материалов являются:

- коэффициент электромеханической связи (d);
- относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r);
- коэффициент Пуассона (k_p);
- добротность (Q_m);
- температура Кюри (T_c);
- тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$).

При выборе материала пьезоэлектрика при проектировании MEMS устройств необходимо учитывать возможность группового изготовления массива одинаковых элементов в едином технологическом цикле. Это накладывает ограничение на технологию получения пьезоэлектрического материала. Оптимальным методом является использование метода высокочастотного магнетронного распыления. По этим причинам при

дальнейшим построении моделей актюаторов в качестве материала будет использоваться титанат свинца (PbTiO_3).

Описание конструкции пьезодвижителя. На рисунке 1 представлена геометрия пикселя адаптивного микрзеркала, состоящего из трех пьезодвижителей. Каждый пьезодвижитель представляет под собой структуру, состоящую из двух электродов (Pt) и пьезоэлектрика. В качестве подложки выступает Si, на поверхность которого нанесен тонкий слой платины, который является нижним электродом для пьезодвижителей 1 и 2. Для третьего пьезодвижителя один из электродов расположен в его боковой части. Перед нанесением верхнего электрода (Pt) для всех пьезодвижителей необходимо заполнить пространство между ними изоляционным материалом.

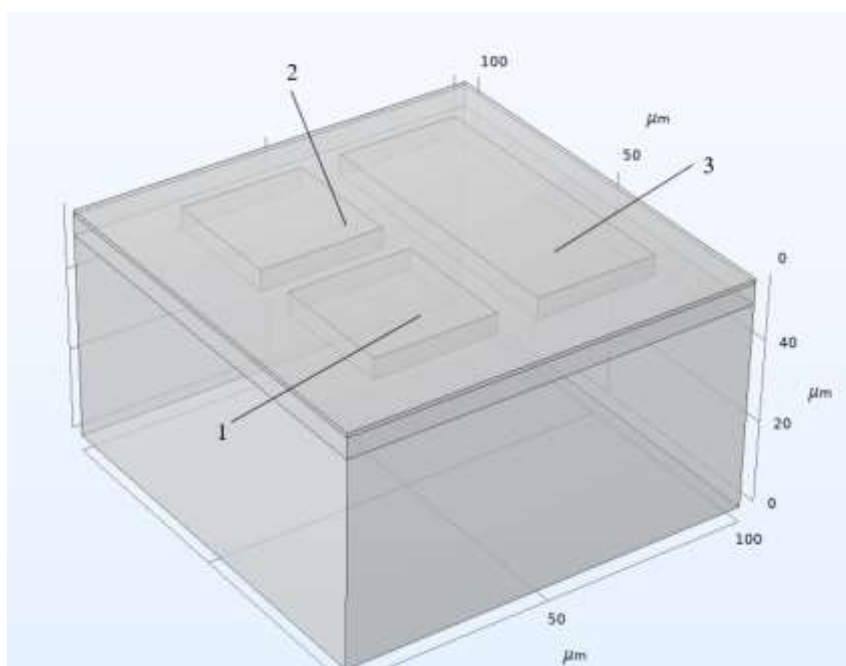
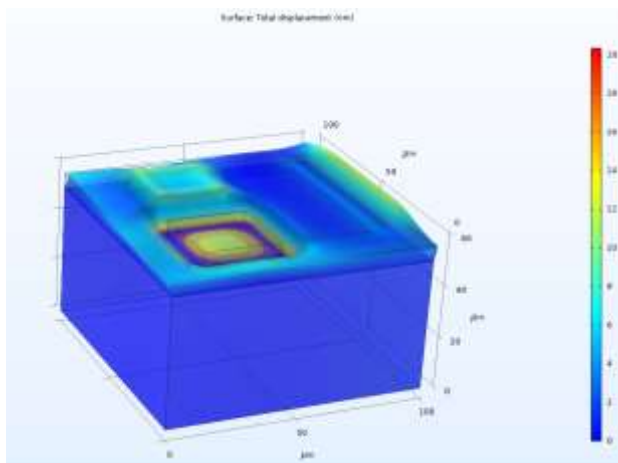
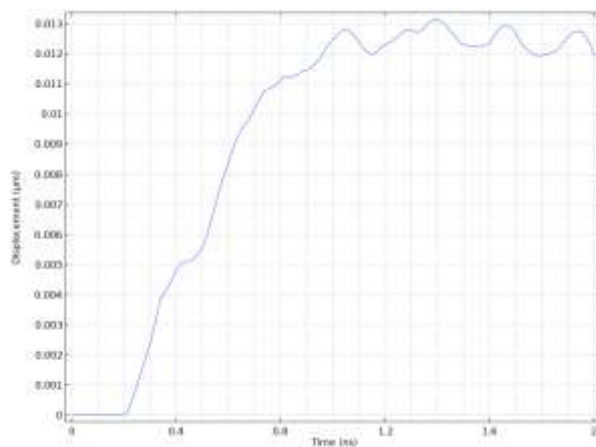


Рисунок 1. Геометрия пикселя адаптивного микрзеркала: 1, 2, 3 – пьезодвижители.

Электрическая разводка электродов для пьезоэлементов должна позволять подавать на каждый из них различное напряжение. На рисунке 2а представлены результаты моделирования при подаче на электроды напряжения: 100 В (1 электрод); -50 В (2 электрод); 20 В (3 электрод). Также было оценено время деформации пьезодвижителя (рисунок 2б). Исходя из полученных данных время максимальной деформации пьезоэлемента составляет $t_{def} = 1$ нс.



а)



б)

Рисунок 2. Результаты моделирования.

Как видно из рисунка 2а, первый пьезодвижитель деформировался (сжался) на 14 нм, а второй при подаче обратного напряжения растянулся вверх на 12 нм. Третий пьезодвижитель деформировался в боковом направлении на 10 нм. Таким образом, данная конструкция пикселя, состоящая из трех пьезодвижителей, обладает тремя степенями свободы и позволяет производить коррекцию волнового фронта отраженного света.

Список используемых источников

1. Ziyun Zhuang. Application of Digital Micromirror Devices (DMD) in Biomedical Instruments/ Ziyun Zhuang, Ho Pui Ho/ Journal of Innovative Optical Health Sciences. 2020. – 27 p.
2. Xiangyu Gao. Piezoelectric Actuators and Motors: Materials, Designs, and Applications: Review / Xiangyu Gao, Jikun Yang, Jingen Wu, Xudong Xin, Zhanmiao Li, Xiaoting Yuan, Xinyi Shen, and Shuxiang Dong // Advanced Materials Technologies. 2019. Vol. 5(1). P. 1 – 26.

УДАЛЕНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ НАНОКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ХИТОЗАНОМ*

*Яркин О.В., Мкртчян Э.С., Ананьева О.А., Бураков А.Е.,
Буракова И.В., Кузнецова Т.С., Ткачев А.Г.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
sttstu90@gmail.com*

Тяжелые металлы считаются одним из наиболее токсичных элементов и основным источником загрязнения воды и окружающей среды [1]. Свинец – один из наиболее распространенных ионов тяжелых металлов, который оказывает влияние на кроветворение, нервную систему, почки и репродуктивную, сердечно-сосудистую, эндокринную систему и т.п. [2-4]. К числу эффективных методов очистки водных сред от ионов металлов относятся инновационные технологии с применением наноматериалов. Малый размер наночастиц (10-100 нм) упрощает их проникновение через почвенные и водоносные слои непосредственно к загрязнителям. Высокая реактивность и возможность свободной доставки наночастиц прямо к источнику загрязнения, в свою очередь, позволяют ускорить разложение загрязнителей, сократить время очистки по сравнению с традиционными технологиями [3]. Наноматериалы на основе оксида графена и их композиты рассматриваются как перспективные адсорбенты для удаления вредных загрязнителей из водных сред благодаря своим отличительным физико-химическим свойствам, таким как химическая стабильность, огромная площадь поверхности, высокая адсорбционная способность и возможность вторичной переработки [5-7]. Широко используются при очистке воды/сточных вод модифицированные формы оксида графена, такие как: амино-модифицированные [5], восстановленный оксид графена [6] и другие. Таким образом, задача очистки воды от ионов свинца с помощью наноматериалов является актуальной и обоснованной.

В работе был синтезирован нанокompозитный сорбент на основе оксида графена и хитозана (ОГ/Х), предназначенный для очистки водных сред. Для получения данного сорбента требуются следующие исходные реагенты: суспензия ОГ 1%, доведенная до pH=10; раствор хитозана 1%, полученный путем добавления хитозана в 2,5% раствор уксусной кислоты. Получение нанокompозита заключалось в следующем: в исходную суспензию ОГ добавляется раствор хитозана в заданном соотношении (100:1), и данная смесь перемешивается в течении 15 минут. Для образования гидрогеля полученная смесь подвергается нагреву при 90°C в течении 24 часов. Далее гидрогель промывается дистиллированной водой до нейтрального pH для удаления уксусной кислоты. Завершающей стадией является загрузка полученного гидрогеля ОГ/Х в лиофильную сушку на 48 часов, что способствует

образованию пористого каркаса вследствие сублимации растворителя.

Адсорбционная емкость нанокompозита ОГ/Х оценивалась на примере извлечения ионов свинца Pb (II). Для этого готовился модельный раствор с начальной концентрацией Pb (II) 100 мг/л. В 30 мл данного раствора добавляется навеска нанокompозита равная 0,01г. Пробирки с исследуемым раствором и навеской погружаются в программируемый мультитротатор Multi Bio RS-24 (Biosan, Рига, Латвия) и непрерывно перемешиваются с частотой 100 об/мин при комнатной температуре в течение $t = 2, 5, 10, 15, 30, 60$ мин. Далее раствор фильтруется с использованием фильтровальной бумаги (белая лента (8-12 мкм)) и измеряется конечная концентрация ионов свинца с использованием метода атомно-адсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (спектрометр МГА-915МД, Атомприбор, Санкт-Петербург, Россия). На рис. 1 приведена кинетическая зависимость адсорбции ионов свинца Pb (II) нанокompозитом ОГ/Х.

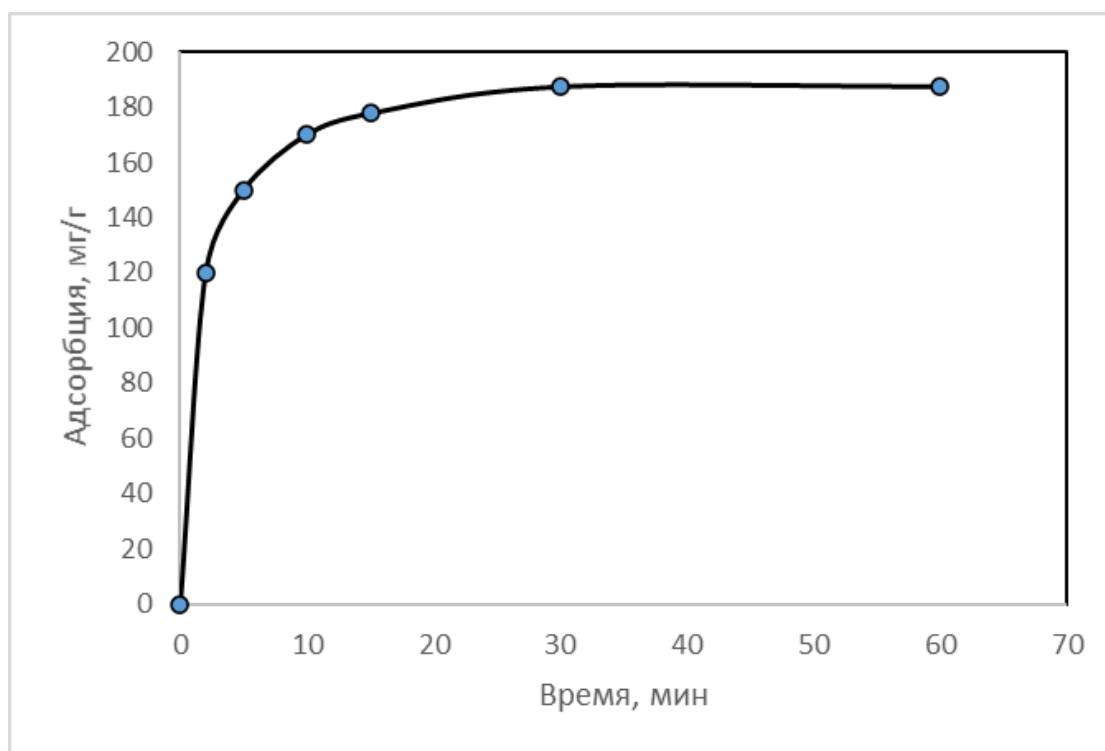


Рисунок 1. Кинетика адсорбции ионов Pb (II) нанокompозитом ОГ/Х.

В результате проведенных исследований установлено, что на начальном этапе происходит резкий рост адсорбционной емкости нанокompозита ОГ/Х. В первые 15 минут происходит поглощение ~ 90% загрязнителя. Из рис. 1 видно, что эффективное время контакта составляет 25 минут, так как далее адсорбционная емкость практически не меняет своего значения. Таким образом, сорбционная емкость данного нанокompозита по извлечению ионов свинца Pb (II) составила 187,38 мг/г.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20074, <https://rscf.ru/project/22-13-20074>.*

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Amina, A. Mesoporous nanomaterials based on manganese with different interlayer alkali cations: An efficient approach for the removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous medium. / A. Amina et al. // *Journal of Water Process Engineering*, 2018. - V. 40. - P. 101944. doi: 10.1016/j.jwpe.2021.101944.
2. Yohannes, T.E. Exposure and health risk assessment from consumption of Pb contaminated water in Addis Ababa, Ethiopia, Heliyon / T.E. Yohannes et al. // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019. - V. 7. - №. 9. - e07946. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07946.
3. Конюхов, Ю.В. Применение нанопорошков железа для очистки сточных вод от ионов свинца, меди и цинка / Ю.В. Конюхов // *Сталь*. – 2018. – № 2. – С. 62-68. – EDN YQLSDV.
4. Virág, K. Water pollution by Cu and Pb can adversely affect mallard embryonic development / Virág, K. et al. // *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006. - V. 65. - №. 1. - P. 67-73. doi: 10.1016/j.ecoenv.2005.05.016.
5. Arenas-Blanco, B.A. Study of the water-oil interfacial activity of amino-modified graphene oxide / B.A. Arenas-Blanco et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022. - V. 647. - P. 129034. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.129034.
6. Adel, M. Removal of heavy metals and dyes from wastewater using graphene oxide-based nanomaterials: A critical review / M. Adel et al. // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2022. - V. 18. - P. 100719. doi: 10.1016/j.enmm.2022.100719.
7. Keshav, K.S. A study on nanomaterials for water purification / K.S. Keshav et al. // *Materials Today: Proceedings*, 2022. - V. 51. - №. 1 - P. 1157-1163. doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.116.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, МОДИФИРОВАННЫЕ МУНТ, ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ 3D ПРИНТЕРОВ

Аль-баирмани Али Таур Рахим, Земцова Н.В., Щегольков А.В.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
ali.eng9295@gmail.com, natasha_paramonova_68@mail.ru,
energynano@yandex.ru*

Новые технологические процессы в строительной сфере реализуются с использованием 3D принтеров, которые позволяют проводить различные технологические операции на взаимосвязанных стадиях строительства [1, 2]. Эффективность строительных 3D принтеров основана на оптимизации параметров печати, что позволяет успешно получить строительный объект за наименьшее количество времени и при минимальных затратах на материалы.

Для рабочих режимов 3D принтеров выбираются такие параметры, как размеры слоя и скорость печати, максимально достижимая высота, прогнозируемая в зависимости от прочности материала. На рисунке 1 показаны возможные строительные конструкции, получаемые с помощью строительных 3D принтеров [2].

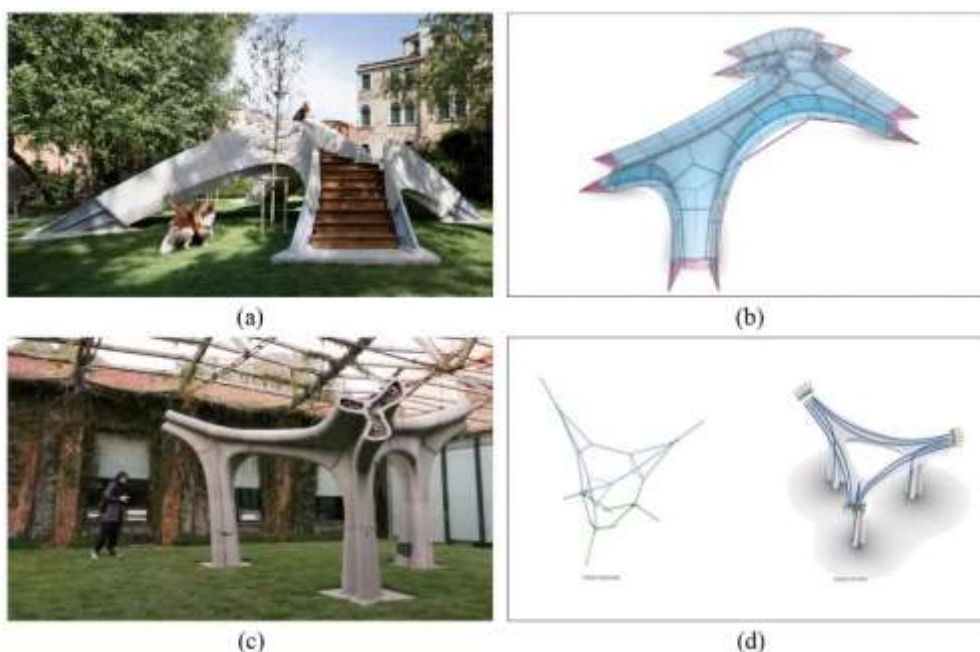


Рисунок 1. Строительные конструкции: а – проект Striatius (Block Research Group et al. Striatius-3D Concrete Printed Masonry Bridge, Venice, Italy. 2021. – 2021); б – натяжные стяжки (розовые) для укрепления моста (Block Research Group et al. Striatius-3D Concrete Printed Masonry Bridge, Venice, Italy. 2021. – 2021.); в – проект Intelligent Force Printing ([миг DigitalFUTURES, 2021 г.](#)); д – силовая диаграмма и система арматуры конструкции ([DigitalFUTURES world, 2021](#)) [2].

Как показано на рисунке 2 (а), слой бетона выдавливался круглым соплом с внутренним диаметром d_i во время 3D печати. Бетонное волокно формируется через отверстие с сечением d_i . После того, как слой сформируется на печатной платформе, проводится растяжение слоя в горизонтальном направлении, так что ширина слоя увеличивается с d_i до большей ширины (w_f).

Основываясь на конструкции компонентов арки в 3D модели, траектория движения сопла 3D принтера предварительно задана в предположении, что бетонный слой выдавливается по такой траектории, где имеется расчетная ширина слоя ($w_{f,d}$), как показано на рисунке 2 (b) (схематическая диаграмма, показывающая вид сверху для экструзии бетона) [3].

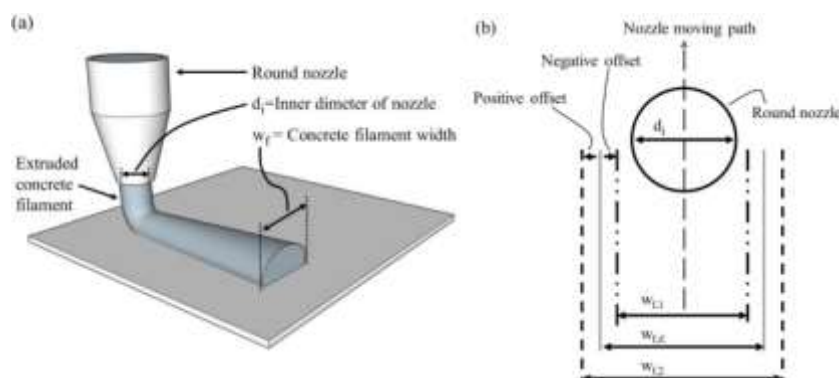


Рисунок 2. Схематическая диаграмма.

Материалы для 3D печати строительных конструкций

Цементные композиты, содержащие проводящие функциональные наполнители, могут обеспечить непрерывный мониторинг повреждений и трещин с помощью пьезорезистивных характеристик, определяемых как изменение удельного электрического сопротивления при внешней деформации. Цементные композиты с проводящими добавками обладают пьезорезистивными характеристиками, а также информационной линейностью, воспроизводимостью и чувствительностью. Особое значение имеет способность цементных композитов диагностировать структурные повреждения при изгибе в железобетонных балках с обратной связью по нагрузке [4].

Оптимальная механическая прочность на сжатие 74,9 МПа и прочность на изгиб 16,4 МПа могут быть достигнуты с помощью 3D-печатного композита с гибридным наполнителем CF при массовой концентрации 0,7 мас.% и ACP при 0,25 мас.%. Оптимизированный по проводящим добавкам (CF и ACP) 3D-печатный композит обладает чувствительным пьезорезистивным откликом с улучшенной линейностью, повторяемостью и качеством сигнала, когда направление нагрузки перпендикулярно направлению печати [5].

На микроструктурном уровне в 3D-печатном композите может происходить выравнивание волокон и их улучшенное сцепление с матрицей композитов, напечатанных на 3D принтере [5].

Улучшение пьезорезистивных свойств материалов для строительной 3D печати может быть достигнуто за счет применения различных типов

углеродных наноструктур, в частности, многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ). Использование МУНТ может обеспечить формирование свойств объемного электронагрева, что позволит ускорять и контролировать процессы набора прочности строительных 3D композитов [6].

3D печать строительных композитов, связанная с концепцией получения и применения строительных материалов нового поколения с контролируемыми параметрами набора прочности и самодиагностикой рабочих режимов под нагрузкой, соответствует направлению Индустрии 4.0 и носит инновационный характер, который соотносится с цифровыми технологиями (IoT). Сочетание в одном композите разнообразных функций (тензометрии и электронагрева) обеспечивает формирование эффективных композитов с различным сочетанием материалов, для которых могут быть доступны широкие спектры применения, начиная от сферы задач в секторе бытового строительства и заканчивая сложными инженерными конструкциями.

Список используемых источников

1. Kruger, J. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse / J. Kruger, S. Cho, S. Zeranka, C. Viljoen, G. van Zijl // *Composites Part B: Engineering*, 2020, v. 183, pp. 107660. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107660.

2. Huang, S. The impacts of fabrication systems on 3D concrete printing building forms. *Frontiers of Architectural Research* / S. Huang, W. Xu, Y. Li // 2022, v. 11, pp. 653-669. DOI: 10.1016/j.foar.2022.03.004.

3. Lin, A. Compressive load-dominated concrete structures for customized 3D-printing fabrication / A. Lin, A. Goel, D.H.A. Wong, C. Yeo, J. Chung, S.D. Pang, C.-H. Wang, H. Taylor, H.W. Kua // *Automation in Construction*, 2022, v. 141, pp. 104467. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104467.

4. Wang, L. Structural performance of reinforced concrete beams with 3D printed cement-based sensor embedded and self-sensing cementitious composites / L. Wang, F. Aslani // *Engineering Structures*, 2023, v. 275, P. A, pp. 115266. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115266.

5. Wang, L. Development of 3D printable self-sensing cementitious composites / L. Wang, F. Aslani, A. Mukherjee // *Construction and Building Materials*, 2022, v. 337, pp. 127601. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127601.

6. Shchegolkov, A.V. The Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Heat-Release Properties of Elastic Nanocomposites / A.V. Shchegolkov, M. Nachtane, Y.M. Stanishevskiy, E.P. Dodina, D.T. Rejepov, A.A. Vetcher // *J. Compos. Sci.*, 2022, v. 6, pp. 333. DOI: 10.3390/jcs6110333.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АКТИВАЦИИ

Баклыкова М.А., Старунская В.И., Попова А.А., Шубин И.Н.

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Углеродные материалы, обладающие высокой удельной поверхностью и большим объемом пор, в настоящее время являются востребованными в различных областях промышленности – химической, нефтегазовой, радиоэлектронной и многих других в качестве веществ для разделения или накопления различных жидких или газовых сред, решения экологических задач и т.д. [1, 2]

Одним из способов получения углеродных материалов с такими характеристиками является процесс высокотемпературной активации предварительно термообработанного углеродного сырья – карбонизата совместно с активатором в инертной среде. В качестве активатора могут использоваться водяной пар, щелочи или кислоты. При этом данный процесс достаточно сложный, в ходе его реализации протекают многочисленные химические реакции, обеспечивающие образование высокопористой структуры [3, 4]. Важными режимными параметрами, влияющими на процесс активации, являются температура, соотношения активатора и карбонизата, продолжительность процесса, расход инертного газа, скорость нагрева, а также конструктивные особенности используемого оборудования.

Предварительные исследования проведенные авторами, а также литературные источники позволили определить примерные параметры исследуемого процесса – температура –400–800 °С, продолжительность 2–3 часа, применяемый активатор – щелочь–гидроксид калия или натрия [5, 6].

Для исследования этого процесса с целью определения наиболее рациональных технологических параметров была разработана экспериментальная лабораторная установка (рис. 1). Лабораторную установку можно условно разделить на 3 блока, соответствующих своему назначению при реализации процесса активации:

– Блок расходных материалов – включает емкости, бункеры и баллоны с исходными и расходными материалами, используемыми при проведении высокотемпературной активации;

– Блок контрольно-измерительных приборов – включает дозаторы, расходомеры, термометры и термопары, а также прибор управления нагревом печи;

– Блок активации – состоит из вытяжного шкафа и муфельной печи с установленным в ней реактором высокотемпературной активации.



Рисунок 1. Принципиальная схема лабораторной установки для исследования процесса активации.

Лабораторная установка работала следующим образом: в реактор активации 12 из бункеров 1 и 2 с карбонизатом и активатором соответственно в заданном соотношении загружалась реакционная смесь. Включался нагрев муфельной печи 11, вентиляция вытяжного шкафа 10, а в реактор активации начиналась подача инертного газа из баллона 3. Герметичность внутреннего объема реактора обеспечивалась за счет подачи инертного газа в газовый шлюз, присутствующий в крышке реактора. Расход инертного газа контролировался расходомерами 5 и 6, показатели температуры в муфельной печи прибором управления печью 8, а в реакторе активации – индикатором температуры 9. На некоторых этапах активации в объем реактора была возможна подача воды из емкости с дистиллированной водой 4 в виде водяного пара, расход которой контролировался дозатором дистиллированной воды 7.

Для определения наиболее рациональных режимов проведения высокотемпературной активации проводились исследования характеристик получаемого активированного углеродного материала – его удельная поверхность и пористость. Для этого использовался аналитический комплекс *Nova Quantachrome E1200*. В нашем случае для определения удельной поверхности использовался многоточечный метод *BET*, а для определения пористости – метод *DFT*, которые являются наиболее адекватными моделями для исследуемого материала.

Таким образом, на данном этапе исследований была разработана экспериментальная установка для исследования режимных параметров активации, подобраны исходные материалы и технологические режимы для проведения процесса, определены методы оценки получаемого активированного углеродного материалы, по которым возможна коррекция процесса высокотемпературной активации.

Список используемых источников

1. Мищенко, С.В. Углеродные наноматериалы: производство свойство применение / С.В. Мищенко, А.Г. Ткачев // М.: Машиностроение, 2008.–320с.
2. Пористый углерод / В.Б. Фенелонов // Новосибирск: Институт катализа СО РАН, 1995. – 518 с.
3. Дьячкова, Т.П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок. / Т.П. Дьячкова, А.Г. Ткачев // М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 152 с.
4. Popova, A.A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A.A. Popova, R.E. Aliev, I.N. Shubin // *Advanced Materials and Technologies*. – 2020, № 3 (19). – С. 28-32. DOI: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032.
5. Аппаратурно-технологическое оформление производства активированного углеродного материала / А.А. Попова // *Вестник ТГТУ*. – 2021. – Т.27, №2. – С.318 – 327. DOI: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327.
6. Попова, А.А. Особенности получения высокопористого углеродного материала / А.А. Попова, И.Н. Шубин, М.К. Гусейнов // *Вестник ДГУ. Серия 1. Естественные науки*. – 2021. – Т. 36, № 4. – С. 7 – 12. DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-4-7–12.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ОТ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Котенев С.И., Абоносимов О.А., Лазарев Д.С.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
mig@tstu.ru*

Широкое применение синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), особенно в составе моющих средств, обусловило появление в сточных водах нового вида загрязнений. СПАВ поступают в природные водоемы: с хозяйственно-бытовыми стоками; с промышленными стоками текстильной, нефтяной, химической промышленности; со сточными водами прачечных хозяйств и автомоек; со смывами от сельхозугодий, обработанных химическими реагентами с эмульгаторами (гербициды, инсектициды, фунгициды). Специфические свойства СПАВ вызывают серьезные затруднения при очистке сточных вод химическими и биохимическими методами, следствием чего является увеличение загрязнения воды поверхностных и подземных источников.

Такое положение определило интенсивное развитие серьезных научных исследований по изучению специфических особенностей этого вида загрязнения и изысканию путей его предотвращения.[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 синтетических веществ из сточных вод достигнут при использовании методов мембранного разделения, в частности обратного осмоса, электроультра- и нанофильтрации [2, 4–6]. Для расчета процесса мембранного разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам и характеристикам процесса. Одними из основных параметров, характеризующих эффективность процесса при мембранном разделении, являются выходная удельная производительность и коэффициент задержания мембраны [6].

Цель настоящей работы состояла в исследовании электромембранной очистки технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ.

В данной работе определяли зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока мембран УАМ-100, УПМ-К при электромембранной очистке технологических растворов от синтетических поверхностно-активных веществ. Исследования проводили на лабораторной электромембранной установке по методике, подробно рассмотренной в работе

[5]. 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.

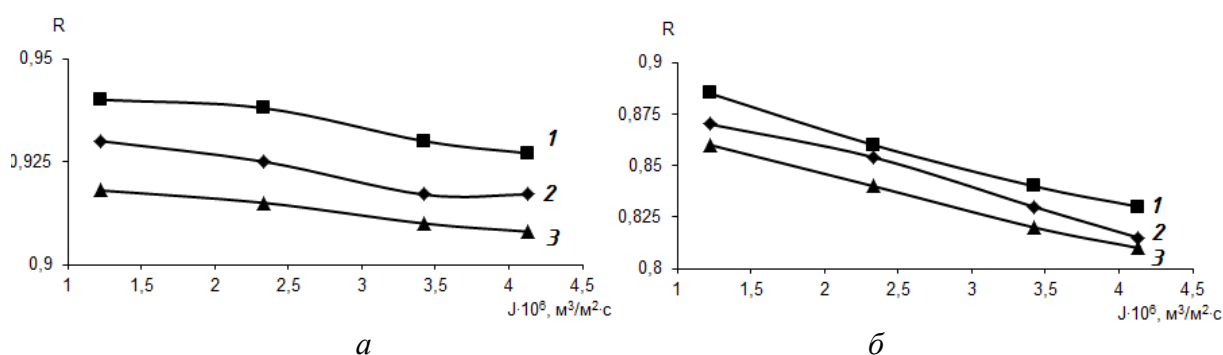


Рисунок 1. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя мембраны УАМ-100 для растворов СПАВ: a – прикатодная мембрана, b – прианодная мембрана, $C_{исх} = 0,04 \text{ кг/м}^3$ (1), $0,08 \text{ кг/м}^3$ (2) и $0,12 \text{ кг/м}^3$ (3)

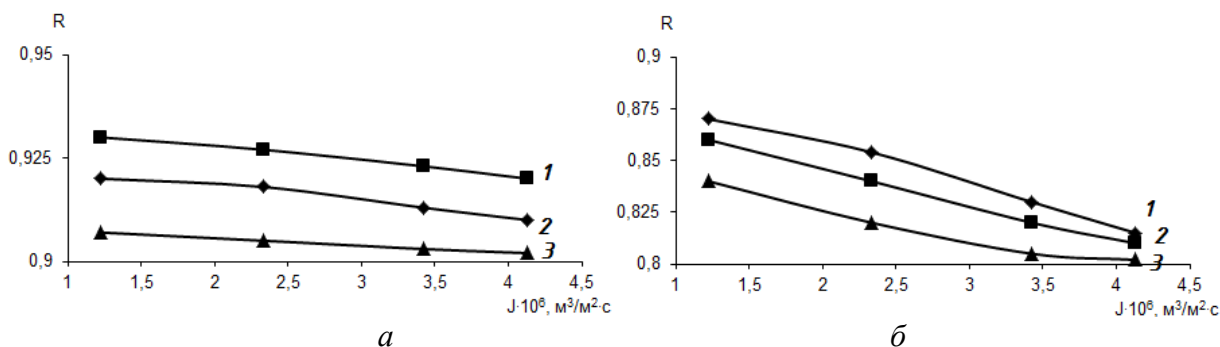


Рисунок 2. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя мембраны УПМ-К для раствора СПАВ: a – прикатодная мембрана, b – прианодная мембрана, $C_{исх} = 0,04 \text{ кг/м}^3$ (1), $0,08 \text{ кг/м}^3$ (2) и $0,12 \text{ кг/м}^3$ (3)

Так же можно заметить, что мембрана УПМ-К обладает большим удельным потоком растворителя и меньшим коэффициентом задержания по сравнению с УАМ-100 (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]:

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_1 \cdot C^n} - 1 \right) [1 - \exp(-J \cdot k_2)] \cdot \exp\left(-\frac{J \cdot k_3}{C^m}\right)}, \quad (1)$$

где k_1, n, k_2, k_3, m – эмпирические коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1. Значения эмпирических коэффициентов для выражения (1).

| Мембрана | k_1 | n | k_2 | k_3 | m |
|------------------------|---------------------|------|-------|-------|------|
| УАМ-100 прикатодная | $5,6 \cdot 10^{-8}$ | 0,30 | 0,10 | 0,75 | 2,32 |
| УАМ-100 прианодная | $8,3 \cdot 10^{-8}$ | 0,10 | 0,11 | 0,82 | 0,02 |
| УПМ-К прикатодная | $3,7 \cdot 10^{-8}$ | 0,27 | 0,95 | 0,70 | 2,14 |
| УПМ-К прианодная | $7,4 \cdot 10^{-8}$ | 0,08 | 0,92 | 0,76 | 0,01 |

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение.

Список используемых источников

1. Волкова, Г.А. Методы очистки сточных вод, содержащих синтетические поверхностно-активные вещества / Г.А. Волкова, Н.Ю. Сторожук // Вестник Брестского государственного технического университета. 2012. №2. С. 38–41.
2. Дорофеева, Л.И. Разделение и очистка веществ мембранными, обменными и электрохимическими методами. // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 111 с.
3. Gogina, E. Information technologies in view of complex solution of waste water problems / E. Gogina, N. Makisha // Appl. Mech. Mater. 2014. Vol. 587-589. P. 636–639.
4. Лазарев, С.И. Эффективность электрохимической мембранной очистки технологических растворов от сульфата меди и тринатрийфосфата / С.И. Лазарев, О.А. Абоносимов, С.И. Котенев, К.К. Полянский // Известия вузов. Цветная металлургия. № 1. 2019. С. 75 – 81.
5. Абоносимов, О.А. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях / О.А. Абоносимов, М.А. Кузнецов, О.А. Ковалева, В.М. Поликарпов, В.М. Дмитриев // Вестник ТГТУ. 2017. Т. 23. №. 4. С. 641–655.
6. Lazarev, S.I. Model for calculating the mass transfer in electro-barreled devices of a roll type] / S.I. Lazarev, O.A. Abonosimov, M.A. Ryabinsky, A.S. Gorbachev // Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tehnologiya. 2008. Vol. 51. Vol. 5. P. 109–111.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО АППАРАТА РУЛОННОГО ТИПА ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

*Михайлин М.И., Стрельников А.Е., Коновалов Д.Д.,
Лазарев С.И., Коновалов Д.Н.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
mig@tstu.ru*

В химической, машиностроительной и других отраслях промышленности перспективным направлением является разработка оптимизированных вариантов конструктивного исполнения аппаратов для регенерации технологических растворов с выделением из них ценных компонентов, которые можно возвращать обратно в технологический цикл производства, легче перерабатывать в технологических схемах очистки и утилизировать. Для выделения веществ на заключительных и финишных этапах очистки растворов применяются электрохимические мембранные аппараты различных типов [1-7].

Целью настоящей работы является совершенствование конструктивного оформления процессов электробаромембранного разделения растворов промышленных предприятий, для достижения которой использован прототип из патента [8].

Разрабатываемый электробаромембранный аппарат (рисунок 1) состоит из корпуса аппарата 1, изготовленного в виде цилиндрической обечайки, одна из торцевых поверхностей которого глухая и с внутренней ее стороны в ней имеются несквозные проточки в центре под перфорированную трубку 2 и под расположенные от горизонтальной оси под углами 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ соответственно внешние трубки 3. Вторая выполнена разъемной являющаяся крышкой 4, имеющей уплотнение с корпусом аппарата в виде шипа-паза, где расположена уплотнительная прокладка 5. При этом с внутренней ее стороны имеются сквозные проточки в центре под перфорированную трубку 2 и расположенные от горизонтальной оси под углами 0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$ соответственно внешние трубки 3.

Перфорированная трубка 2 изготовлена с перфорацией в виде эллиптических проточек, по периметру которых расположены полуэллипсы, выполненные на расстоянии 5 мм друг от друга, а с крышкой 4 уплотняется посадочной прокладкой 6. С внешней стороны крышки 4 вкручены на резьбе штуцер подачи исходного раствора 7, а также внешние отводные трубки 8, которые с торцевой поверхности герметично припаяны к штуцерам для отвода ретентата 9.

Таким образом, создавая коллекторы для отвода прианодного, прикатодного пермеата 10, 11, в которых расположены электрические провода 12, далее проходящие через отверстия, исполненные в виде двух полумесяцев с

закругленными краями, в фиксирующей прокладке 13, затем между перегородкой 14, внешней и внутренней трубками 3, 15 перфорированными эллиптической щелью, по периметру которых расположены полуэллипсы, выполненные на расстоянии 5 мм и 10 мм друг от друга соответственно и соединенными через цилиндрические отверстия полимерной перфорированной перегородки 16 с дренажными сетками, являющимися анодом 17, 18 соответственно, а также соединенными через герметизирующую заливку 19 внешней отводной трубки 8 с устройством для подвода электрического тока 20.

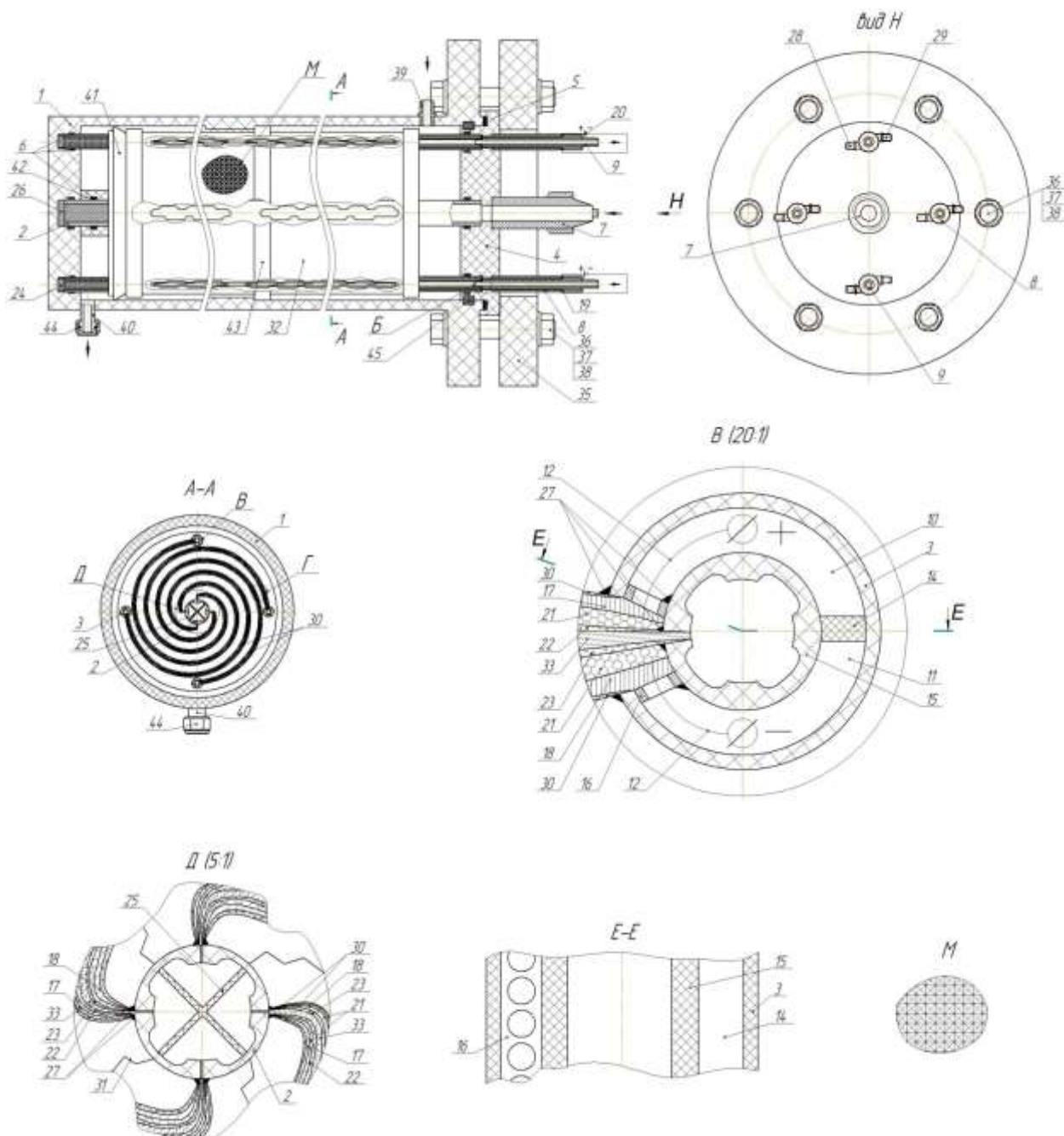


Рисунок 1. Электробаромембранный аппарат рулонного типа.

Коллекторы для отвода прианодного и прикатодного пермеата 10, 11 в сечении ограничены внешней и внутренней трубкой 3, 15, а также перегородкой 14 и полимерными перфорированными перегородками 16,

расположенными на всю длину внешней и внутренней трубок 3, 15 и расположенных соответственно от горизонтальной оси в сечении под углами 0 , $5\pi/6$, $7\pi/6$; $\pi/2$, $4\pi/3$, $5\pi/3$; π , $\pi/6$, $11\pi/6$; $3\pi/2$, $\pi/3$, $2\pi/3$ соответственно, а на всю длину эллиптической щели на полимерные перфорированные перегородки 16 последовательно уложены дренажные сетки, являющиеся анодом и катодом 17, 18, подложки мембран 21, прианодные и прикатодные мембраны 22, 23 соответственно приклеенные у выделенного участка всего контура эллиптических щелей без их пропуска.

Торцы внешней и внутренней трубок 3, 15 с перегородками 14 и полимерными перфорированными перегородками 16 с одной стороны упираются в фиксирующую прокладку 13, а с другой стороны в торцевую прокладку 24, причем коллекторы для отвода прианодного, прикатодного пермеата 10, 11, полость внутренней трубки 15 и полость перфорированной трубки 2, разделенной на четыре секции одинакового объема по всей длине крестообразной перегородкой 25, на расстоянии от края эллиптической щели до торцевой и торцевой прокладки 24, 26 соответственно заполнены клеевой композицией 27 состоящей из эпоксидной смолы или влагостойкого клея.

На каждой внешней отводной трубке 8 на расстоянии 15 мм от края ее торца вмонтированы на резьбе штуцера для отвода прикатодного, прианодного пермеата 28, 29 развернутые друг относительно друга на угол 180 градусов соответственно.

Пространство, образованное между корпусом аппарата 1 изготовленным в виде цилиндрической обечайки одна из торцевых поверхностей которого глухая, пленкой 30 имеющей насечки углубленные в половину от ее толщины составляющих по форме равнобедренные треугольники, внешних трубок 3, перфорированной трубки 2 и крышки 4 создают коллектор для протекания охлаждающей воды.

Между пленками 30 расположены сетки-турбулизаторы охлаждающей воды 31, а рулонные элементы 32 аппарата созданы навивкой приклеенных к перфорированной трубке 2 по краю перфорации эллиптических проточек по разные стороны от сетки-турбулизатора 33, прианодных, прикатодных мембран 22, 23, подложек мембран 21, дренажных сеток, являющихся анодом и катодом 17, 18 и пленок 30 соответственно вокруг перфорированной трубки 2 и разделенной на четыре секции одинакового объема по всей длине крестообразной перегородкой 25, на концах навивки рулонных элементов 32 по всей ширине прианодные и прикатодные мембраны 22, 23 соответственно приклеены у выделенного участка всего контура эллиптических щелей без их пропуска внутренней трубки 15, а пленки 30 приклеены у выделенного участка на всю длину эллиптической щели внешней трубки 3.

Штуцер для отвода ретентата 9 уплотнен с внешней и внутренней трубкой 3, 15 при помощи фиксирующей прокладки 13 и резинового кольца 34. Крышка 4 с корпусом аппарата 1 уплотнены при помощи ответного прижимного фланца 35 с помощью болтов, гаек и шайб 36, 37, 38 равномерно расположенных по контуру фланцевого соединения. Штуцера для ввода и вывода охлаждающей воды 39, 13 расположены от горизонтальной оси в

сечении под углами $\pi/2$ и $3\pi/2$ соответственно, а от торцевых поверхностей корпуса аппарата 1 глухой и разъемной на расстоянии 95 мм от края.

Торцевая поверхность последовательной навивки рулонных элементов 32 по разные стороны от сетки-турбулизатора 33, прианодных, прикатодных мембран 22, 23, подложек мембран 21, дренажных сеток, являющихся анодом и катодом 17, 18 и пленок 30 соответственно вокруг перфорированной трубки 2, разделенной на четыре секции одинакового объема по всей длине крестообразной перегородкой 25 проклеена клеевой композицией 27, состоящей из эпоксидной смолы или влагостойкого клея.

На внутренней поверхности перфорированной трубки 2 и внутренней трубки 15 имеются четыре полуэллиптические канавки, проходящие по всей длине образующих и распределенные от горизонтальной оси под углами $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$ соответственно. Фиксация торцевой поверхности навивки рулонных элементов 32 обеспечена антителескопической решеткой 41 и втулкой 42, расположенных на перфорированной трубке 2. Резиновая манжета 43 расположена на рулонных элементах 32 в месте упора на корпус аппарата 1, на штуцере для вывода охлаждающей воды 40 размещена гайка 44 для крепления к трубопроводу установки, а для герметизации крышки 4 с корпусом аппарата 1 также установлена герметизирующая прокладка 45.

За счет такого конструктивного исполнения и расположения элементов в аппарате происходит увеличение межмембранного канала в два раза на пути потока разделяемого раствора, что приводит к снижению гидравлического сопротивления в канале для отвода ретентата и прианодного, прикатодного пермеата и увеличению производительности и качества разделения растворов, а также приводит к увеличению общей площади мембран в аппарате и площади прикатодных и прианодных мембран для разделения растворов и снижается эффект концентрационной поляризации.

На разработанной конструкции электробаромембранного аппарата рулонного типа без наложения электрического поля можно проводить баромембранные процессы, например обратный осмос, нанофильтрацию, ультрафильтрацию и микрофильтрацию.

Список используемых источников

1. Коновалов, Д. Н. Разработка конструкции электробаромембранного аппарата рулонного типа для разделения технологических растворов / Д. Н. Коновалов, С. В. Ковалев, С. И. Лазарев, О. А. Ковалева // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Материалы XX Международной научно-практической конференции, Барнаул, 14–15 марта 2019 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2019. – С. 181-185.

2. Коновалов, Д. Н. Применение электробаромембранного аппарата трубчатого типа / Д. Н. Коновалов, С. В. Ковалев // Булатовские чтения. – 2019. – Т. 4. – С. 65–66.

3. Ковалев, С.В. Конструктивное оформление электромембранных аппаратов / С. В. Ковалев, Д. Н. Коновалов, О. А. Ковалева, П. Луа.,

В. Ю. Рыжкин, Т. А. Хромова // Актуальные вопросы электрохимии, экологии и защиты от коррозии: материалы II-й Международной конференции 27–29 октября 2021 года. – Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2021. – С. 343–345.

4. Коновалов, Д.Н. Конструкция электромембранного плоскокамерного аппарата с нетрадиционной формой камеры разделения / Д. Н. Коновалов, С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, Д. Д. Коновалов // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11-15 мая 2022 года. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 77–79.

5. Лазарев, С.И. Разработка перспективных конструкций электробаромембранных аппаратов / С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, Д. Н. Коновалов, П. Луа, В. Ю. Рыжкин // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященного 110-летию А.Н. Плановского (ISTS «EESTE-2021»): Т. 1. М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2021. – С. 310–314.

6. Михайлин, М.И. Исследование вольт-амперных характеристик процесса электродеионизации промывочных вод / М.И. Михайлин, И.В. Хорохорина, С.И. Лазарев // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: Материалы XIII Международной научно-инновационной молодежной конференции, Тамбов, 11–12 ноября 2021 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2021. – С. 171-174.

7. Лазарев, С.И. К вопросу проектирования торообразных баромембранных аппаратов / С.И. Лазарев, В.Е. Буланов, О.В. Ломакина // Современная наука: теория, методология, практика: Материалы III-ей Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Тамбов, 13–14 апреля 2021 года. – Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2021. – С. 123-127.

8. Пат. 2700379 Российская Федерация, МПК В01D 61/46, В01D 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.

ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА, ДЕФОРМИРОВАННОГО ПО МЕХАНИЗМУ КРЕЙЗИНГА*

Поцелеев В.В.¹, Трофимчук Е.С.^{1,2}, Успенский С.А.²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия*

²*Институт синтетических полимерных материалов, г. Москва, Россия
vladislav.potselev@chemistry.msu.ru*

Разработка различных способов получения наполненных полимерных материалов всегда являлась важной задачей, поскольку образованные таким образом композитные материалы могут обладать одновременно различными свойствами, такими как прочность, термоустойчивость, гибкость, биоактивность и др. В настоящее время, одной из ключевых проблем медицины является разработка материалов для устранения дефектов в различных тканях организма, в том числе, для восстановления костной ткани. Кость, как известно, представляет собой органоминеральный композит. В связи с этим, важной задачей является синтез материала, представляющего собой систему «органическая основа – минеральная составляющая», который должен обладать следующими свойствами: быть нетоксичным, биосовместимым, биоразлагаемым и биоактивным, то есть способствовать нарастанию костной ткани. Биоразлагаемый полимер полилактид (ПЛ) отлично подходит в качестве органической матрицы, в которую можно было бы вводить минеральные добавки.

Неорганическая составляющая кости преимущественно представлена различными фосфатами кальция и магния. Поскольку кальций и магний обладают довольно схожими химическими свойствами, возможно совместное образование соединений этих химических элементов в порах полимерной матрицы.

Деформация полимеров по механизму крейзинга позволяет получать нанопористые материалы, которые можно заполнять различными добавками. Метод крейзинга заключается в одноосной деформации полимерного материала в адсорбционно-активной среде [1] и образованием высокопористой (около 40 об%) структуры с размерами пор около 15-20 нм.

Целью данной работы являлось разработка методики для получения нанокompозитных материалов на основе полилактида, а также различных добавок.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования науки России (грант № FFSM-2022-0003).*

Список используемых источников

1. Trofimchuk, E. Porous polylactide prepared by the delocalized crazing as a template for nanocomposite materials // Mend Comm. – 2020. – № 30. – p. 171–173.

УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХКАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОДИФФУЗИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

Родионов Д.А.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
Тамбов, Dmitriy_rodionof@mail.ru*

В процессе эксплуатации трехкамерной электродиффузионной установки плоскокамерного типа [1], было выявлено влияние электродов на устройства для измерения электропроводности, результаты влияния представлены на рисунках 1 и 2.

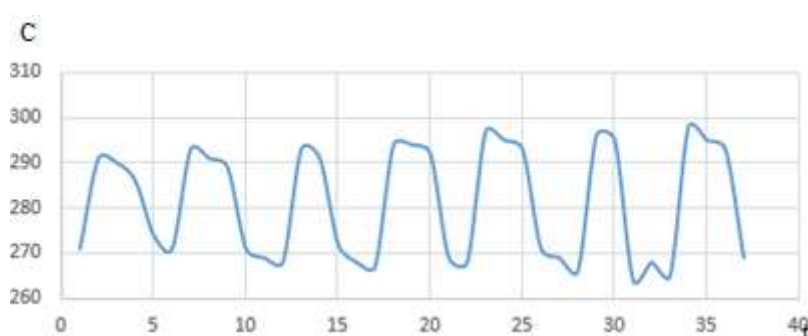


Рисунок 1. Влияние электродов на устройства для измерения электропроводности.

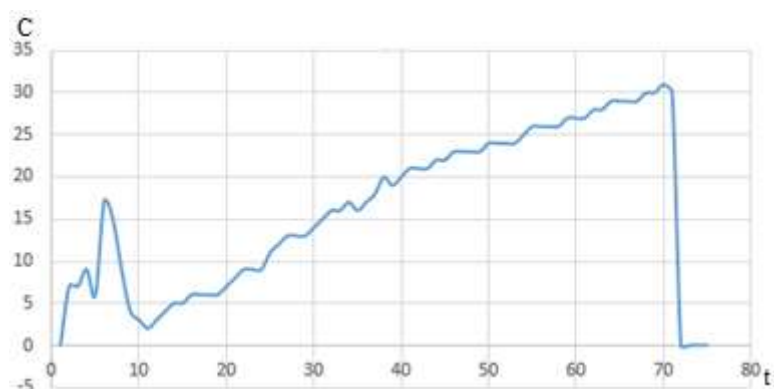


Рисунок 2. Влияние электродов на устройства для измерения электропроводности.

Поскольку электроды переключаются с равными промежутками времени, то датчиками фиксировались значения, которые представлены на рисунке 1. На рисунке 2 представлены результаты эксперимента, в котором электрод был включен после значения времени 70 секунд, что и отображено на графике. На основании результатов, представленных на рисунках 1 и 2 было принято решение использовать один микроконтроллер для одновременного управления датчиками и электродами. В случае, когда управление электродами и датчиками производилось от разных микроконтроллеров, синхронизация объектов была практически невозможной, что влияло на результаты экспериментальных исследований негативно. В качестве микроконтроллера

выступал Atmel ATmega168. Обновленная схема управления представлена на рисунке 3.

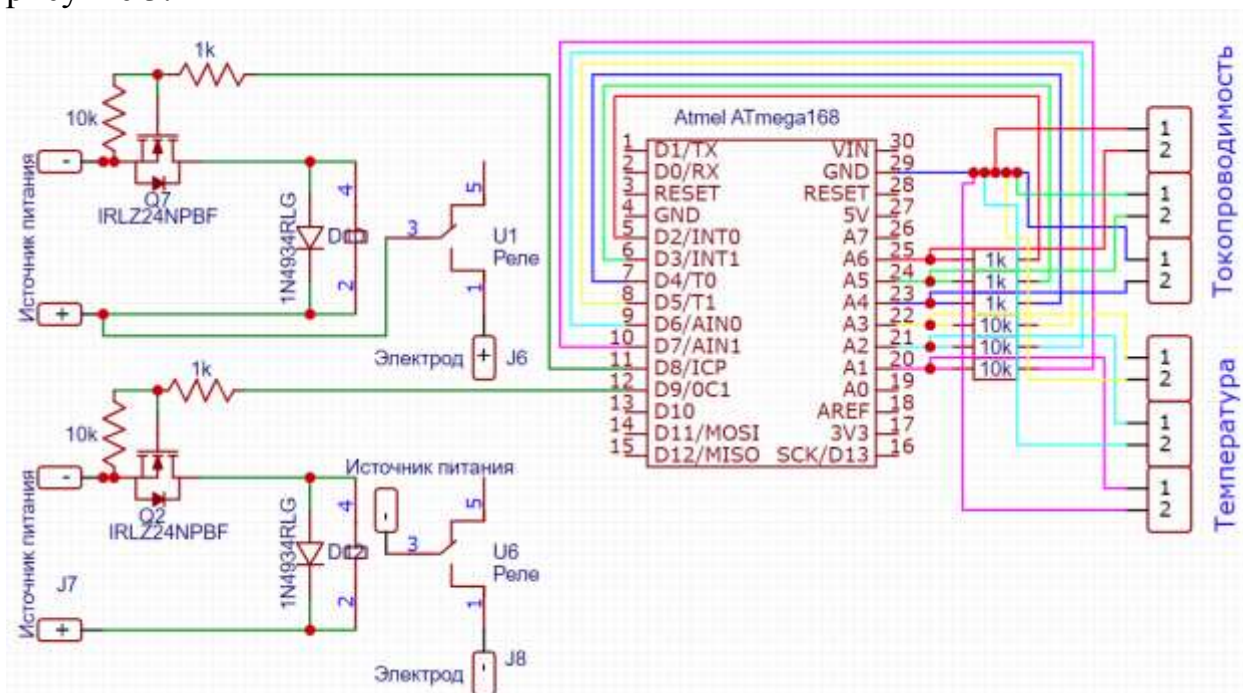


Рисунок 3. Обновленная схема управления трехкамерной электродиффузионной установки.

Схема работает следующим образом: цифровые сигналы с выходов D7 и D8 направляются на затворы полевых транзисторов, тем самым замыкая цепь реле, подавая напряжение на первую пару электродов. Сигналы с выходов D7 и D8 переходят в значения «0», тем самым закрывают полевой транзистор и разрывают цепь реле и отключают первую пару электродов. Аналогичным образом включается вторая пара электродов. Датчики температуры и электропроводности работают на принципах делителя напряжения.

Основной алгоритм управления трехкамерной электродиффузионной установки работает следующим образом: включается первая пара электродов на 1 секунду, после чего она отключается на 1 секунду. После данного промежутка времени включается следующая пара электродов. Датчики работают аналогичным образом, по очереди включаются цифровые выходы и далее микроконтроллер считывает значения на аналоговых выходах. Затем внутри алгоритма производится расчет значений и вывод данных на компьютер.

Список используемых источников

1. Родионов, Д. А. Трехкамерная электродиффузионная установка / Д. А. Родионов, С. И. Лазарев, Л. В. Родионова // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : Материалы XIII Международной научно-инновационной молодежной конференции, Тамбов, 11–12 ноября 2021 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2021. – С. 168–170.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТИЦ

Сухорукова Т.А., Борщев В.Я.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
t.suhorukova2015@yandex.ru*

Известно, что смешение сыпучих материалов является процессом перераспределения частиц компонентов в результате внешнего воздействия до достижения требуемой однородности смеси [1]. Механизм процесса смешивания является весьма сложным и определяется большим количеством факторов, в основном, конструктивными особенностями смесителя и режимом его работы. Процесс смешивания сыпучих материалов характеризуется, как правило, активным взаимодействием частиц. Качество готовой смеси в значительной степени зависит от столкновения частиц, как взаимных, так и с рабочими органами смесителя.

В настоящей статье проведено компьютерное моделирование процесса взаимодействия частиц при их смешивании в смесителе с активным гидродинамическим режимом [2]. Для этого использован метод дискретных элементов, представляющий собой эффективный инструмент для исследования характера движения частиц дисперсных сред.

В основе этой техники моделирования лежит отслеживание траектории каждой частицы. Учитываются как столкновения между частицами, так и контакты частиц со стенками оборудования [3-5].

Программа Altair EDEM использовалась для анализа работы 3D модели усреднителя сыпучего материала с активным взаимодействием частиц сыпучего материала.

Моделирование в EDEM позволило смоделировать поведение зернистой среды, состоящей из набора частиц, которые перемещались независимо друг от друга и взаимодействовали с другими частицами в точках их контакта.

Для моделирования в программе Altair EDEM был импортирован чертеж установки для смешения сыпучих материалов из Autodesk Fusion 360. С целью проведения анализа работы усреднителя в программе EDEM были введены исходные данные, отвечающие за работу оборудования в программном обеспечении, а также выбраны вид, форма и размер частиц сыпучего материала (рис.1).

Для наглядного графического представления процесса смешивания в установке выбран желтый и фиолетовый цвет частиц материала. Программа выводит видеофайл для наглядности проходящего процесса смешения частиц материала в корпусе усреднителя.

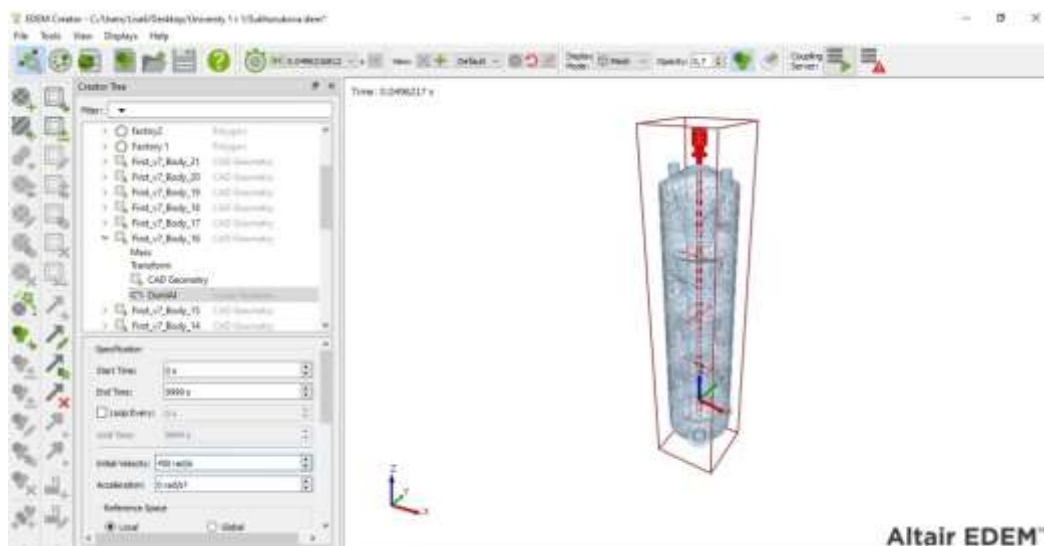


Рисунок 1. Настройка геометрических факторов для визуализации работы усреднителя сыпучих материалов.

Проведено компьютерное моделирование взаимодействия частиц сыпучего материала в усреднителе при соотношении ключевого и основного компонентов 1:1, 1:2, 1:3 и 1:5. Полученная смесь готового продукта для соответствующих соотношений ключевого и основного компонентов представлена на рис. 2.

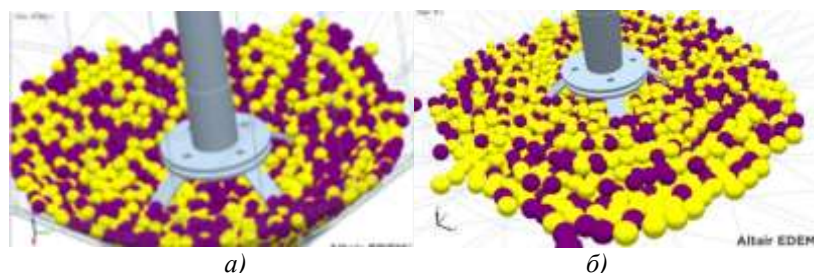


Рисунок 2. Готовая смесь при соотношении ключевого и основного компонентов:
а) 1:1; б) 1:2.

На рис.3 изображена кривая количества контактов. Контакты - это воздействия, возникающие между элементами в точках записи симуляции данных. На кривой мы можем наблюдать, что чем больше времени идет процесс усреднения, тем больше частиц вступает взаимодействие друг с другом. Данный график показывает все контакты и перекрытия (перекрытие двух контактирующих частиц оценивается как деформация, необходимая для того, чтобы они физически могли находиться в их фактической конфигурации) между частицами.

В результате компьютерного моделирования установлено, что в разработанной конструкции усреднителя наблюдается активное взаимодействия частиц ключевого и основного компонентов смеси при их различном соотношении.

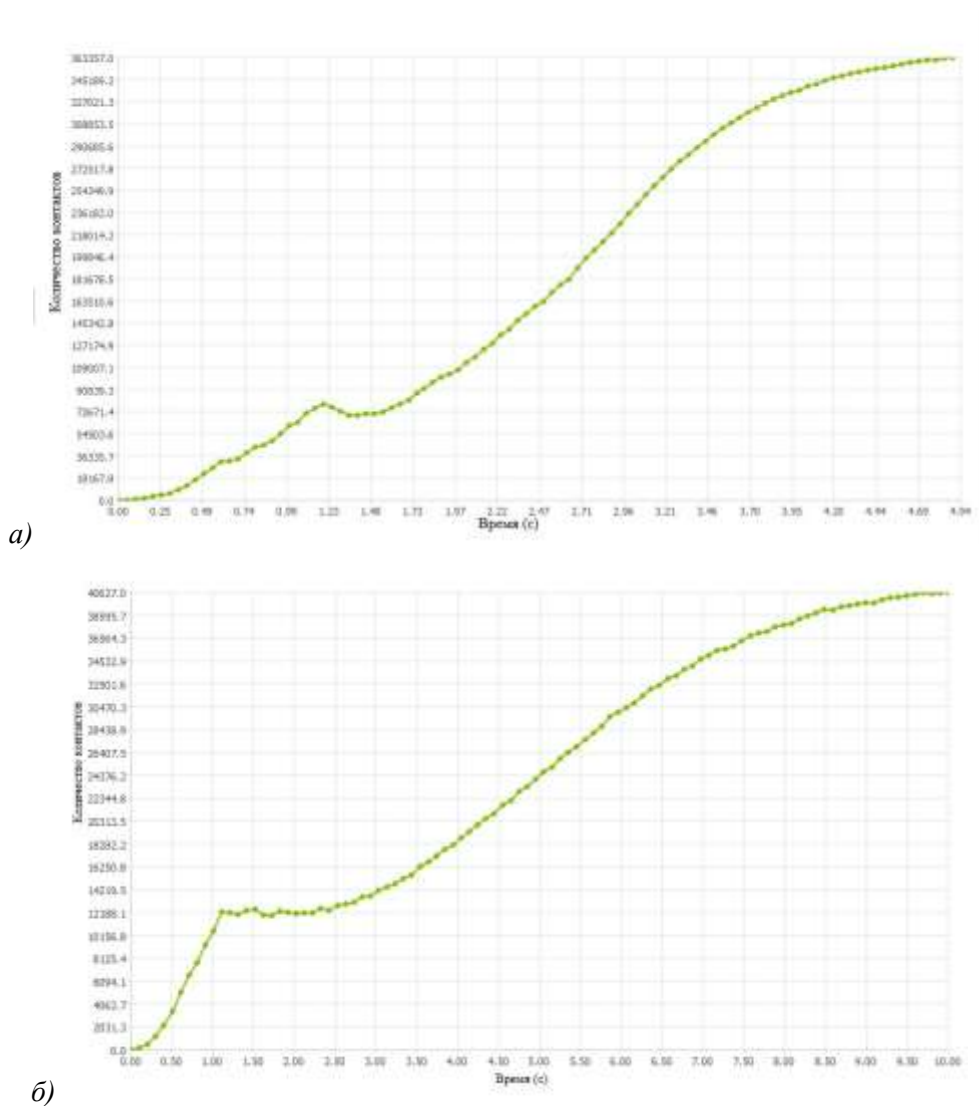


Рисунок 3. Зависимость количества контактов частиц во времени при соотношении ключевого и основного компонентов: а) 1:1; б) 1:2.

Список используемых источников

1. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров // М.: Изд-во Машиностроение. – 1973. – 216 с.
2. Патент РФ на полезную модель RU 195175. Усреднитель сыпучих материалов / В.Я. Борщев, Т.А. Сухорукова, Ю.А. Феоклистов, В.В. Матюкин – 2019135016; заявлено 31.10.2019; опубл. 16.01.2020.
3. Cundall, P.A. A discrete numerical model for granular assemblies / P.A. Cundall, O.D.L. Strack // Geotechnique, 1979. – 517 p.
4. Johannes, C. E. Quist DEM Modelling and Simulation of Cone Crushers and High Pressure Grinding Rolls. // Department of Product and Production Development, Chalmers University of Technology, 2017. – 102 p.
5. Potyondy, D.O. A bonded-particle model for rock / D.O. Potyondy and P.A. Cundall // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004. – P. 1329–1364.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ ВОД ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ХРОМИРОВАНИЯ

Хорохорина И.В., Филимонова О.С., Лазарев С.И.

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Сточные воды хромирования в основном содержат хром (III и VI) в осадке и промывочной воде, состав которых отражает характеристики ванны для нанесения покрытий. Обычно вода для промывки содержит около 1% концентрации ванны для нанесения покрытий. Поскольку хром растворим во всех диапазонах pH, для извлечения хрома для повторного использования очищенной воды требуется эффективная обработка [1].

В качестве объектов исследования были выбраны модельные растворы промывных вод процесса хромирования предприятия ООО «Завод Полимермаш», г. Тамбов, содержащие ионы хрома в диапазоне концентраций 30-150 мг/л и ультрафильтрационная мембрана марки ЭРУ-100/1016, производство ЗАО «Владипор», г. Владимир [2]. На заводе существует схема очистки промывных и сточных вод физико-химическими методами, не позволяющая очистить сточные воды до значений ПДК. После традиционной очистки содержание хрома в воде снижается до 3-5 мг/л. Для снижения остаточных концентраций до значений ПДК в данной работе предлагается скомбинировать традиционную очистку промывных вод с мембранными методами. Поэтому целью данной работы является исследование кинетических характеристик ультрафильтрационной регенерации промывных вод процесса хромирования и разработка модернизированной схемы очистки таких вод.

Для исследования кинетических характеристик процесса ультрафильтрации исследовался коэффициент задержания на промышленной установке рулонного типа [3].

$$R = 1 - \frac{C_{пер}}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где: R – коэффициент задержания; $C_{пер}$ – концентрация растворенного вещества в пермеате, кг/м³; $C_{исх}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м³.

Экспериментальные зависимости по задерживающей способности мембраны ЭРУ-100/1016 при проведении процесса ультрафильтрационного разделения промывных вод представлены на рисунке 1.

С увеличением концентрации исследуемого раствора (рис. 1), коэффициент задержания уменьшается. Это объясняется преимущественным переносом растворителя, чем растворенного вещества [4, 5]. Коэффициент задержания в большей степени зависит от концентрации, чем от давления, что мы наблюдали в наших экспериментальных исследованиях.

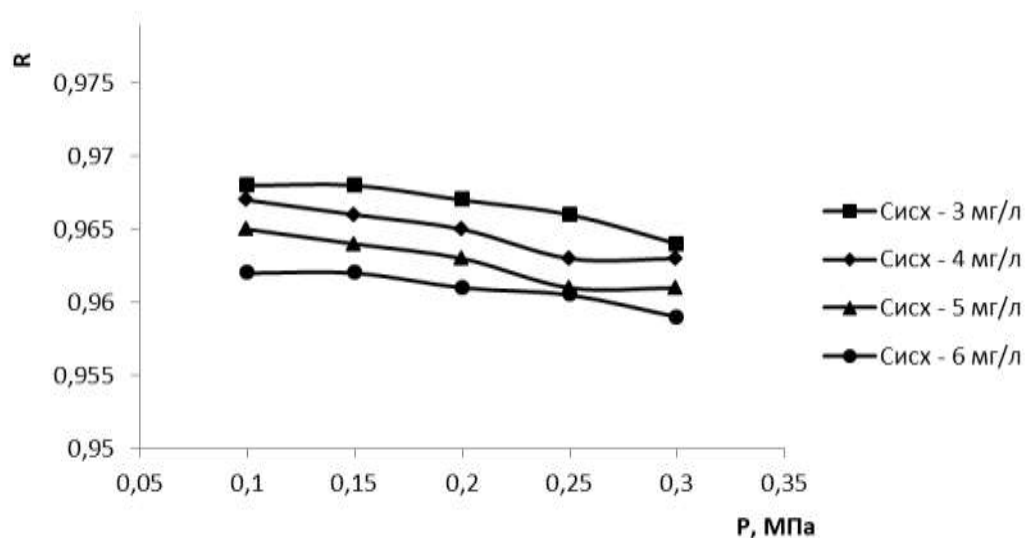


Рисунок 1. Зависимость коэффициента задержания от трансмембранного давления при различной концентрации хрома в исследуемом растворе.

В таблице 1 приведены численные значения концентраций пермеата, полученного при разделении исследуемых растворов. Из таблицы видно, что при остаточных концентрациях хрома после традиционного метода очистки возможно достичь значений ПДК хрома (III) (0,5 мг/л) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Таблица 1. Концентрация хрома в пермеате после разделения промышленных стоков.

| Трансмембранное давление, МПа | Концентрация хрома в промывных водах, мг/ л | | | |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Концентрация хрома в пермеате, мг/л | | | |
| 0,1 | 0,096 | 0,132 | 0,175 | 0,228 |
| 0,15 | 0,096 | 0,136 | 0,18 | 0,228 |
| 0,2 | 0,099 | 0,14 | 0,185 | 0,234 |
| 0,25 | 0,102 | 0,148 | 0,195 | 0,237 |
| 0,3 | 0,108 | 0,148 | 0,195 | 0,246 |

На рис. 2 приведена технологическая схема очистки сточных вод гальванического производства с последующим сбросом очищенной воды в систему канализации, либо подачей на установку обратного осмоса для обессоливания при создании оборотного водоснабжения предприятия.

Данная система промышленной очистки воды рекомендуется для использования при проектировании новых очистных сооружений, либо реконструкции действующих систем очистки сточных вод для повышения их экологической безопасности и экономической эффективности.

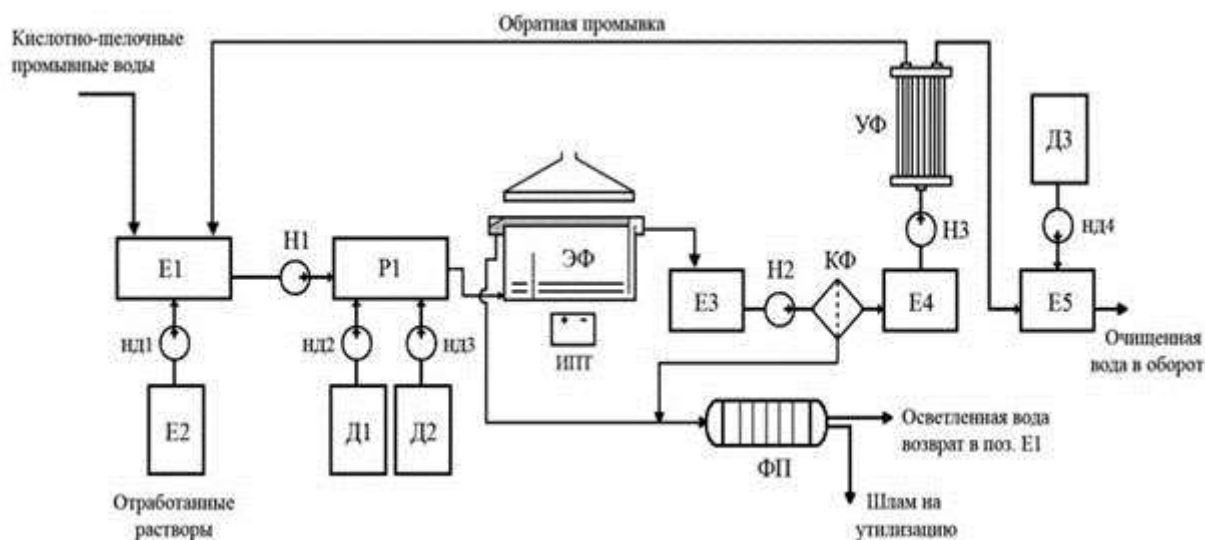


Рисунок 2. Технологическая схема очистки сточных вод:

E1, E2, E3, E4, E5 - усреднитель; N1, N2, N3 - насос; Д1, Д2, Д3 - дозатор раствора реагента; НД1, НД2, НД3, НД4 - дозирующий насос; Р1 - реактор; ЭФ - электрофлотатор; ИПТ - источник питания электрофлотатора; ФП - фильтр-пресс; КФ - кварцевый фильтр; УФ – ультрафильтр.

Выполненный комплекс экспериментальных кинетических характеристик процесса ультрафильтрационной очистки промывных вод, содержащих ионы хрома (III), позволяет сделать следующие выводы: модернизация существующей схемы очистки промывных и сточных вод процесса хромирования ультрафильтрационным модулем позволит снизить концентрацию загрязняющего вещества до значений ПДК.

Список используемых источников

1. Бусарев, А.В. К вопросу очистки хромсодержащих сточных вод / А.В. Бусарев, А.С. Селюгин, Е.Н. Сундукова, Р.Ф. Тухбатуллин // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 6-1. – С. 36–41.
2. <http://www.vladipor.ru/catalog/show/&cid=009&id=1>.
3. Мулдер, М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. // М.:Мир. 1999. – 513 с.
4. Шестаков, К.В. Возможности применения мембранных методов в процессе очистки промышленных сточных вод производства печатных плат / К.В. Шестаков, С.И. Лазарев, И.В. Хорохорина, Д.С. Лазарев // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2016. – Т. 21. – № 1. – С. 290–296. – DOI 10.20310/1810-0198-2016-21-1-290-296.
5. Лазарев, С.И. Извлечение цинка, меди, никеля и кобальта из сточных вод гальванических производств методом электронанофильтрации / С.И. Лазарев, И.В. Хорохорина, К.В. Шестаков, Д.С. Лазарев // *Журнал прикладной химии*. – 2021. – Т. 94. – № 8. – С. 1059–1064. – DOI 10.31857/S0044461821080120.

ДОСТОИНСТВА, НЕДОСТАТКИ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Хайбуллина Д.В.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

В настоящее время прослеживается явная необходимость в сохранении невозобновляемых источников энергии и вследствие этого растет популярность устройств и оборудований, с помощью которых возможна утилизация тепла отходящих дымовых газов в различных отраслях промышленности. Помимо этого, в последние годы большое внимание уделяется эффективному использованию энергетических ресурсов при минимальных тепловых потерях.

Нефтяной и газовый сектор является наиболее энергоемким и в то же время наблюдается недостаточный уровень развития энергоэффективных технологий [1]. Оптимальным решением является использование котла-утилизатора. Теплота, которая является продуктом всего процесса в целом, в дальнейшем может быть использована в личных целях предприятия, например: отопление цехов и административных зданий или обеспечение горячего водоснабжения [2]. Конструктивно котел-утилизатор состоит из: барабана (Б), испарительной поверхности нагрева (И), пароперегревателя (ПП) и водяного экономайзера (ВЭ). Принципиальная схема котла-утилизатора представлена на рисунке 1.

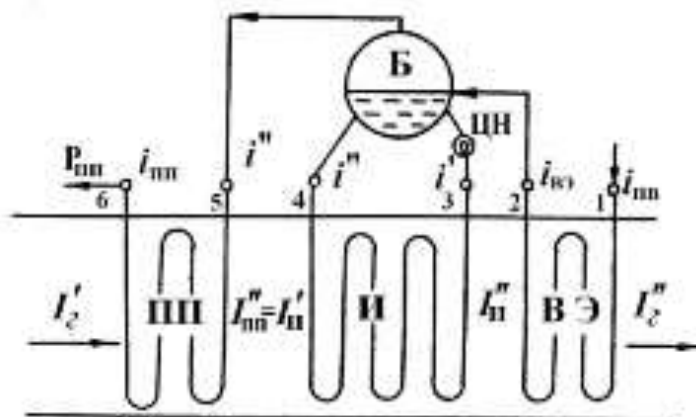


Рисунок 1. Принципиальная схема котла-утилизатора.

Котлы являются одной из самых основных систем нефтеперерабатывающего завода. Они буквально являются частями оборудования, которые поддерживают завод в рабочем состоянии. Актуальным по сей день остается вопрос усовершенствования конструкции котлов-утилизаторов и, соответственно, процессов, протекающих в них, поскольку это позволит получить ощутимые преимущества, такие как: снижение расхода топлива и снижены выбросов парниковых газов. В зарубежной литературе рассматриваются различные решения для данного вопроса, один из которых является добавление нескольких уровней давления. Это позволяет увеличить

выходную мощность парового цикла на 10 % (при двухнапорной схеме) и еще на 3% (при выборе цикла с тройным давлением) (рисунок 2). Причем, улучшение производительности наблюдаются независимо от температуры на выход из турбины [3]. Другим решением может стать повторный нагрев газотурбинной установки, что в свою очередь приводит к повышению эффективности на 2% [4].

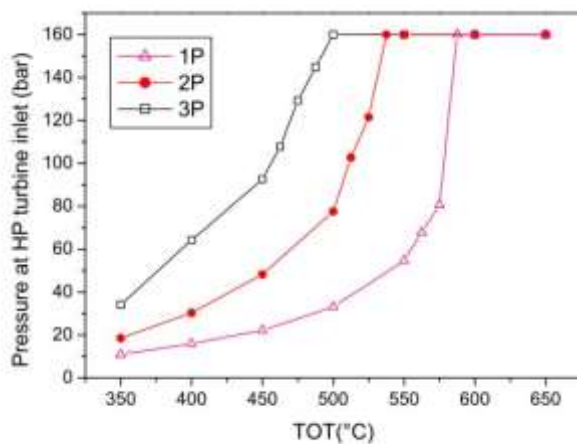


Fig. 5. Optimum pressure at inlet of HP turbine versus TOT.

Рисунок 2. Оптимальное давление на входе.

В настоящий момент существуют несколько основных недостатков при работе котлов-утилизаторов, из которых можно выделить:

1. Грунтовка. Когда пар производится в котле, некоторые капли воды уносятся вместе с паром, в результате чего образуется «влажный пар» - это может привести к: отложению на клапанах, что вызывает перегрев; уменьшению срока эксплуатации оборудования. Решением может стать поддержание низкого уровня солей в воде и эффективная фильтрация воды.

2. Пенообразование. Появление пены приводит к понижению КПД котла и загрязнению и образованию накипи. Решением является применение пеногасителей, например касторовое масло.

3. Коррозия. Это процесс непрерывного «распада» материала котла вследствие электрохимического воздействия растворенного кислорода на металл котла. Коррозия приводит к ржавлению черных металлов, инструментов, которые не регулярно смазываются маслом, и стальных окон, которые не регулярно окрашиваются. Это может привести к полному выходу из строя котла, увеличению стоимости обслуживания и ремонта, сокращению срока службы. Решением считается добавление сульфита натрия или путем механической аэрации.

Помимо вышеизложенного, повысить коррозионную стойкость и прочность материала конструкции можно с помощью метода безопасной эксплуатации котлов-утилизаторов. Проанализировав основные способы безопасности эксплуатации оборудования, было выявлено, что наиболее эффективным методом является – электрохимический метод. Однако, как оказалось, применяемые методы недостаточно эффективны из-за использования гальванической связи корродирующего металла с

вспомогательным анодом. Оптимизировать данный метод можно с помощью исключения гальванической связи расходуемого электрода. Так, произойдет увеличение плотности тока по более значительной площади и стимулирование образования пассивирующих покрытий поверхности в результате протекающих электрохимических реакций.

Таким образом, котлы-утилизаторы являются неотъемлемой частью современного производства в нефтегазовой и нефтехимической промышленности, выполняя важные функции по энергоэффективности и снижению энергопотребления предприятия. К тому же, они являются отличным способом в вопросе цикличного и безотходного производства с рециркуляцией энергии. А если принять во внимание тот факт, что с каждым годом наблюдается увеличение потребления невозобновляемых источников энергии, то котлы-утилизаторы будут использоваться все чаще, за счет их основных достоинств.

Список используемых источников

1. Arzikulov Fazliddin, Sadullayev Tuymurod, & Olimov Orif Nosirovich. (2021). Use Of Recovery Boilers At Gas-Turbine Installations Of Compressor Stations And Thyristor Controls . The American Journal of Applied Sciences, 3(09), 46–50. <https://doi.org/10.37547/tajas/Volume02Issue09-08>;
2. B.V. Reddy, G. Ramkiran, K. Ashok Kumar, P.K. Nag, Second law analysis of a waste heat recovery steam generator, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 45, Issue 9, 2002, Pages 1807-1814, ISSN 0017-9310, [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00293-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00293-9);
3. Franco, A., & Casarosa, C. (2002). On some perspectives for increasing the efficiency of combined cycle power plants. Applied Thermal Engineering, 22(13), [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00053-4);
4. Nadir, M., & Ghenaiet, A. (2015). Thermodynamic optimization of several (heat recovery steam generator) HRSG configurations for a range of exhaust gas temperatures. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.023>

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ АПК ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД*

*Баклыкова М.А., Яркин О.В., Мкртчян Э.С., Бураков А.Е.,
Буракова И.В., Ананьева О.А., Кузнецова Т.С., Ткачев А.Г.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
mariabakleкова@mail.ru*

Загрязнение окружающей среды соединениями тяжелых металлов на протяжении долгого времени остается серьезной экологической проблемой [1]. Самым распространенным высокотоксичным тяжелым металлом является свинец (Pb^{2+}). Большинство соединений тяжелых металлов, в том числе и свинец, попадают со сточными водами металлургических, металлообрабатывающих, химических и других производств в окружающую среду. Свинец не разлагается в окружающей среде и имеет тенденцию накапливаться в живых организмах, вызывая серьезные заболевания [2-4].

Для решения данной проблемы, актуальной является задача создания высокоэффективных адсорбционных материалов. По литературным данным применяются различные типы сорбентов. На сегодняшний момент все больше предпочтение отдают сорбентам на основе растительных отходов для извлечения свинца из загрязненных вод и почв [5].

Так, например, в статье [6] для удаления свинца из воды в качестве адсорбционного материала используют торф. В результате исследования было выявлено, что адсорбционная емкость составила 40,03 мг/г. В статье [7] в качестве адсорбционных материалов используют бурые водоросли. При взаимодействии с тяжелым металлом свинцом максимальная сорбционная емкость составила 37,03 мг/г. В литературном источнике [8] для очистки воды от ионов свинца использовали адсорбционные материалы на основе лигнина. Адсорбционная емкость при удалении ионов свинца составила 35,7 мг/г и 33 мг/г. В статье [9] использовали хитозан в качестве природного сорбента для извлечения свинца из жидкой фазы, адсорбционная емкость которая составила 58,7 мг/г.

Авторами данной работы был синтезирован адсорбционный материал на основе шрота подсолнечника. Технология получения заключалась в гидротермальной карбонизации (ГТК) шрота подсолнечника, который предварительно измельчали и просеивали. Технология ГТК осуществлялась с помощью лабораторного автоклава объемом 100 мл, который помещали в термошкаф, нагретый предварительно до 180 °С и выдерживали в течении 12 часов. Содержимое автоклава фильтровали на водоструйном насосе через тканевый фильтр для удаления побочных продуктов реакции. Полученную пасту гидротермального углерода сушили при 110°С до постоянной массы.

Микрофотографии материалов были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEM-2010 (JEOL, Япония) с приставкой для рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (EDXS). На рис. 1 представлено изображение микроструктуры поверхности гидротермального углерода.

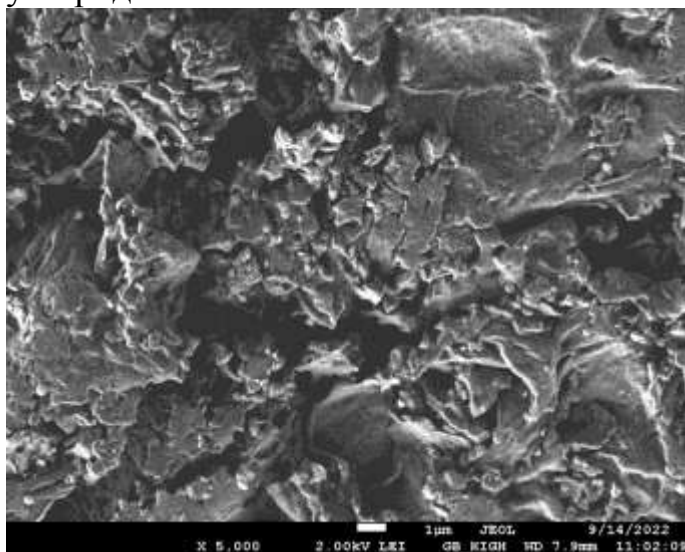


Рисунок 1. СЭМ – изображение поверхности гидротермального углерода

Таблица 1.

Элементный анализ образца

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 44.94 | 69.39 |
| O K | 8.55 | 9.91 |
| Mg K | 2.54 | 1.94 |
| P K | 9.62 | 5.76 |
| K K | 5.84 | 2.77 |
| Ca K | 11.17 | 5.17 |
| Cu K | 17.33 | 5.06 |
| Totals | 100.00 | |

Для определения поглотительной способности сорбента, готовили модельный раствор с содержанием Pb^{2+} начальной концентрацией 100 мг/л, в который добавляли 0,01 г сорбента. Пробирки с исследуемым раствором и навеской сорбента встряхивали на программируемом мульти-ротаторе Multi Bio RS-24 (Biosan, Рига, Латвия) с частотой 100 об/мин при комнатной температуре в течение $t = 5, 10, 30, 60, 90$ мин. Затем отделяли сорбент от раствора с использованием фильтровальной бумаги. Измерение равновесной концентрации Pb^{2+} очищенного раствора проводили на приборе ARL™ QUANT'X EDXRF (Thermo Fisher Scientific, США).

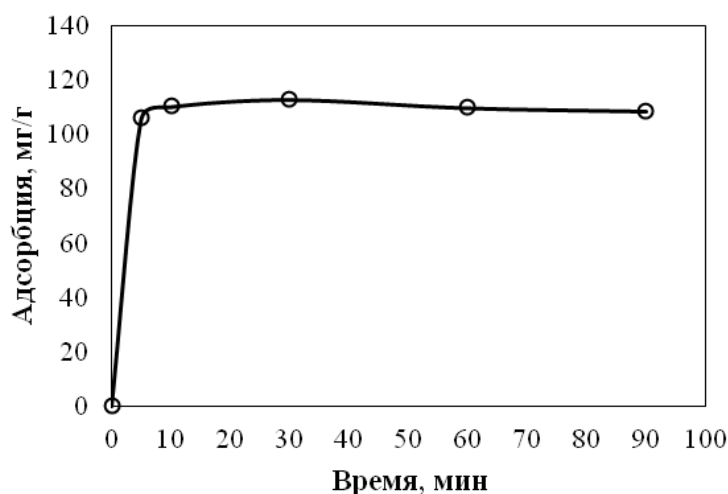


Рисунок 2. Кинетика адсорбции Pb^{2+} на гидротермальном углероде.

Таким образом, кинетические исследования позволили установить время сорбции, которое составило 5 мин при адсорбционной емкости 112 мг/г. Синтезированный материал показывает очень высокую скорость поглощения на начальном этапе поглощения. В первые минуты сорбируется 90 % загрязнителя.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20074, <https://rscf.ru/project/22-13-20074>.*

Список используемых источников

1. Роговина, С.З. Композиционные материалы на основе синтетический полимеров, армированных волокнами природного происхождения / С.З. Роговина, Э.В. Прут, А.А. Берлин // *Высокомолекулярные соединения*, 2019. – Т. 61, № 4. – С. 291–315.
2. Скугорева, С.Г. Оценка эффективности сорбции ионов свинца (II) с помощью моделей кинетики и изотермы сорбции / С.Г. Скугорева // *Теоретическая и прикладная экология*, 2021. – № 3 – С. 44–51.
3. Мамедова, С.А. Сорбция ионов Pb^{+2} и Mn^{+2} на модифицированном бентоните / В.А. Исмаилова, Л.А. Абдуллаева, Э.М. Теймурова, Ф.Т. Махмудов // *Сорбционные и хроматографические процессы*, 2021. – Т. 21, № 6. – С. 850–859.
4. Поломарчук, Д.А. Кинетика сорбции свинца на белково-полисахаридных комплексах бурых водорослей // *Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конф.* – Архангельск: 2021. – С. 109–114.
5. Скугорева, С.Г. Изучение процессов сорбции ионов свинца (II) высшими грибами // *Экология родного края: Проблемы и пути их решения: мат. XVII Всеросс. науч.–практ. конф.* – Киров: 2022. – С. 105–109.
6. Кебец, А.П. Сорбционное концентрирование ионов тяжелых металлов природными сорбентами на основе гуминовых веществ / А.П. Кебец, О.Г. Морозова, Н.М. Кебец, А.В. Свиридов // *Современная педагогика и научные исследования в образовательной организации высшего образования: мат. Всеросс. науч.–метод. конф.* – Кострома: 2022. – С. 845–854.
7. Паршина, А.Э. Сорбция кадмия, свинца и хрома (VI) целлюлозными комплексами арктических бурых водорослей / А.Э. Паршина, К.Г. Боголицын, Н.Л. Иванченко, Д.А. Поломарчук // *Химия растительного сырья*, 2022. – № 3. – С. 325–336.
8. Santander, P. Lignin-based adsorbent materials for metal ion removal from wastewater: A review / P. Santander // *Industrial Crops and Products*, 2021. – V. 167. – PP. 1–13. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113510.
9. Iakovleva, E. Novel sorbents from low-cost materials for water treatment / E. Iakovleva // *Advanced Water Treatment*, 2020. – PP. 265–359. doi: 10.1016/B978-0-12-819216-0.00004-7.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ МЕДИ, ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ

Шестаков К.В.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
kostyanshestakov@mail.ru*

Очистка и регенерация водных ресурсов является важной задачей в современной экологической повестке. В настоящее время извлекается лишь 15-20% от общего количества металлов в стоках. В связи с этим электромембранные методы разделения, способные извлекать более 90% растворенных в стоках солей, приобретают все большую актуальность. Обхват областей промышленности, в которых они применяются, постоянно расширяется. Это обусловлено также тем, что электромембранные установки отличаются высокой экологичностью, компактностью и простотой конструкции. Помимо этого, следует отметить, что прогресс не стоит на месте, и промышленность нуждается в постоянном повышении эффективности производства. Именно поэтому качественная очистка промышленных растворов и сточных вод от загрязнений должна входить в рабочий процесс любого промышленного предприятия. При этом следует отметить, что повышение качества очистных мероприятий электромембранными методами невозможно без глубокого изучения процессов и явлений, возникающих внутри мембран при разделении растворов. В частности, очень важно иметь правильное представление о массопереносе веществ в мембране в каждом конкретном случае.

Целью работы было исследование кинетики процесса электродиализного разделения технологических растворов, содержащих катионы меди, железа и никеля. Исследование кинетических характеристик электрохимического мембранного разделения при использовании ионообменных мембран CM(H) RALEX® и PC Acid 60 [1] проводилось на экспериментальной электродиализной установке, схема которой изображена на рис. 1.

Установка включала в себя электродиализную ячейку и три подключенных к ней независимых линий циркуляции растворов (по одной линии для дилуата, концентрата и приэлектродного раствора). Ячейку собирали из уложенных в определенном рядке анионо- и катионообменных мембран с активной площадью 306,25 см² каждая, полимерных прокладок, двух плит корпуса с каналами ввода и вывода растворов, двух электродов, входных и выходных штуцеров.

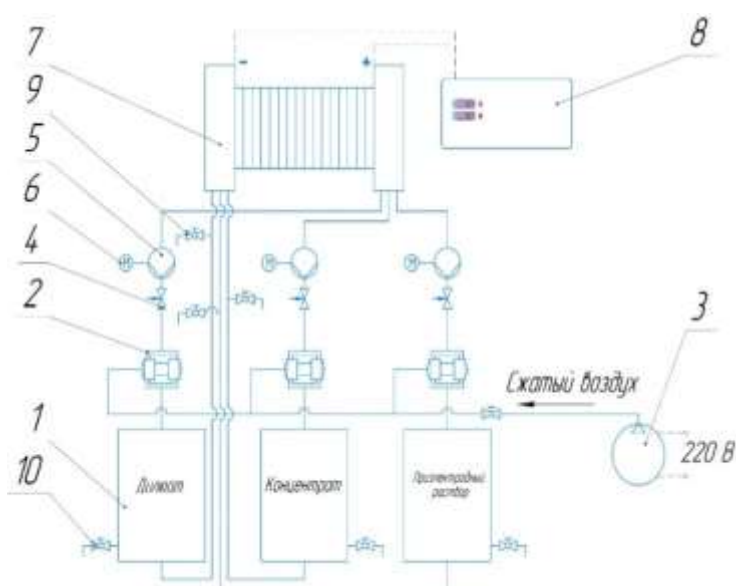


Рисунок 1. Экспериментальная электродиализная установка.

подачей сжатого воздуха масляным компрессором 3. Циркуляция растворов в каждой линии регулировали контрольными клапанами 4, расходомерами 5 и манометрами 6. Подача напряжения к электродиализной ячейке осуществляли с помощью лабораторного источника питания 8. Сбор образцов для анализа производили с помощью выпускных кранов 9, а слив отработанных растворов – с помощью выпускных кранов 10.

В качестве исследуемых выступали однокомпонентные и многокомпонентные промышленные растворы, содержащие катионы тяжелых металлов Cu^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} с концентрацией до 160 мг/л для каждого катиона, а также сульфат- и нитрат-анионы с концентрацией до 240 и 860 мг/л соответственно. Плотность тока $i = 40 \text{ А/м}^2$, время проведения эксперимента $t = 3600 \text{ с}$.

По экспериментальным данным для катионов меди, представленным на рис. 2, видно, что при электродиализном разделении многокомпонентного раствора на протяжении всего эксперимента очистка раствора от катионов Cu^{2+} лучше по сравнению с однокомпонентным раствором.

Кривые, отражающие процесс очистки исходных растворов от катионов Fe^{3+} , идентичны по своей структуре как для однокомпонентного, так и

Исходные растворы заливали в емкость дилюата 1. В аналогичные емкости в линиях концентрата и приэлектродного раствора заливали дистиллированную воду. Начальный объем растворов в каждой из трех емкостей составлял 5 л. Из исходных емкостей растворы с помощью мембранных пневматических насосов 2 марки Fluimas подавались по соответствующим линиям к электродиализной ячейке 7. Работа насосов обеспечивалась

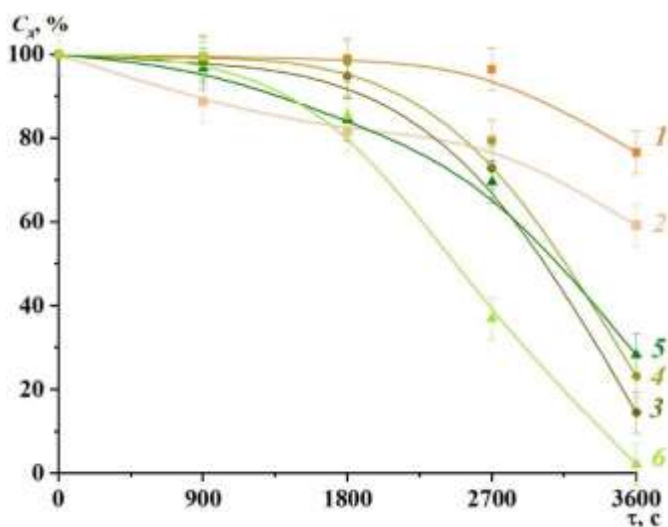


Рисунок 2. Зависимости концентрации катионов Cu^{2+} , Fe^{3+} и Ni^{2+} от времени в камере дилюата в процессе электродиализного разделения однокомпонентных и многокомпонентных растворов с применением пары мембран CM(H) RALEX® и PC Acid 60: 1 – Cu^{2+} (од.), 2 – Cu^{2+} (мн.), 3 – Fe^{3+} (од.), 4 – Fe^{3+} (мн.), 5 – Ni^{2+} (од.), 6 – Ni^{2+} (мн.).

многокомпонентного раствора. При этом в процессе электродиализного разделения многокомпонентного раствора его очистка от катионов Fe^{3+} несколько хуже (около 10%) на протяжении всего времени тестовых экспериментов.

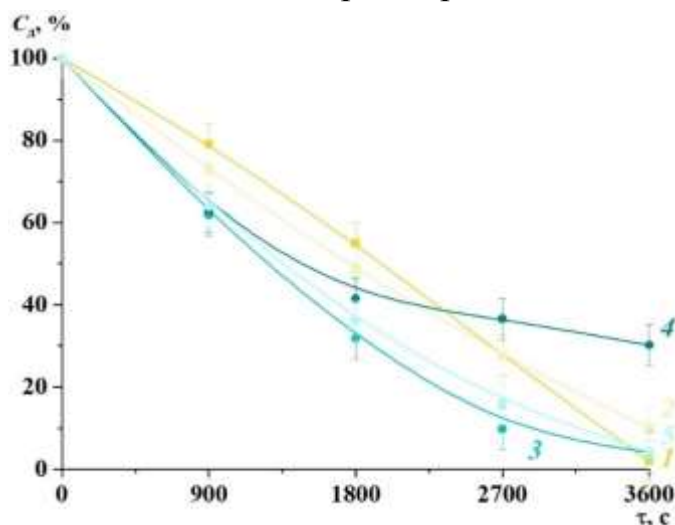


Рисунок 3. Зависимости концентрации катионов SO_4^{2-} и NO_3^- от времени в камере дилуата в процессе электродиализного разделения однокомпонентных и многокомпонентных растворов с применением пары мембран CM(H) RALEX® и PC Acid 60: 1 – SO_4^{2-} (од.), 2 – SO_4^{2-} (мн.), 3 – NO_3^- (од., Fe^{3+}), 4 – NO_3^- (од., Ni^{2+}), 5 – NO_3^- (мн.)

Сравнение результатов исследования для катионов Ni^{2+} (рис. 2) показало, что на протяжении первых 30 минут в каждом эксперименте значения оставшееся количество катионов приблизительно одинаковое, но затем происходит резкое снижение концентрации катионов Ni^{2+} при разделении многокомпонентного раствора в отличие от раствора, содержащего из целевых металлов только никель.

Результаты электродиализного разделения однокомпонентных и многокомпонентных растворов по анионам SO_4^{2-} и NO_3^- представлены на рис. 3. Очистка от SO_4^{2-} при разделении однокомпонентного

раствора была чуть хуже, чем при разделении многокомпонентного раствора, на протяжении первой половины эксперимента. Однако затем наблюдалось более резкое снижение значений концентрации исследуемого аниона по сравнению с многокомпонентным раствором. Практически во всех случаях растворы были очищены более, чем на 90% от исходного количества NO_3^- . Исключением является разделение однокомпонентного раствора, содержащего Ni^{2+} и NO_3^- , где раствор очистился от NO_3^- лишь на 60%. В целом, были получены хорошие показатели очистки.

Подводя итоги оценки кинетики электродиализного разделения технологических растворов и их очистки от катионов Cu^{2+} , Fe^{3+} и Ni^{2+} можно сделать вывод, что процесс очистки от катионов этих металлов протекает по-разному как между собой, так и при сравнении однокомпонентных и многокомпонентных растворов. Для многокомпонентного раствора наблюдается повышение очистки от катионов Cu^{2+} и Ni^{2+} и небольшое показателя очистки от Fe^{3+} по сравнению с разделением соответствующих однокомпонентных растворов.

Список используемых источников

1. Шестаков, К.В. Восстановление железа, никеля и меди из сточных вод производства печатных плат методом электродиализа / К.В. Шестаков, С.И. Лазарев, К.К. Полянский, Н.Н. Игнатов // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т. 94. – № 5. – С. 547-552. – DOI 10.31857/S0044461821050017.

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕСТИТЕЛЕЙ В ТРИЭТИЛАМИНЕ НА ЕГО СПОСОБНОСТЬ К ГИДРОФОБИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Кровякова Е.И., Тришина А.В., Здерева А.В., Дегтярев А.А., Швец М.Е.,
Ростова Д.П., Степура И.А., Бубнова Е.В.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
K.Liza.9072003@gmail.com*

Модифицирование твердой поверхности поверхностно-активными веществами (ПАВ) достаточно часто используется для того чтобы придать ей необходимые свойства. Данный подход используется например для гидрофобизации поверхности стекловолокна [1], переводе пигментов из водной фазы в масляную (фляшинг-процесс) [2]. В последнем случае чаще всего применяют катионные либо неионногенные ПАВ, являющиеся производными третичных аминов и четвертичных аммониевых оснований.

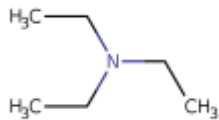
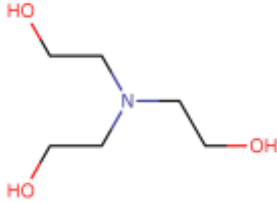
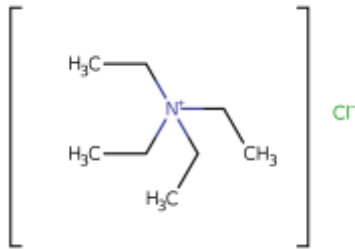
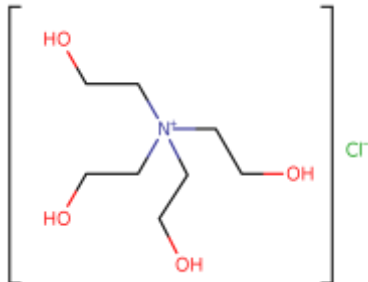
Данные ПАВ увеличивают гидрофобность поверхности за счет адсорбции и экранирования гидрофильных участков, следовательно чем прочнее ПАВ связывается с поверхностью, тем более эффективным гидрофобизатором они являются. Поверхность большинства органических пигментов обладает электрофильными свойствами и хорошими гидрофобизаторами для нее могут являться третичные амины, третичные аминоспирты и соли четвертичных аммониевых оснований [3].

Прочность связи ПАВ с данным типом поверхности коррелирует с такими индексами реакционной способности (ИРС) как жесткость по Пирсону и индекс электрофильности [4].

В данной работе исследуется влияние заместителей в третэтиламине на приведенные ИРС с целью выяснить, как химическая структура производных третичных аминов влияет на их способность к гидрофобизации электрофильных поверхностей.

В качестве исследуемых модификаций исходного амина будем изучать производный от него аминоспирт (добавление группы ОН), хлорид четвертичного аммониевого основания (добавление этильной группы и хлора) и хлорид гидроксикалциаммония (добавление этильной группы, хлора и группы ОН). Структурные формулы данных соединений приведены в таблице 1. Для веществ которые могут гидролизироваться в воде (хлориды) также были рассчитаны характеристики для катионов.

Таблица 1. Структурные формулы исследуемых соединений.

| Название соединения | Структурная формула |
|--|---|
| Триэтиламин |  |
| Триэтаноламин |  |
| Хлорид тетраэтиламина |  |
| Хлорид тетракис(2-гидроксиэтил)аммония |  |

Изучаемые вещества активно используются в химической промышленности. Например, триэтиламин применяют в качестве ПАВ, модифицирующих твердую поверхность, а также как катализатор образования пенополиуретанов, эпоксидных смол, каучука.

Триэтаноламин используется как эмульгатор и в производстве поверхностно-активных веществ.

Хлорид тетраэтиламина нашел применение в качестве ингибитора коррозии и катионных ПАВ.

Тетракис(2-гидроксиэтил) аммониевые соли являются сырьем для получения биологически активных металлосодержащих соединений и сами могут эффективно использоваться в качестве растворителей и катализаторов в биокатализе [5]. Это позволяет использовать тетракис(2-гидроксиэтил) хлорид в фармакологии, биотехнологии и сельском хозяйстве.

Исследуемые ИРС, жесткость и индекс электрофильности рассчитываются на основании значений энергий граничных орбиталей:

$$\eta = \frac{(E_{\text{HВМО}} - E_{\text{ВЗМО}})}{2}$$

$$\mu = \frac{(E_{\text{HВМО}} + E_{\text{ВЗМО}})}{2}$$

$$\omega = \frac{\mu^2}{2\eta}$$

где η – жесткость,

μ – химический потенциал,

ω – индекс электрофильности,

$E_{\text{HВМО}}$ – энергия нижней вакантной молекулярной орбитали,

$E_{\text{ВЗМО}}$ – энергия верхней занятой молекулярной орбитали, все значения даны в эВ.

Энергии граничных орбиталей рассчитывались с использованием метода теории функционала плотности (DFT). В качестве функционала использовался пространственно-разделенный гибридный ω B87x [6]. Так как методы DFT плохо воспроизводят нековалентные взаимодействия, для компенсации данной ошибки использовалась поправка Grimme по алгоритму D4 [7]. В качестве базиса использовался трехэкспоненциальный набор Даннинга с включением диффузионных функций – aug-cc-pVTZ [8].

Для оценки влияния растворителя использовалась континуальная модель SMD [9], в качестве растворителя была взята вода.

Эффективность гидрофобизатора будем оценивать по уменьшению значений жесткости и индекса электрофильности [3].

Результаты расчета приведенных ИРС для исследуемых соединений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения индексов реакционной способности для исследуемых веществ.

| Название соединения | Жесткость | Индекс электрофильности |
|---|-----------|-------------------------|
| Триэтиламин | 4.84 | 1.56 |
| Триэтаноламин | 4.82 | 1.56 |
| Тетраэтиламин катион | 6.49 | 2.45 |
| Хлорид тетраэтиламина | 4.97 | 1.70 |
| Тетраakis(2-гидроксиэтил)аммоний катион | 5.78 | 2.11 |
| Хлорид тетраakis(2-гидроксиэтил)аммония | 5.27 | 1.85 |

По значениям выбранных ИРС наилучшую сорбционную способность имеют триэтиламин и триэтаноламин, однако триэтиламин плохо растворим в воде и его труднее нанести на поверхность пигмента в водной фазе. Для хлоридов наблюдается ухудшение сорбционной способности при переходе от нейтральной молекулы к катиону, следовательно они будут более эффективны в неполярных растворителях, которые не способствуют диссоциации.

Таким образом из изученных соединений наилучшую способность к гидрофобизации в водной среде имеет триэтаноламин.

Список используемых источников

1. Ревяко, М.М. Модификация поверхности наполнителя в стеклонеполненном полиэтилене / М.М. Ревяко, А.Я. Маркина, Т.А. Бутько, Л.А. Исаеня // Химия и химическая технология. Выпуск 9. – Минск: Издательство «Высшая школа», 1975. – С. 108-114.
2. Индейкин, Е.А. Пигментирование лакокрасочных материалов / Е.А. Индейкин, Л.Н. Лейбзон, И.А. Толмачев. – Л.: Химия, 1986. – 160 с.
3. Прогнозирование возможности олеофилизации поверхности фталоцианина меди на основании индексов реакционной способности / А. А. Дегтярев, А. В. Тришина, Т. П. Дьячкова [и др.] // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94. – № 8. – С. 1263-1268. – DOI: 10.31857/S0044453720080051.
4. Дегтярев, А. А. Исследование сорбционной активности фталоцианина меди / А. А. Дегтярев, А. В. Тришина, А. Г. Тараканов // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 55. – № 7. – С. 22-30. – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/18-55-7-22.
5. Das D. Improved activity of horseradish peroxidase (HRP) in ‘specifically designed’ ionic liquid / D. Das, A. Dasgupta, P.K. Das // Tetrahedron Letters. – 2007. – Vol. 48. – P. 5635-5639. – DOI: 10.1016/j.tetlet.2007.06.022.
6. Najibi, A. The Nonlocal Kernel in van der Waals Density Functionals as an Additive Correction: An Extensive Analysis with Special Emphasis on the B97M-V and ω B97M-V Approaches / A. Najibi, L. Goerigk // J. Chem. Theory Comput. – 2018. – Vol. 14. – P. 5725-5738. – DOI: 10.1021/acs.jctc.8b00842.
7. Caldeweyher E. Extension of the D3 dispersion coefficient model / E. Caldeweyher, C. Bannwarth, S. Grimme // J. Chem. Phys. – 2017. – Vol. 147. – P. 034112. – DOI: 10.1063/1.4993215.
8. Kendall, R. A. Electron affinities of the first-row atoms revisited. Systematic basis sets and wave functions / R. A. Kendall, T. H. Dunning, R. J. Harrison // Journal of Chemical Physics. – 1992. – Vol. 96. – No 9. – P. 6796-6806. – DOI: 10.1063/1.462569.
9. Marenich, A.V. Universal solvation model based on solute electron density and on a continuum model of the solvent defined by the bulk dielectric constant and atomic surface tensions / A.V. Marenich, C.J. Cramer, D.G. Truhlar // J. Phys. Chem. B. – 2009. – Vol. 113. – P. 6378-6396. – DOI: 10.1021/jp810292n.

ДИСКОВЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ С КРУПНЫМИ ТВЕРДЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Пасько А.А., Алексеев А.Д., Толмачева, О.И., Маджхул М.Д.М.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
ttmp2005@yandex.ru;*

Современные технологии в химической, нефтехимической, пищевой и других отраслях промышленности требуют расширения номенклатуры и увеличения объемов жидкостей, в том числе высокой вязкости, которые необходимо транспортировать, перемешивать или разделять. Перемешивание может осуществляться в трубопроводе, через который протекает жидкость, в перекачивающем насосе, а также в аппаратах с мешалками, предназначенных специально для этой цели. Наиболее пригодными для таких жидкостей оказываются некоторые разновидности дисковых машин и аппаратов до недавнего времени считавшиеся малоперспективными.

Энергия в дисковых машинах и аппаратах передается жидкости в непосредственной близости от диска в результате трения диска о жидкость. Ввиду больших окружных скоростей вокруг диска возникают большие градиенты скоростей, что приводит к возникновению высоких напряжений сдвига.

В частности, дисковые насосы имеют ряд важных характерных особенностей, делающих их применение в данных случаях целесообразным и предпочтительным:

- ламинарный поток обеспечивает сохранность требующих бережного обращения продуктов;
- дисковый насос перекачивает, не засоряясь, вязкие и имеющие включения из твердых частиц жидкости;
- дисковый насос имеет больший кавитационный запас, чем центробежный при тех же условиях;
- дисковый насос при перекачивании использует трение, и, чем выше вязкость жидкости, тем эффективней он работает;
- дисковый насос справляется с перекачкой суспензий, содержащих большой процент плотных частиц, не засоряясь при этом и не останавливаясь;
- диски в насосе могут располагаться с большим зазором, что позволяет им справляться с перекачкой жидкостей с твердыми частицами;
- дисковый насос имеет минимальные затраты на обслуживание и ремонт по сравнению со всеми другими конструкциями насосов.

В Тамбовском государственном техническом университете разработаны дисковые насосы, имеющие возможность варьировать ширину междискового зазора, позволяющие перекачивать вязкие жидкости, содержащие твердые включения.

Дисковый насос (рисунок 1) состоит из корпуса 1, снабженного штуцером 2 для подвода жидкости и штуцером 3 для отвода жидкости. На валу 4 закреплен ведущий диск 5, к которому посредством стержней 6 крепятся ведомые диски 7. Между дисками установлены упругие распорные втулки 8 (например, пружины).

Дисковый насос работает следующим образом. Жидкость поступает в корпус 1 через штуцер 2. При вращении вала 4 жидкость, находящаяся в зазорах между дисками 5 и 7, закручивается за счет сил трения, и энергия от вращающихся дисков передается жидкости. Жидкость выводится из насоса через штуцер 3.

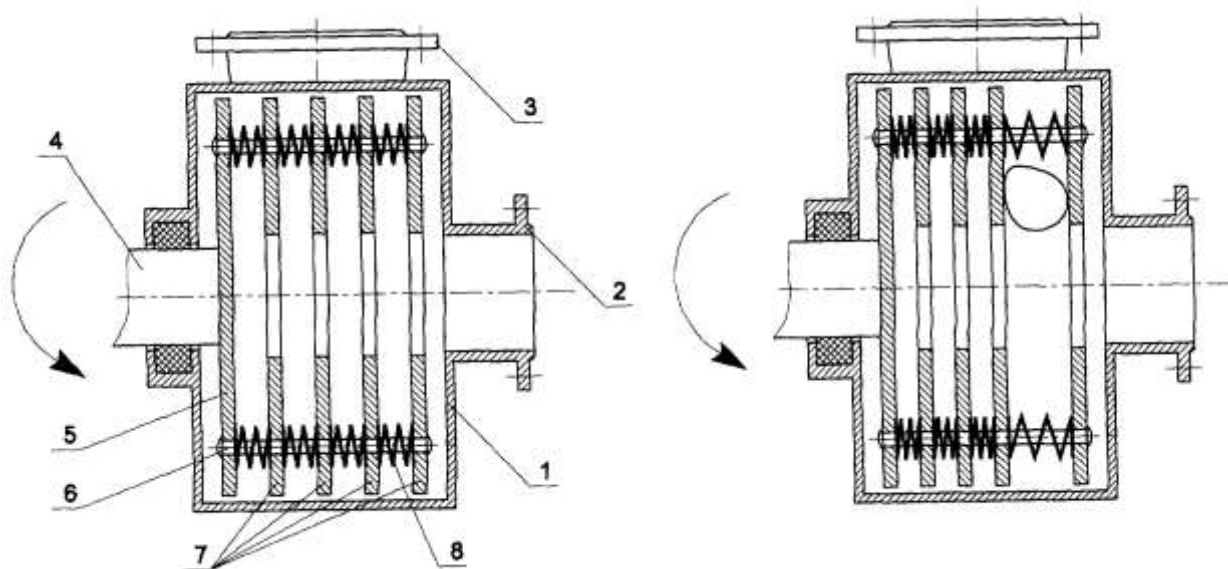


Рисунок 1. Дисковый насос [1].

Если в процессе работы насоса в него попадает частица с размером больше, чем расстояние между дисками, то она увлекается потоком жидкости в один из междисковых зазоров, где за счет возможности перемещения дисков вдоль стержней, преодолевая силу упругости распорных втулок, расстояние между дисками увеличивается и частица транспортируется к выходному штуцеру.

После прохождения частицы под действием сил упругости распорных втулок диски устанавливаются в первоначальное положение.

Дисковый насос (рисунок 2) состоит из корпуса 1, снабженного штуцером 2 для подвода жидкости и штуцером 3 для отвода жидкости. На валу 4 закреплен ведущий диск 5, к которому посредством стержней 6 крепятся ведомые диски 7. На торцевых поверхностях смежных дисков устанавливают магнитные элементы 8 таким образом, что в каждом междисковом зазоре магнитные элементы, принадлежащие смежным дискам, обращены навстречу друг другу одноименными полюсами, а ведомые диски устанавливаются с возможностью перемещения вдоль стержней.

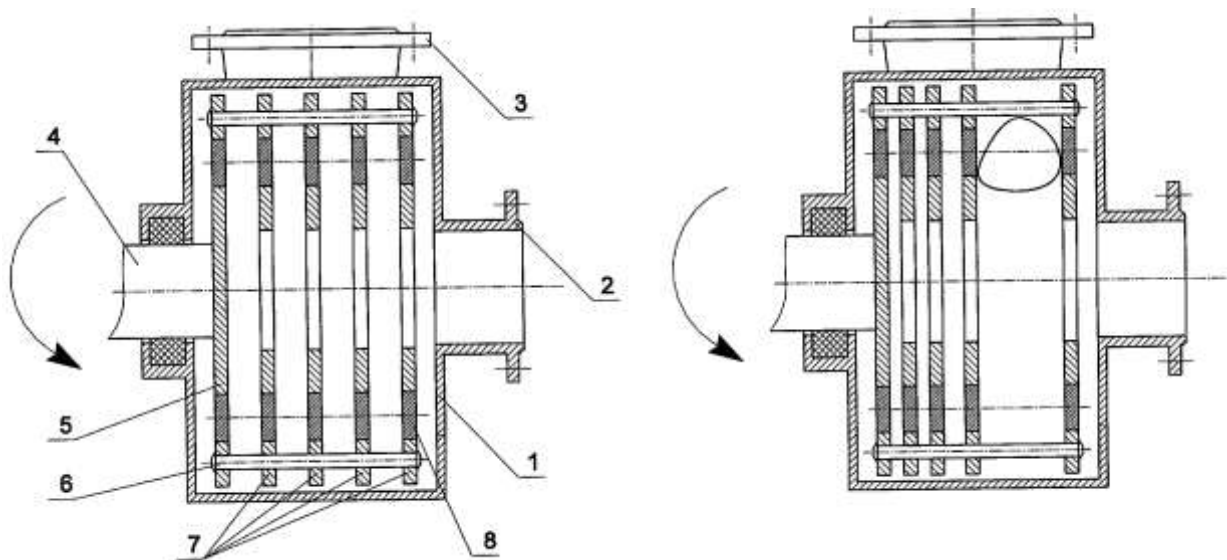


Рисунок 2. Дискосый насос [2].

Дискосый насос работает следующим образом, жидкость поступает в корпус 1 через штуцер 2. При вращении вала 4, жидкость, находящаяся в зазорах между дисками 5 и 7, закручивается за счет сил трения и энергия от вращающихся дисков передается жидкости. Жидкость выводится из насоса через штуцер 3. Зазор между дисками обеспечивается установленными на торцевых поверхностях смежных дисков магнитными элементами 8.

В предлагаемой конструкции дискового насоса на дисках устанавливают магнитные элементы таким образом, что в каждом междисковом зазоре магнитные элементы, принадлежащие смежным дискам, обращены навстречу друг другу одноименными полюсами, а ведомые диски устанавливаются с возможностью перемещения вдоль стержней.

Возможны различные схемы размещения магнитных элементов на дисках.

На рисунке 3 показана схема размещения магнитных элементов, в которой каждый магнитный элемент (кроме расположенных на крайних дисках) взаимодействует с одноименными полюсами магнитных элементов, расположенных слева и справа, образуя, например, следующую цепочку магнитных взаимодействий:

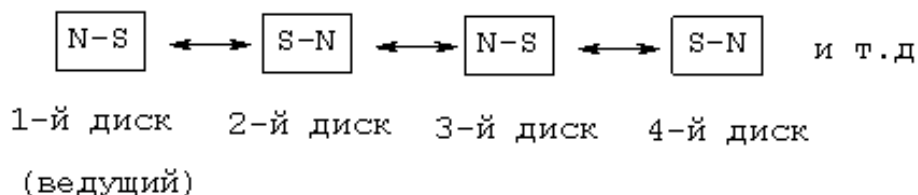


Рисунок 3. Схема расположения магнитных элементов.

Также возможна установка магнитных элементов на торцевых поверхностях дисков (рисунок 4). По достижению данной наработки возникает вероятность внезапных отказов, проявляется влияние износа деталей.

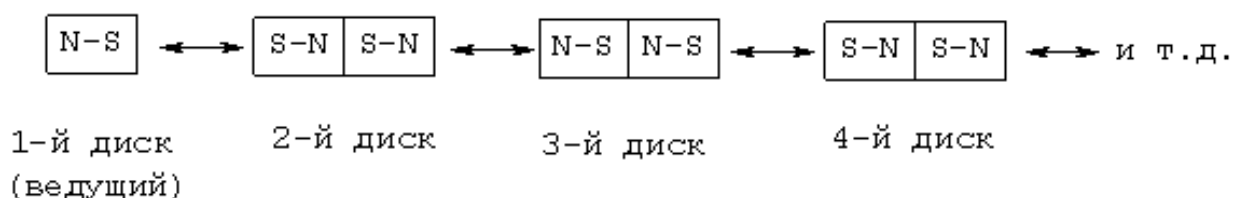


Рисунок 4. Схема расположения магнитных элементов на торцевых поверхностях дисков.

Если в процессе работы насоса в него попадает частица с размером больше, чем расстояние между дисками, то она увлекается потоком жидкости в один из междисковых зазоров, где за счет возможности перемещения дисков вдоль стержней, преодолевая силы взаимодействия магнитных элементов, расстояние между дисками увеличивается и частица транспортируется к выходному штуцеру.

После прохождения частицы под действием сил взаимодействия магнитных элементов диски устанавливаются в первоначальное положение.

Таким образом, прохождение через насосы крупных твердых включений обеспечивается за счет кратковременного перераспределения междисковых зазоров.

Предлагаемые конструкции дисковых насосов обладают простой конструкцией и сочетают в себе возможность обеспечить высокий напор, а также возможность перекачивать жидкость с крупными твердыми включениями.

Список используемых источников

1. Патент № 2285153 Российская Федерация, МПК F04D 11/00 (2006.01). Дисковый насос : № 2005107290 : заявл. 15.03.2005 : опубликовано 10.10.2006 / Мищенко С.В., Ткачев А.Г., Баранов А.А., Меметов Н.Р., Негров В.Л., Пасько А.А., Пасько Т.В., Шубин И.Н. ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

2. Патент № 2285154 Российская Федерация, МПК F04D 11/00 (2006.01), F04D 29/18 (2006.01), F04D 7/04 (2006.01). Дисковый насос : № 2005110577 : заявл. 11.04.2005 : опубликовано 10.10.2006 / Мищенко С. В., Ткачев А.Г., Баранов А.А., Меметов Н.Р., Негров В.Л., Пасько А.А., Пасько Т.В., Шубин И.Н.; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Маджхул М.Д.М.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
dmhm0000@gmail.com*

Надежность оборудования является одной из основных характеристик его качества, демонстрирующих способность сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, обеспечивающих способность выполнения требуемых функций в заданных режимах и условиях применения.

Контроль параметров надежности технологического оборудования важен и необходим как на этапах проектирования и изготовления, так и на этапе эксплуатации. Это связано с тем что, отказ оборудования или его работа вне заданных режимов может привести к катастрофе техногенного характера, гибели людей и принести убытки предприятию. Следовательно, эффективный контроль этих параметров в совокупности с организационными мероприятиями повышает безопасность производства и, очевидно, что приносит экономическую выгоду предприятию. Для повышения эффективности контроля необходимо осуществлять непрерывный мониторинг и прогнозирование показателей надежности технических систем, повышать надежность и своевременно предотвращать возможные аварии и инциденты [1].

Процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды – анализ рисков – позволяет оценивать состояние промышленной безопасности объекта, наиболее опасных элементов и давать рекомендации по уменьшению риска.

Объектом исследований были нефтяные центробежные насосы НК, предназначенные для перекачивания нефтепродуктов с плотностью до 1 т/м^3 и вязкостью до $0,01 \text{ см}^2/\text{с}$.

На основании проведенного литературного анализа определены наименее надёжные элементы насосов и наиболее часто проводимые при ремонтных работах операции, показано влияние общей наработки на показатели надёжности насосов.

В исследовании были обработаны данные по 35 нефтяным центробежным консольным насосам (типа НК). На рисунке 1 показано количество ремонтов по типам ремонтных операций.

Для предварительной оценки качества обслуживания и надёжности насосов рассчитан коэффициент готовности – комплексный показатель, характеризующий готовность элемента к применению по назначению в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов обслуживания, когда применения элемента по назначению исключено [2]:

$$K_r = \frac{T}{T + T_B},$$

где T – средняя наработка на отказ, ч; T_B – среднее время восстановления отказа, ч.

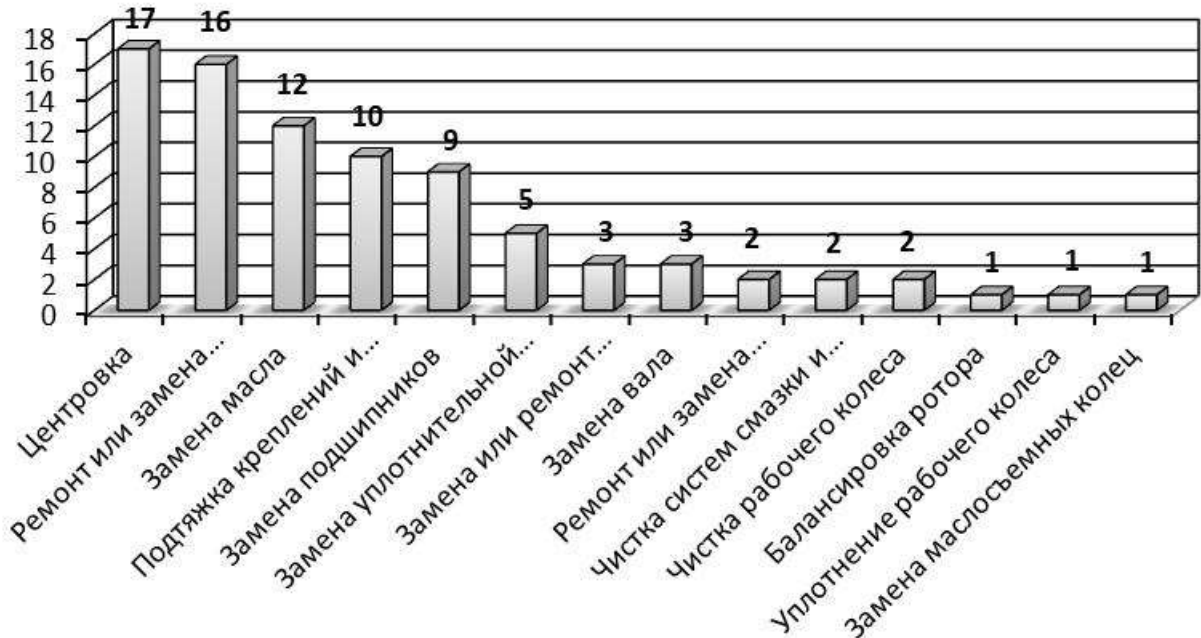


Рисунок 1. Количество ремонтов насосов по типам ремонтных операций.

Время восстановления насосов оценивалось по нормативным величинам [3-5].

Оценка коэффициентов готовности насосов представлена на рисунке 2.

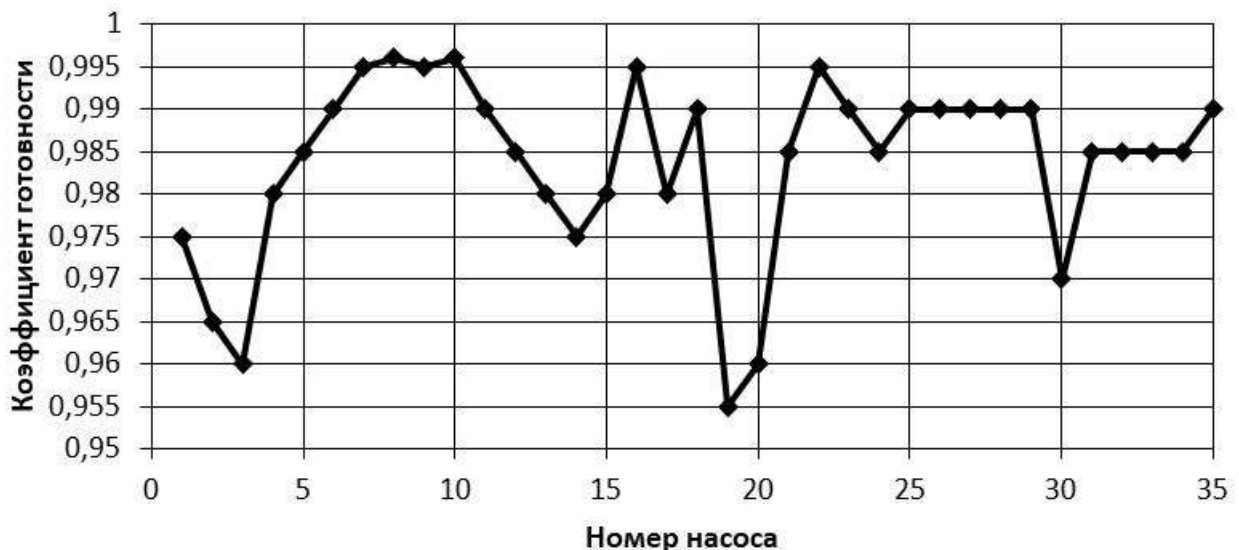


Рисунок 2. Оценка коэффициента готовности.

На рисунке 3 представлена интенсивность отказов анализируемых насосов. Из рисунка 3 можно определить наработку, характеризующуюся

началом зоны скачкообразного увеличения интенсивности отказов– 4100 ч. Указанное скачкообразное увеличение характеризует предельное время наработки на отказ.

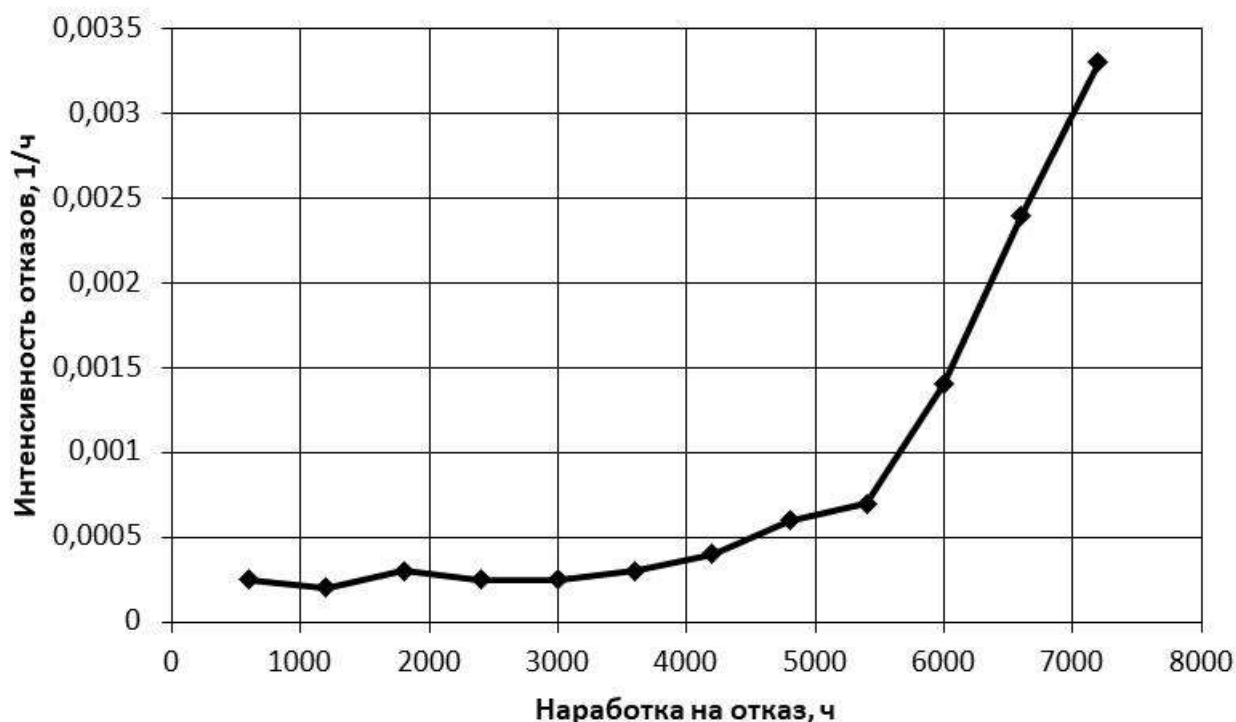


Рисунок 3. Оценка коэффициента готовности.

По достижению данной наработки возникает вероятность внезапных отказов, проявляется влияние износа деталей.

Список используемых источников

1. Томазова, О.В. Формирование системы технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию нефтяного оборудования / О.В. Томазова // Вопросы экономики и права : науч. информ. журнал / ООО Экономические науки. – Москва ; Роспечать, 2012. – № 48. – С. 55–59.

2. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Надежность машин. Т. IV-3 / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. 2003. – 592 с., ил.

3. РД 39-0148139-0001-2000 Система технического обслуживания и ремонта компрессорных станций на базе технической диагностики. – Сургут: СПКТБ «НЕФТЕГАЗМАШ», 2000. – 71 с.

4. Сборник норм трудоёмкости технического обслуживания и ремонтов насосов и станков-качалок. – Сургут: ООО СПКТБ НЕФТЕГАЗМАШ, 2021. – 99 с.

5. Единые нормы времени на ремонт лопастных и роторных насосов в нефтяной промышленности : Утв. М-вом нефт. пром-сти 30.05.84. – М.: МНП, 1984. – 163 с.: ил.

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ АТОМОВ НА ГРАНИЦЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Полякова П.В.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
polina.polyakowa@yandex.ru;
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа.*

В последнее время актуальным объектом исследований являются композиты с алюминиевой (Al) металлической матрицей, поскольку подобные материалы обладают улучшенными механическими свойствами что в результате открывает широкую перспективу их применения в аэрокосмической, авиационной, автомобильной промышленности. Ранее было показано, что одним из возможных способов получения подобных композитов является кручение 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 экспериментах подобные особенности структурных и фазовых превращений не всегда возможно рассмотреть детально, в таком случае могут быть использованы различные методы моделирования, в частности метод молекулярной динамики (МД).

В данной работе методом МД исследуется процесс взаимной диффузии атомов Al и Ti (Mg, Cu) на границе между разнородными металлами под действием деформационной обработки. В качестве деформационной обработки выбрано одноосное сжатие перпендикулярно границе перемешивания атомов, в комбинации с деформацией сдвига в плоскости границы. Для исследования прочности и механизмов разрушения полученных композитных структур проводится одноосное растяжение перпендикулярно границе.

Моделирование осуществляется с использованием программного пакета LAMMPS. Визуализация данных моделирования и структурный анализ выполняется с помощью программы OVITO. Для описания взаимодействия между атомами используются межатомные потенциалы EAM (embedded atom method), рассчитанные специально для систем Al/Mg [5], Al/Ti [6] и Al/Cu [7]. С помощью термостата Носе-Хувера в системе поддерживается постоянная температура 300 К.

В качестве начальных структур выбраны кубические образцы, размерами $L_x = L_y = L_z \approx 100 \text{ \AA}$. Нижняя часть кристалла всегда представляет собой слой атомов Al, а верхняя часть кристалла – другой металл (Me) (Mg, Ti или Cu) (см. рис. 1). Расстояние между двумя кристаллами принимается равным среднему значению параметров решетки обоих металлов $(a_1 + a_2)/2$, что составляет 3.6 Å для Al/Mg, 3.5 Å для Al/Ti, 3.8 Å для Al/Cu. Начальная атомная структура

формируется путем объединения двух совершенных кристаллов с помощью программы, периодические граничные условия применяются вдоль осей x , y и z .

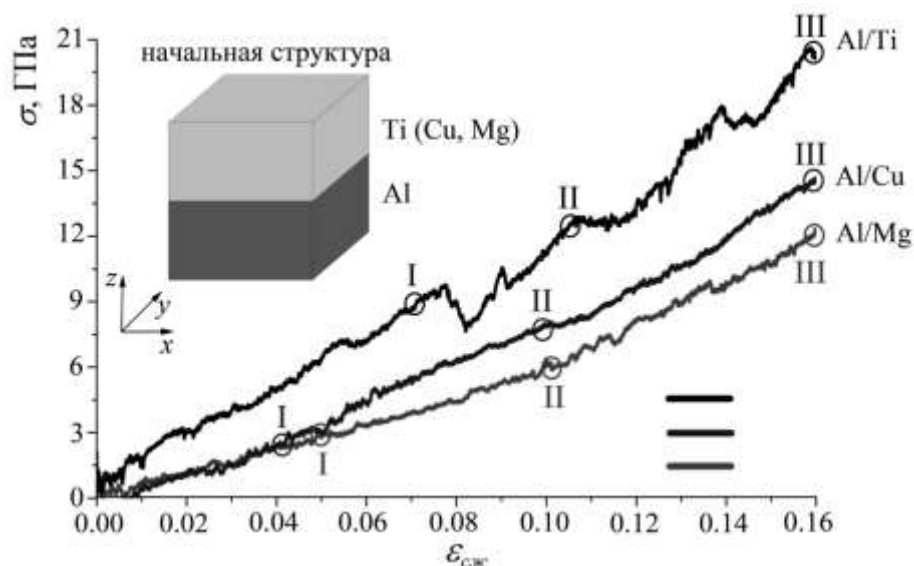


Рисунок 1. Кривые напряжение-деформация при одноосном сжатии перпендикулярно границе перемешивания атомов. Схема начальной структуры.

На кривых напряжение-деформация (рис. 1) наблюдаются несколько скачков напряжения, которые можно объяснить высвобождением энергии, накопленной во время деформации, за счет активности дефектов. До точки I наблюдается упругая деформация для Al/Ti и Al/Cu, а для Al/Mg - до точки II. Однако точка I ($\epsilon_{сж}=0.04$) для Al/Mg была выбрана для дальнейшего анализа, так как на этом участке кривые напряжения-деформации для Al/Mg и Al/Cu практически совпадают.

Для исследования механических свойств полученных композитных структур проводится одноосное растяжение перпендикулярное границе перемешивания атомов после комбинированного сжатия до разных степеней деформации, отмеченных на рис. 1 точками I, II, III. После сжатия до $\epsilon_{сж}=0.16$ для композитов Al/Ti и Al/Cu разрушение происходит в Al части, а для Al/Mg – в Mg части. Таким образом, граница, где произошло перемешивание атомов, прочнее чем в части чистого металла.

Молекулярно-динамическое моделирование позволило на атомистическом уровне исследовать перемешивание атомов Al и Mg (Ti, Cu) в процессе одноосного сжатия комбинированного с деформацией сдвига [8-11]. Настоящая работа представляет собой упрощение сценария, экспериментально наблюдаемого ранее для получения композитов Al/металл методом КГД. Установлено, что глубина диффузии атомов Al и атомов другого Me (Mg, Ti, Cu) зависит от приложенной деформации, а не от температуры. Наблюдается линейная зависимость между глубиной диффузии и приложенной деформацией для Al/Mg, в то время как для Al/Ti и Al/Cu эта зависимость является логарифмической. Из испытаний на растяжение установлено, что после достижения критического уровня сжатия, значительного упрочнения

пограничной области не наблюдается. Однако, чем выше приложенная деформация сдвига, тем выше прочность композитной структуры.

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. 030028.
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. Anisotropic surface segregation in AlMg alloys Liu, X.-Y., Ohotnicky, P.P., Adams, J.B., Rohrer, C.L., Hyland, R.W. // Surface Science. 1997. V. 373. P. 357–370.
6. Interatomic potentials for atomistic simulations of the Ti-Al system / R. R. Zope and Y. Mishin // Physical Review B – 2003. – V. 68. – P. 024-102.
7. Simple analytical embedded-atom-potential model including a long-range force for FCC metals and their alloys / Cai, J., Ye, Y.Y. // Physical Review B – 1996. – V. 54. – P. 8398–8410.
8. Molecular dynamics simulation of structural transformations in Cu-Al system under pressure / P.V. Polyakova, K. S. Nazarov, R. Kh. Khisamov, J. A. Baimova // Physics: Conference Series. – 2020, V.1435.
9. Сдвиговые деформации как способ получения композитной структуры Al-Cu: атомистическое моделирование / П.В. Полякова, Ю.А. Баимова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17 – № 4.
10. Molecular dynamics simulation of diffusion in Mg-Al system under pressure / P.V. Polyakova, J.A. Baimova // Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1008. – P. 012-052.
11. Fabrication of magnesium-aluminum composites under high-pressure torsion: atomistic simulation / P.V. Polyakova, J.A. Pukhacheva, S.A. Shcherbinin, J.A. Baimova, R.R. Mulyukov // Applied Sciences. – 2021. – V. 11, 6801.

ОЦЕНКА ФОРМУЕМОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СВМПЭ НА ОСНОВЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРЕССОВОК

Кожарина Т.В., Карпов С.В., Чуприкова А.А., Завражин Д.О.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
tata.vladimirovna@gmail.com*

Благодаря низкой плотности, коррозионной стойкости, прочности и низкой стоимости полимерные материалы получили широкое применение. Постоянное улучшение эксплуатационных свойств обеспечивает возможность их применения в специальных целях, особенно в качестве полноценной замены металлам и сплавам. При этом во многих случаях требуется изготовление сложной геометрии. Но использование механической обработки оказывает негативное влияние на трибологические и физико-механические свойства полимерных изделий. В связи с этим перспективным методом изготовления изделий, реализуемым в одну технологическую операцию, является твердофазная переработка на основе пластического деформирования в специальных пресс-формах. Однако, в этом случае возникают сложности, связанные с необходимостью отработки и обоснования рациональных режимов прессования.

Среди потенциальных новых областей применения полимерных материалов можно рассматривать сельскохозяйственное машиностроение, где они могут быть применены в качестве дополнительной защиты почвообрабатывающих органов от интенсивного абразивного износа. Примером такого материала может служить СВМПЭ, который обладает следующими свойствами:

1. очень низкое водопоглощение и отсутствие негативного изменения свойств при воздействии воды;
2. устойчивость к воздействию большинства кислот и щелочей, ультрафиолетового и гамма-излучения, а также микроорганизмов;
3. низкая плотность (в 8 раз меньшая, чем у сталей) и высокая усталостная прочность, что обеспечивает конкурентоспособность изделия из СВМПЭ по показателю “прочность/собственный вес” с изделиями из низкопрочных конструкционных сталей и даже превосходить их.
4. очень высокая износостойкость, низкий коэффициент трения и высокая вязкость разрушения (низкотемпературная надежность)

Тем не менее, из-за высоких молекулярной массы, вязкости и эластичности возникают проблемы с переработкой этого материала. Мы предлагаем метод твердофазной объемной штамповки СВМПЭ в металлических пресс-формах, при котором возможно получение сложной геометрии изделия за одну технологическую операцию. В этом случае актуальной задачей является отработка и обоснование режимов переработки

СВМПЭ. Кроме того, требуется учитывать стремление материала с течением времени восстанавливать свою исходную геометрию.

Для оценки геометрии был использован метод анализа полигональных моделей прессовок [1], который позволяет воспроизводить сложную геометрию с высокой точностью. Особый интерес вызывает поверхность изделий, сформированная при помощи объёмного твердофазного прессования. Ее значение можно использовать для количественной оценки степени соответствия полученной геометрии конечному изделию. Для этого можно использовать величину коэффициента формы изделия K_f , который рассчитывается как отношение номинальной сформированной поверхности (идеальной) к полученной поверхности.

В качестве объекта исследования были рассмотрены прямоугольные пластины 60x40x5 мм из СВМПЭ, которые размещались в металлической пресс-форме. Расположение заготовки в пресс-форме представлено на рис. 1. С помощью специальной формующей пластины 3 на обрабатываемой поверхности пластин формировалась специальная поверхность.

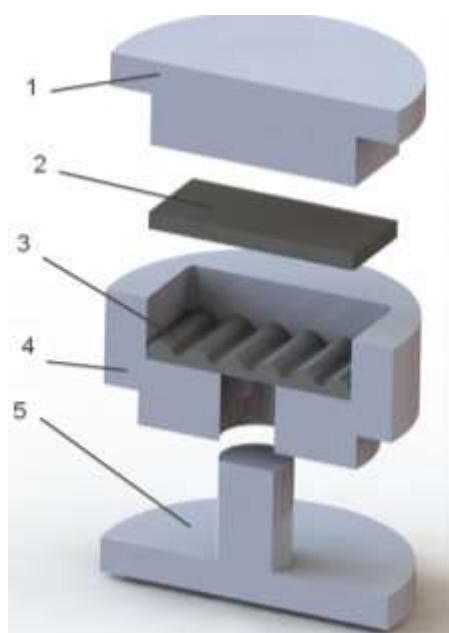


Рисунок 1. Расположение образца в пресс-форме:

1 - пуансон, 2 - заготовка, 3 - формующая пластина, 4 - матрица, 5 выталкиватель.

В ходе предварительных экспериментов абразивной стойкости бионических структур [2] было найдено, что структура кожи акулы [3] обладает повышенной стойкостью к истиранию. Данная геометрия была выбрана в качестве объекта, но изготовление точной копии невозможно, так как из-за острых углов и выступов во время прессования вместо пластической деформации происходит врезание вкладыша в заготовку. Следовательно, принято решение о корректировке геометрии: добавление плавных переходов между выступами и впадинами.

Было подготовлено 2 серии образцов по 7 штук каждая, которые выдерживались на лабораторном прессе при давлении 40 кт*с в течение 3 и 10 минут соответственно.

Прямоугольная заготовка 60x40 мм размещалась на формующей пластине 3 внутри матрицы 4, после чего прижималась пуансоном 1 и выдерживалась на лабораторном прессе при давлении 40 кт*с в течение 3 и 10 минут для серии “1” и “2” соответственно. По истечении времени прессования пресс-форма размыкалась при помощи выталкивателя 5, после чего происходило сканирование геометрии полученной прессовки.

После извлечения из пресс-формы образцы были отсканированы при помощи 3Д-сканера EinScan Pro 2X Plus, далее полученная полигональная геометрия подвергалась пост-обработке в системе автоматизированного проектирования Autodesk Fusion: для всех образцов были найдены значения площадей выступов (всего 5 полных выступов). Далее аналогичные измерения были реализованы через 7, 14 и 21 день.

Далее были рассчитаны значения K_f для каждого изделия в двух партиях. На рис. 2 представлены средние значения коэффициента формы для обрабатываемых образцов.

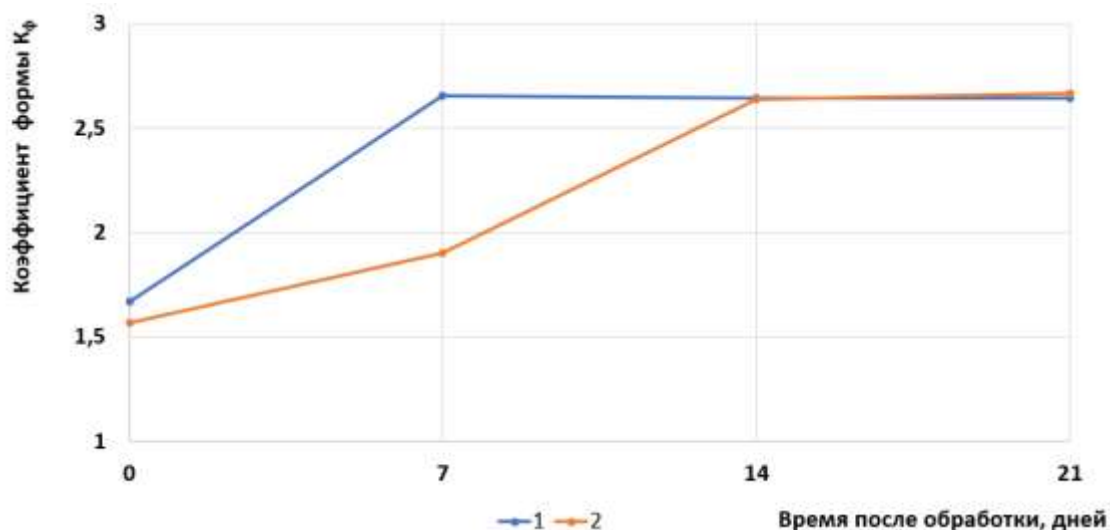


Рисунок 2. Значения коэффициента формы для двух серий образцов.

Как видно из рис. 2, значения K_f сразу после прессования различаются незначительно: 1,67 для партии “1” и 1,57 для партии “2”. По истечении недели разница увеличивается: 2,65 и 1,9 соответственно. По истечении двух недель значения коэффициента идентичны и составляют 2,64. Более долгая выдержка уже не влияет на значения K_f . Таким образом, при комнатной температуре значение времени выдержки оказывает незначительное влияние на геометрию получаемых прессовок. Однако с течением времени для СВМПЭ наблюдается значительное изменение полученной формы. После выдержки более чем на 2 недели сформированная поверхность образцов уменьшается более чем в 1,6 раза. Данное стремление материала к восстановлению своей начальной плоской формы необходимо учитывать при проектировании пресс-оснастки и отработке режимов прессования.

Еще один вывод состоит в том, что время выдержки под давлением не влияет на конечную геометрию изделий. От этого параметра зависит только

скорость восстановления профиля прессовок: для меньшего давления время возвращения к “равновесной” геометрии будет больше.

В данной работе была исследована формуемость СВМПЭ 9000 при одноосном прессовании в металлической пресс-форме при комнатной температуре. Показано, что при получении изделий сложной геометрии следует учитывать стремление материала к восстановлению своей начальной геометрии. Изменение сформированного профиля составило более чем в 1,6 раза, что необходимо учитывать при проектировании пресс-форм и условий технологического процесса твердофазной обработки.

Время выдержки изделий под давлением при комнатной температуре влияет только на скорость восстановления формы, но не влияет на конечную геометрию образца. Использованный анализ полигональных моделей является эффективным и высокоточным методом оценки формуемости полимерных материалов.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния температурного режима при твердофазной обработке полимерных материалов при получении аналогичной геометрии, оптимизированной для снижения абразивного износа.

Список используемых источников

1. Кожарина, Т.В. Разработка алгоритма 3Д-сканирования изношенных деталей для проведения конечно-элементного анализа / Т.В. Кожарина, С.В. Карпов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы VII Международной научно-практической конференции, Тамбов, 12–14 октября 2021 года. Том Выпуск 7. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2021. – С. 211-216. – EDN JWFP GK.

2. Карпов С.В., Кожарина Т.В. Анализ абразивного износа бионических структур // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Тамбов, 2021. Р. 192–194.

3. Fu Y.F., Yuan C.Q., Bai X.Q. Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces // Biosurf Biotribol. Elsevier BV, 2017. Vol. 3, № 1. Р. 11–24.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗБРОСА ПО ТОЛЩИНЕ ПЛЕНОК ЗОЛОТА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Шестериков А.Е., Шестерикова Д.А.

*Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники, shesterikov.a.e@mail.ru*

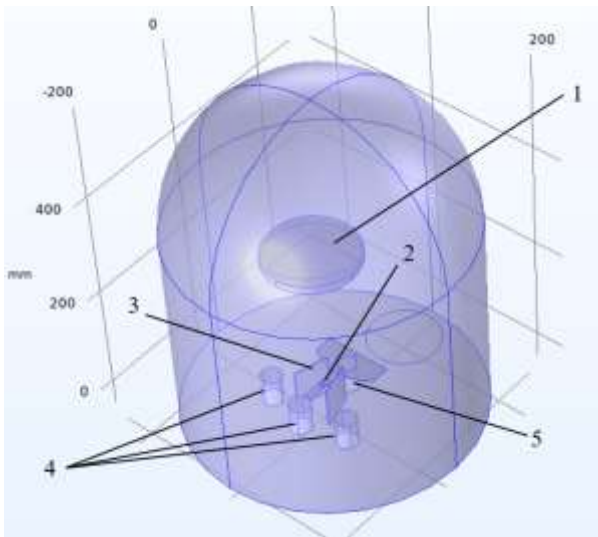
В работе представлен подход к моделированию процесса термического испарения золота. Представлены диаграммы разброса толщины пленок золота по поверхности подложки и стенок рабочей камеры установки напыления, которые могут быть использованы на практике для уменьшения числа экспериментов для постановки технологических процессов термического испарения.

Ключевые слова: тонкие пленки золота, термическое испарение, разброс по толщине.

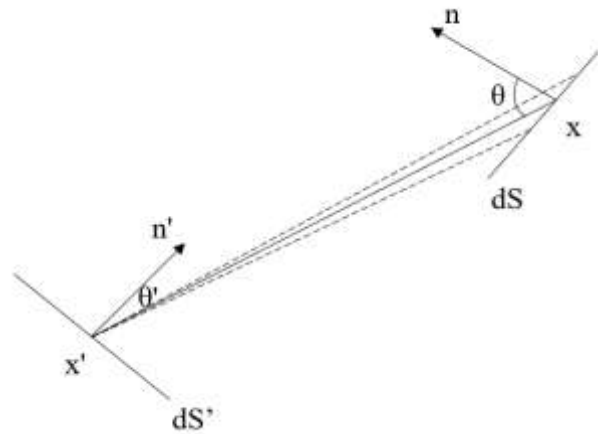
Тонкие пленки золота получили широкое распространение в микроэлектронике и нанотехнологиях. Золото является одним из основных материалов для формирования защитных покрытий для проводящих пленок. Благодаря своей высокой электропроводности пленки золота также используются для формирования омических контактов в полупроводниковой технологии совместно с титаном и палладием [1]. В производстве важной задачей является получение заданного разброса по толщине, что позволяет точно контролировать характеристики получаемых приборов. Для сокращения числа экспериментов, которые являются достаточно дорогостоящими при работе с золотом, перспективным направлением является математическое моделирование процессов напыления.

Методика моделирования. Моделирование процесса термического испарения золота выполнено в программе моделирования мультифизических процессов COMSOL Multiphysics с использованием модуля «Free Molecular Flow». На рис.1 представлены схемы камеры для термического испарения золота и распространения потока испаренных частиц.

Для описания процессов распространения частиц использовался метод угловых коэффициентов, который вычисляет молекулярный поток, суммируя потоки, поступающие на поверхность со всех других поверхностей в зоне прямой видимости [2].



а)



б)

Рисунок 5. Схемы рабочей камеры установки термического испарения (а) и распространения потока испаренных частиц (б): 1 – держатель с пластиной для напыления; 2 – испаритель; 3 – экран для разделения различных испарителей; 4 – выходы для подачи тока на испарители; 5 – вывод заземления.

Макроскопические переменные вблизи поверхности могут быть получены из кинетической теории. Граничное условие испарения определяет исходящий поток, используя следующее выражение:

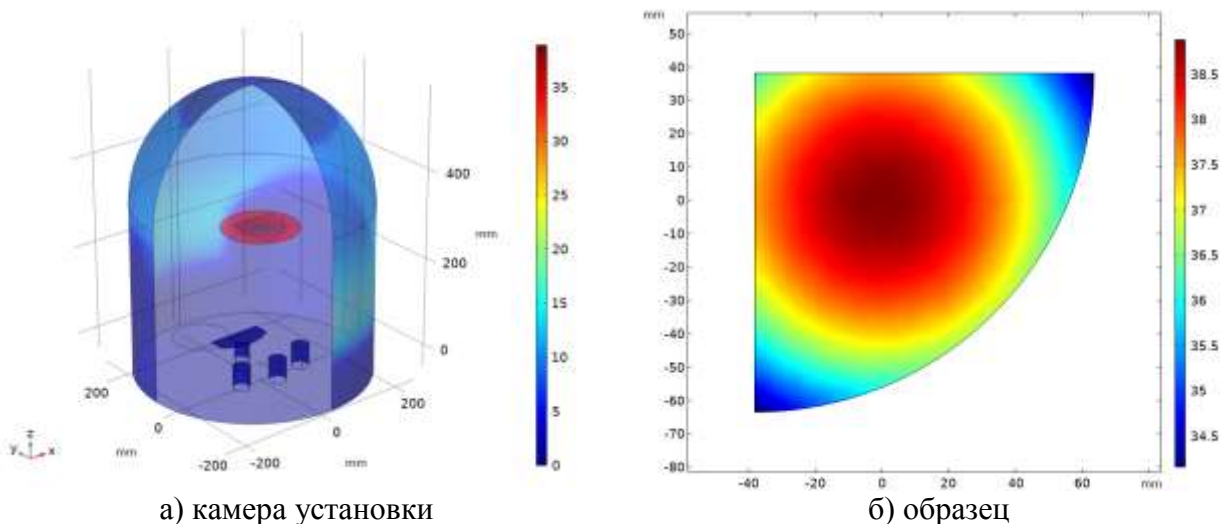
$$J = \alpha_v \cdot \left(\frac{N_A^2}{2 \cdot \pi \cdot M_n \cdot R \cdot T} \right)^{1/2} \cdot p_{vap}, \quad (1)$$

где α_v – коэффициент испарения;
 p_{vap} – давление пара вещества.

Поток частиц, падающий на поверхности камеры и подложек, описывается выражением (рисунок 2 (б)):

$$G_{3D} = \int_S \frac{J \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta'}{\pi \cdot r^2} dS = - \int_S \frac{J \cdot (n \cdot r) \cdot (n' \cdot r)}{\pi \cdot r^4} dS \quad (2)$$

Результаты моделирования. Зададим следующие начальные условия: температура испарителя $T_u = 2000$ К; температура окружающих поверхностей 293 К; давление насыщенного пара золота $p_{vap} = 50$ Па; расстояние от подложки до испарителя $h = 15$ см. На рисунке 2 (а) представлены результаты моделирования распределения толщины пленки по поверхностям камеры, а на рисунке 2 (б) по подложке после 60 с испарения.



а) камера установки
 б) образец
 Рисунок 2. Результаты моделирования распределения толщины пленки.

На рисунке 3 представлена зависимость толщины пленки от времени испарения, полученная по результатам моделирования.

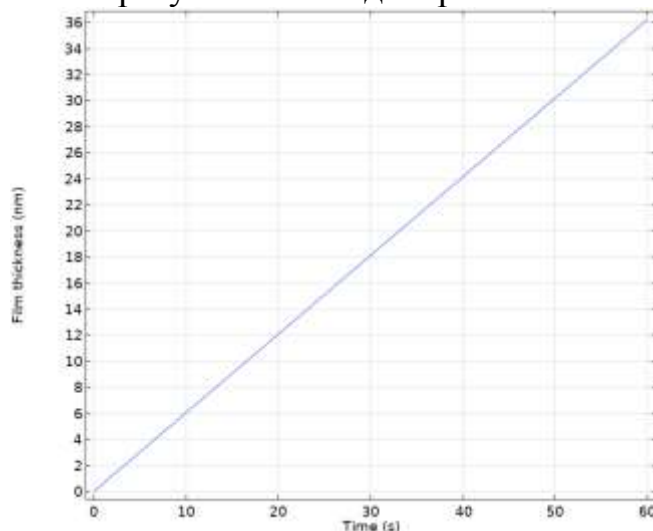


Рисунок 3. Зависимость толщины пленки от времени испарения.

По результатам моделирования можно заключить, что модель достаточно точно описывает процесс термического испарения золота и позволяет предсказывать разброс по толщине получаемых пленок, а также степень запыленности рабочей камеры.

Список используемых источников

1. Маскаева, Л. Н. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие / Л. Н. Маскаева, Е. А. Федорова, В. Ф. Марков; [под общ. ред. Л. Н. Маскаевой]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 236 с.
2. F. Celestini and F. Mortessagne, “Cosine Law at the Atomic Scale: Toward Realistic Simulations of Knudsen Diffusion”, *Phys. Rev. E*, vol. 77, 021202, 2008.

ПОДБОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ИНДЕКСОВ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПАВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ОЛЕОФОБНО-ОЛЕОФИЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Здерева А.В., Кровякова Е.И., Швец М.Е., Тришина А.В.,
Ростова Д.П., Бубнова Е.В., Дегтярев А.А.*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
alenazdereva@yandex.ru*

Изменение олеофильных свойств поверхности твердого тела находит прямое применение в технологии производства красителей. Благодаря олеофилизации становится возможным снизить энергозатраты производства, посредством перевода пигмента из водной среды в масляную. В качестве олеофилизаторов поверхности выступают катионные ПАВ.

Целью исследования является выбор оптимального метода расчета индексов реакционной способности ПАВ, используемых в качестве модификаторов поверхности твердых тел.

Эффективность ПАВ в качестве олеофилизаторов характеризуется индексами реакционной способности, а именно абсолютной жесткостью по Пирсону и индексом электрофильности [1]. Эти характеристики можно связать с такими величинами, как вертикальный потенциал ионизации и сродство к электрону, которые можно определить экспериментальным путем.

В качестве исследуемых веществ были выбраны следующие катионные ПАВ: триэтиламин, триэтаноламин, тетраэтиламмоний катион и хлорид тетраэтиламмония.

Для выбранных веществ произведен расчет потенциала ионизации и сродства к электрону постхарттрифовским методом, а именно EOM-DLPNO-CCSD [2], и, обладающими более низкой стоимостью, методом DFT с функционалами: B3LYP, PBE0, TPSS, TPSSh, TPSS0, CAM-B3LYP и ω B97x-D4.

Значения, полученные с помощью метода EOM-DLPNO-CCSD с базисом aug-cc-pVTZ, являются наиболее приближенными к экспериментальным данным [3]. Примем данный метод и базис как стандарт для сравнения. Этот метод обладает высокой стоимостью, целесообразнее будет использовать наиболее приближенный, но более легкий метод.

На рис. 11 представлены значения потенциала ионизации исследуемых веществ, рассчитанные выбранными методами. Более всего соответствуют стандарту функционалы ω B97x-D4 и CAM-B3LYP с базисом aug-cc-pseg-2.

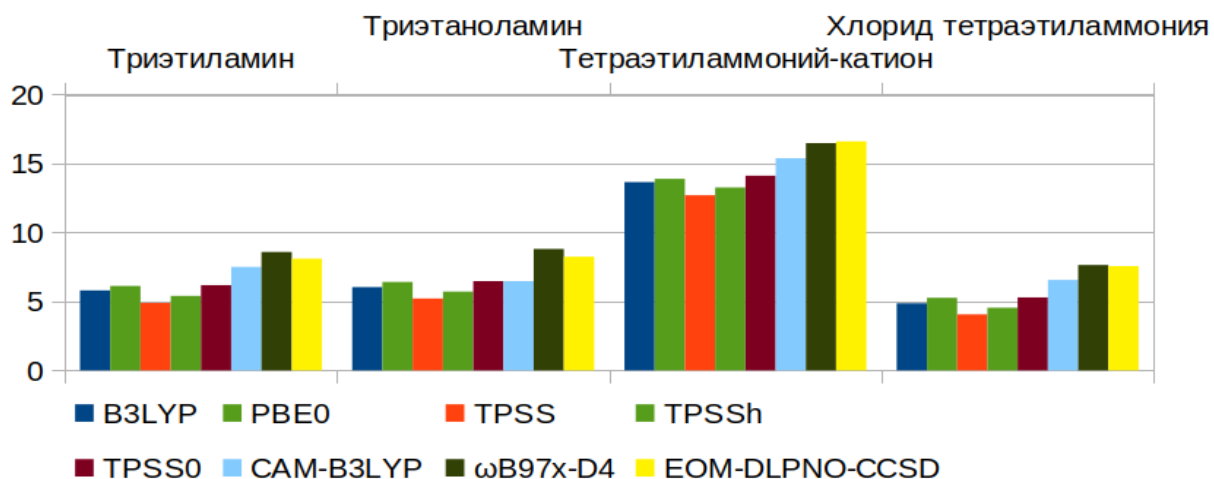


Рисунок 6. Сравнение значений потенциала ионизации для триэтиламина, триэтаноламина, тетраэтиламмоний катиона и хлорида тетраэтиламмония.

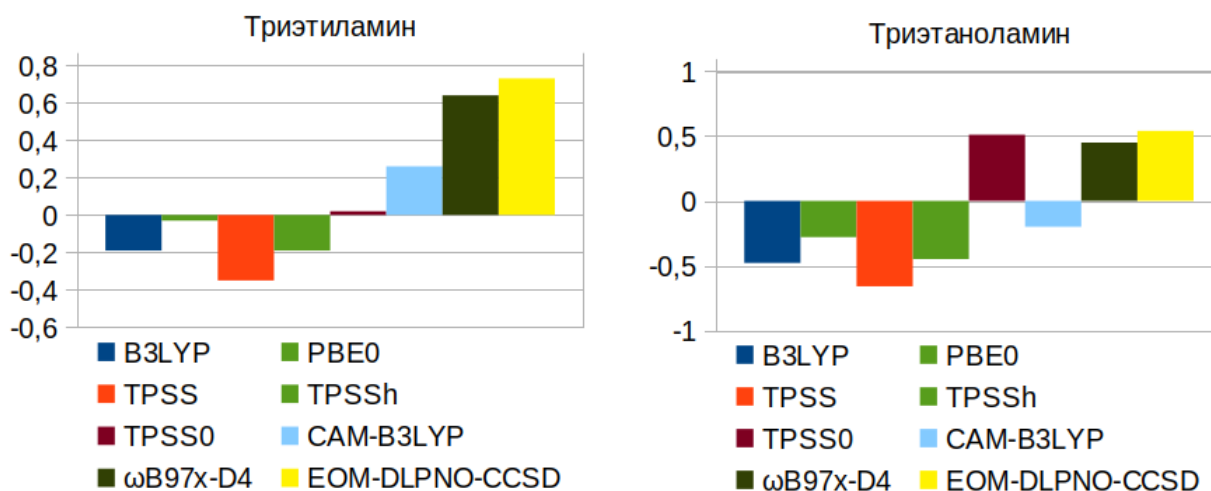


Рисунок 7. Сравнение значений сродства к электрону для триэтиламина и триэтаноламина.

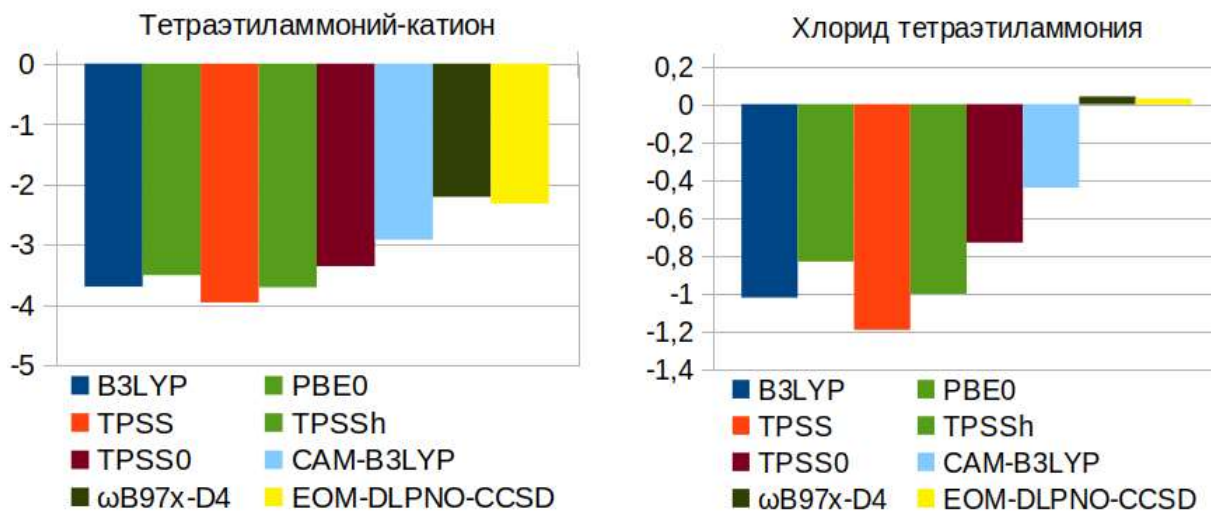


Рисунок 8. Сравнение значений сродства к электрону для тетраэтиламмоний катиона и хлорида тетраэтиламмония.

Сравнивая представленные на рис. 11 – 11. значения сродства к электрону, видим, что ближайшим к стандарту является функционал ω B97x-D4.

Исходя из полученных результатов, делаем вывод, что для одновременно расчета ИРС оптимальнее использовать функционал ω B97x-D4.

Для выбранного функционала необходимо определиться с используемым базисом. Сравнивая значения потенциала ионизации, представленные на рис. 11, с принятым выше стандартом, видим, что различия между ними невелико, поэтому для данной характеристики нет необходимости использования базисов с добавлением диффузионных функций.

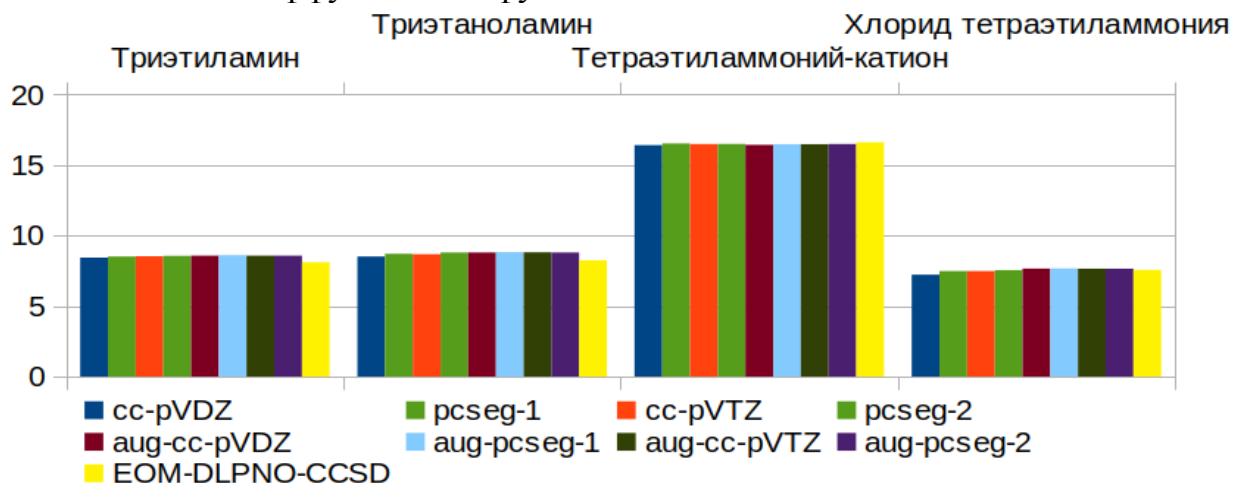


Рисунок 9. Сравнение значений потенциала ионизации для триэтиламина, триэтаноламина, тетраэтиламмоний катиона и хлорида тетраэтиламмония.

Анализ полученных значений сродства к электрону для исследуемых веществ (рис.11-11), свидетельствует о необходимости использования базисов с диффузионными функциями.

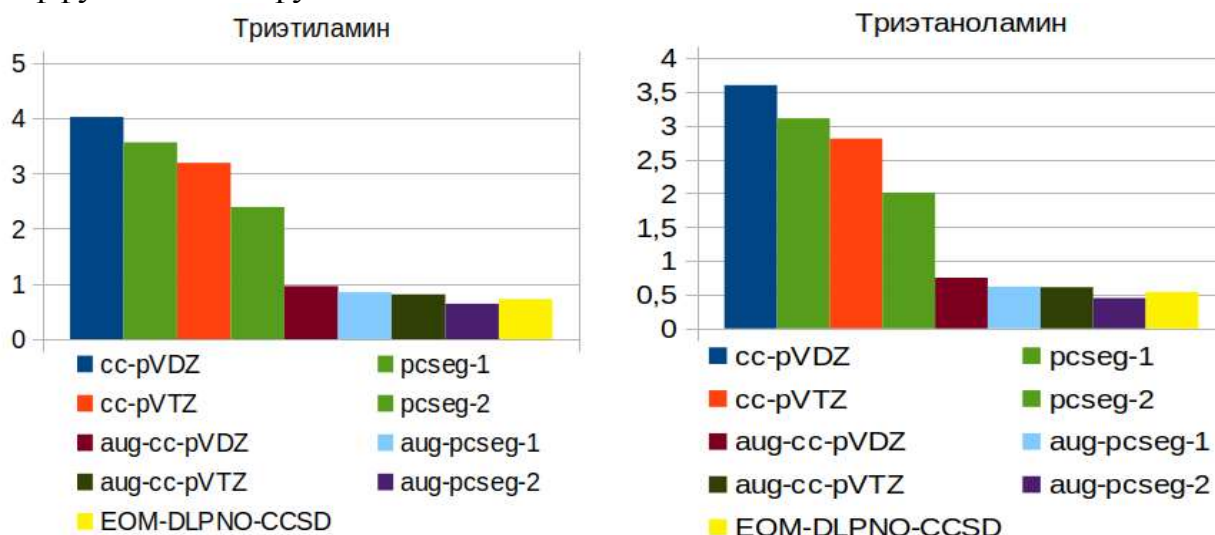


Рисунок 10. Сравнение значений сродства к электрону для триэтиламина и триэтаноламина.

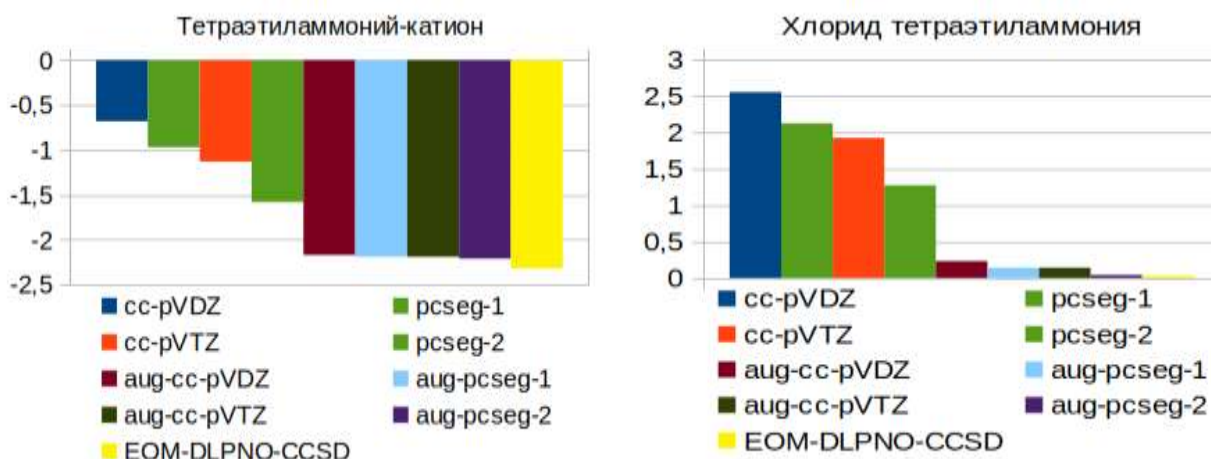


Рисунок 11. Сравнение значений сродства к электрону для тетраэтиламмоний катиона и хлорида тетраэтиламмония.

Выводы:

1) Был выбран оптимальный метод расчета индексов реакционной способности, а именно ω B97x-D4. При необходимости более точных расчетов, возможно использование метода EOM-DLPNO-CCSD.

2) При расчете сродства к электрону необходимо использовать базисные наборы с добавлением диффузионных функций. Для получения значений потенциала ионизации допустимо использование базиса без диффузионных функций.

Список используемых источников

1. Predicting the Possibility of Oleophilizing Surfaces of Copper Phthalocyanin on the Basis of Reactivity Descriptors / A.A. Degtyarev, A.V. Trishina, T.P. Dyachkova [et al.] // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2020. – Vol. 94. – No 8. – P. 1694-1698. – DOI: 10.1134/S0036024420080051.

2. Accurate Computation of the Absorption Spectrum of Chlorophyll a with Pair Natural Orbital Coupled Cluster Methods / Abhishek Sirohiwal, Romain Berraud-Pache, Frank Neese, Róbert Izsák, and Dimitrios A. Pantazis // The Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 124. – No 40. – P. 8761-8771. – DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c05761.

3. NIST Chemistry WebBook, SRD 69: [Электронный ресурс]. – URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C121448&Units=SI&Mask=20#Ion-Energetics/> (дата обращения: 17.08.2022).

ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КАК ОДИН ИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТА ГРАФЕН/Cu: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

Сафина Л.Р.

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа,
saflia@mail.ru*

Графен представляет собой моноатомный слой атомов углерода, уложенных в гексагональную решетку. Благодаря превосходным механическим и физическим свойствам графен в виде упрочняющей добавки может значительно улучшить свойства другого материала [1]. К настоящему моменту уже были получены композиты на основе графена и таких металлов как Ni, Cu и Al, обладающие улучшенными механическими и физическими свойствами [2-6]. Такие композиты обладают повышенной прочностью по сравнению с чистыми металлами за счет прочности графена. В данной работе методом молекулярной динамики (МД) исследуется процесс получения композита на основе наночастиц Cu и скомканного графена посредством деформационно-термической обработки и анализируются механические свойства полученного материала.

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 проводятся в свободно распространяемом пакете молекулярно-динамического моделирования LAMMPS. Во всех случаях используются периодические граничные условия. Общее число атомов в системе графен/Cu составляет 16 000, где $N_C=14\,592$ и $N_{Cu}=1\,408$. Для описания межатомных взаимодействий применяются два потенциала – потенциал AIREBO для взаимодействия C-C и потенциал Морзе для описания взаимодействий Cu-Cu и C-Cu. Для описания взаимодействия Cu-Cu были выбраны параметры, предложенные в работе [7]: $D_e = 0.3429$ эВ, $\beta = 1.3588$ 1/Å и $R_e = 2.6260$ Å. Взаимодействия атомов C-Cu описывались параметрами, предложенными в работах [8, 9]: $D_e = -0.100$ эВ, $\beta = 1.700$ 1/Å и $R_e = 2.220$ Å.

На рис. 1 показан пример исследуемой структуры: (а) скомканный графен, заполненный наночастицами Cu, показанный в процессе получения композита. К начальной структуре (рис. 1а) применяются три этапа обработки: I этап – выдержка скомканного графена, заполненного наночастицами Cu, при комнатной температуре (рис. 1б); II этап – предварительное сжатие при 300 К для устранения лишних пор (рис. 1с); III этап – гидростатическое сжатие при температуре 1000 К (рис. 1д). Температура гидростатического сжатия 1000 К выбрана с целью активации новых химических связей между чешуйками графена [2, 3].

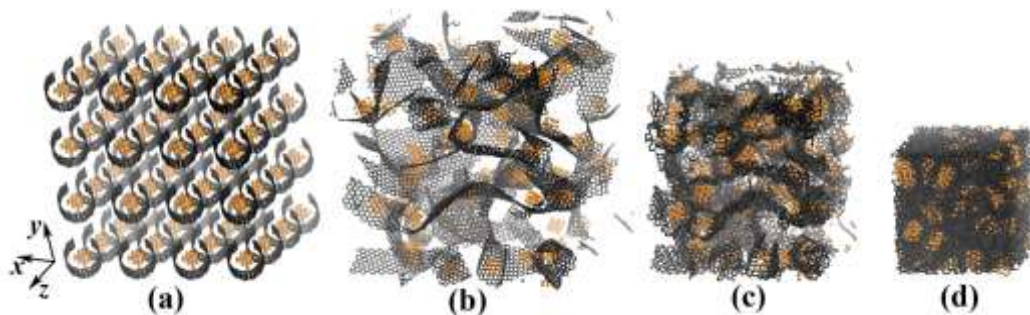


Рисунок 1. Пример скомканного графена, заполненного наночастицами Cu: (a) начальная структура, (b) после выдержки при 300 К, (c) после предварительного сжатия и (d) после гидростатического сжатия при 1000 К. Атомы углерода показаны черным, а атомы меди показаны оранжевым.

После того как было проведено сжатие исходной рыхлой структуры, исследованы прочностные характеристики композита, что позволит установить был ли сформирован единый композитный материал в процессе деформационно-термической обработки. На рис. 2 показана зависимость напряжения от деформации при одноосном растяжении структуры графен/Cu. Результаты моделирования показывают, что модуль упругости композита на основе скомканного графена и наночастиц Cu составляет 284 ГПа. Нужно отметить, что даже при высокой степени деформации ($\varepsilon = 2.0$) растягивающее напряжение продолжает расти; предел прочности при растяжении не достигнут.

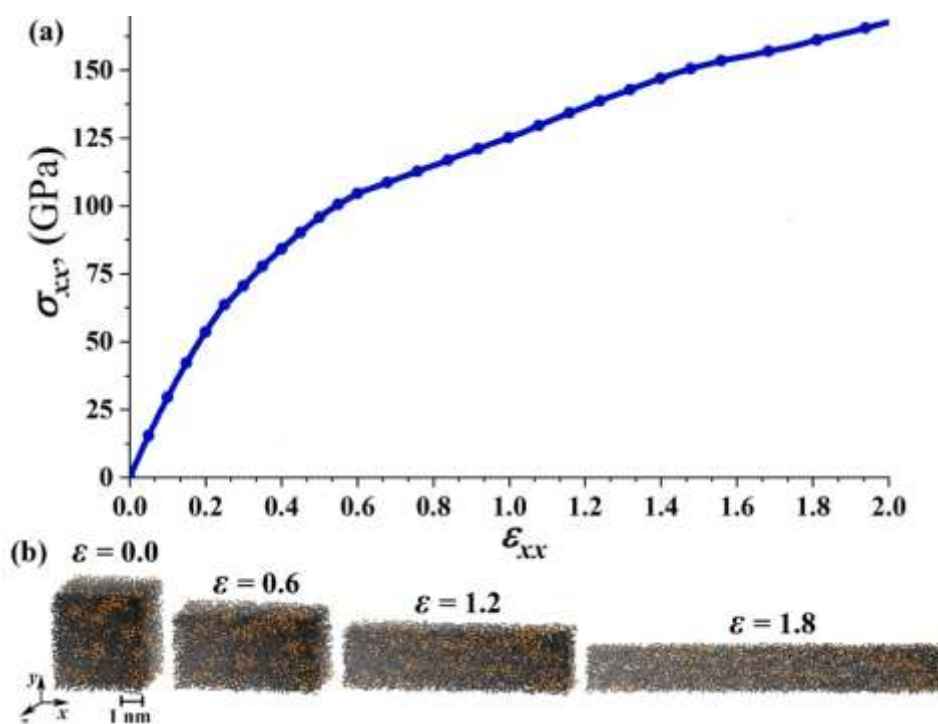


Рисунок 2. (a) Зависимость напряжения от деформации при одноосном растяжении для композита графен/Cu. (b) Структура композита графен/Cu в процессе одноосного растяжения при разных степенях деформации. Цвета как на рис. 1.

Поскольку температура плавления наночастиц Cu значительно ниже ($T_{пл} = 723$ К), чем температура гидростатического сжатия ($T_{сж} = 1000$ К), наночастицы Cu плавятся, под давлением принимают любую форму и легче

деформируются. Этим объясняется появление большого количества новых ковалентных связей в структуре между атомами углерода и, за счет этого, высокие показатели механических свойств.

В результате моделирования выявлено, что заполнение скомканного графена наночастицами Cu приводит к формированию прочного композитного материала при использовании деформационно-термической обработки, что ранее было показано и для композита с Ni [2, 3]. Установлено, что композит графен/Cu обладает высокими показателями механических свойств, что объясняется формированием прочной графеновой матрицы. При этом атомы Cu будут определять физические свойства итогового композита.

**Работа выполнена в рамках гранта Республики Башкортостан для молодых ученых.*

Список используемых источников

1. Kurbanova, E.D. The comparative analysis of dependence on temperature of diffusion and strength characteristics of graphene reinforced Al, Ni and Ti films. / E.D. Kurbanova, V.A. Polukhin, and A.E. Galashev. // Lett. Mater. – 2016. – V. 6. – P. 271–275.
2. Ni-Graphene Composite Obtained by Pressure–Temperature Treatment: Atomistic Simulations. / L.R. Safina [et al.]. // Phys. Status Solidi RRL. – 2021. – P. 2100429.
3. Safina, L.R. Molecular dynamics study of the mechanical properties and deformation behavior of graphene/metal composites. / L.R. Safina, K.A. Krylova, J.A. Baimova. // Mater. Today Phys. – 2022. – V. 28. – P. 100851.
4. Largely enhanced thermal conductivity of graphene/copper composites with highly aligned graphene network. / K. Chu [et al.]. // Carbon. – 2018. – V. 127. – P. 102-112.
5. Facile synthesis of high-performance carbon nanosheet/Cu composites from copper formate. Z. Shi [et al.]. // Carbon. – 2020. – V. 165. – P. 349-357.
6. Strengthening and toughening mechanisms in graphene-Al nanolaminated composite micro-pillars. / S. Feng, [et al.]. // Acta Mater. – 2017. – V. 125. – P. 98-108.
7. Girifalco, L. A. Application of the Morse potential function to cubic metals. / L. A. Girifalco, V.G. Weizer // Physical Review. – 1959. – V. 114 – P. 687-690.
8. Morse, Ph.M. Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. Vibrational levels. / Ph.M. Morse // Phys. Rev. – 1929. – V. 34. – P. 57-64.
9. Ikawa, N. Minimum thickness of cut in micromachining. / N. Ikawa, S. Shimada, H. Tanaka. // Nanotechnology. – 1992. – V. 3. – P. 6-9.

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Андрющенко А.В., Королькова Е.М.

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,
15.05.02.al@gmail.com*

Цифровая трансформация (ЦТ) - это процесс полной замены ручных, традиционных и устаревших способов ведения бизнеса новейшими цифровыми альтернативами. Подобное определение затрагивает не только технологии, но и все аспекты бизнеса. Переход к цифровой трансформации позволяет организации реагировать на постоянные «приливы» и «отливы» рынка. Такое полное и фундаментальное изменение требует полного пересмотра культуры бизнеса, операций, технологий. По мере того, как организации начинают осуществлять процесс перехода на цифровые технологии, это сказывается на продуктах и услугах, каналах маркетинга и распределения, бизнес-процессах, цепочках поставок и новых партнерах на рынке.

Термин «цифровая трансформация» является темой изучения и дебатов на протяжении десятилетий. Фактически, в 1990-е годы индустрия розничной торговли начала транслировать рекламные кампании в средствах массовой информации, что было на переднем крае цифровой трансформации. Хотя покупки совершались на физических витринах магазинов, процесс уже начался. Затем, начиная с 2000-х годов, платформы социальных сетей и мобильные устройства привели к появлению радикально новых способов общения и ведения бизнеса. Клиенты привыкли ожидать, что бизнес будет доступен им мгновенно и по нескольким каналам. Индивидуальная цифровая коммуникация в режиме реального времени стала не только возможной, но и нормой. Наряду с этой эволюцией появились новые способы оплаты покупок, такие как PayPal, Venmo и Zell [1]. Все больше и больше онлайн-коммерции и веб-транзакций захватывают не только розничную торговлю, но и банковское дело и сферу услуг. Сейчас компании используют огромные объемы персональных данных, генерируемых через социальные сети и мобильные устройства, для повышения качества обслуживания клиентов. В результате этой постепенной трансформации организации отмечают, что новые технологии могут улучшить практически каждый процесс в цепочке создания стоимости, от взаимоотношений с клиентами и поставщиками до маркетинга продуктов и услуг. Внедрение новейших технологий также может открыть новые источники дохода. А благодаря надежным технологиям CRM компании могут предоставлять отзывчивую обратную связь, которая стимулирует продажи. Очевидно, что постоянные сбои в технологическом прогрессе вынуждают предприятия переходить на цифровые технологии, чтобы выжить. Потребители ожидают большего цифрового опыта и часто отказываются от тех, кто его не

предоставляет. Несмотря на то, что внедрение новых технологий сопряжено с определенным риском, потенциальные выгоды могут сделать цифровизацию по-настоящему ценной. Недавние исследования подтверждают это [1]. Хотя прогресс цифровой трансформации еще не достиг всех секторов, те, которые адаптируются к новым и развивающимся рынкам, имеют больше шансов сохранить доход по мере изменения источников прибыли. Фактически, исследование McKinsey [1] выявило четкую связь между экономическими показателями и внедрением интегрированных цифровых процессов. Но, несмотря на то что в будущем все больше усилий будет направлено на цифровизацию, неясно, сколько инвестировать в неё и какими способами. Более того, как и ожидалось, некоторые цифровые шаги, по-видимому, приносят более высокую отдачу, чем другие. Чем глубже исследователи погружались в сложный процесс цифровой трансформации, тем более сложными становились возможные стратегии. Похоже, что успех в цифровых инвестициях сильно варьируется в зависимости от отрасли, поэтому более пристальный взгляд на лидеров на собственном рынке будет лучшим показателем того, чему уделять приоритетное внимание в первую очередь.

Согласно исследованиям различных аналитических агентств, около 70% инициатив по цифровой трансформации заканчиваются провалами [2]. Учитывая важность и стоимость таких программ, такой процент скорее не обусловлен снижением приоритета мероприятий по отслеживанию процедур ЦТ для предприятия. Так в чем же дело? Мы можем выделить несколько наиболее распространенных причин.

1. Недостаточная подготовка: причины и общие цели изменений неясны; отсутствие единой всеобъемлющей стратегии; недостаточно времени, выделяемого на планирование и внедрение изменений.

2. Нежелание лидеров: приказы, а не участие; недостаточные знания и опыт в внесении изменений; отсутствует инициативная квалифицированная команда, способная вносить изменения.

3. Неоптимальная коммуникация: изменения осуществляются изолированно; сбивающее с толку общение; недопонимание программы изменений; сотрудники и менеджеры по-разному понимают результат.

4. Неправильные инструменты: методология управления изменениями не подходит бизнесу; сосредоточение внимания на знаниях, а не над тем, что делать; ожидание мгновенного успеха.

5. Неоптимальная идентификация и решение проблем: отсутствие системы выявления проблем и управления ими; изменения во внешней среде происходят быстрее, чем мы реагируем; решения не выполняются; несоответствие целей, задач и этапов выполнения; попытки найти готовые рецепты, а не решать свои собственные проблемы; изменения накладываются на изменения; среднее и линейное руководство жертвует изменениями во имя операционной деятельности; конфликт интересов подразделений.

Каковы шаги к успешной цифровой трансформации? В то время как цифровая трансформация быстро проникает во все сектора рынка, стратегическое решение о цифровизации и его реализация разделены огромной

пропастью вариантов и подводных камней. Многие эксперты взвесили это. Рекомендуемые методы сводятся к нескольким основным шагам [1].

1. Определение цели. Старая поговорка “Невыполнение плана - это планирование провала” никогда не была так верна, как в процессе принятия решения о том, где и как адаптировать новые технологии. Предприятие должно решить, чего оно хочет достичь, прежде чем начать путь цифровой трансформации. Что является целью - улучшить удержание клиентов и доходы, повышение производительности, упрощение управления услугами, повышение оперативности и гибкости, дифференциации предложений? Очевидно, что многие цели могут быть достигнуты с помощью технологий, но не столь очевидны те, которые имеют решающее значение для данного предприятия.

2. Изучение ведущих технологических предложений. Сегодняшние прорывные технологии очень быстро становятся основой завтрашнего дня. Поддержание осведомленности обо всем, что доступно, может увеличить возможности получения выгод для бизнеса. Это требует творческого подхода к потенциалу каждой новой технологии и к тому, как ее можно было бы использовать.

3. Проектирование архитектуры. Решение о том, какие новые цифровые предложения внедрять, - это всего лишь первый шаг к цифровизации. Она должна быть сосредоточена не только на “что”, но и на “как” любых новых усилий. Превратит ли организация DevOps в облачную деятельность? Будут ли новые приложения использовать интеллектуальную автоматизацию? Эти вопросы будут определять стоимость и масштабы цифровой трансформации, а также структуру экосистемы платформы.

4. Формирование гибкой платформы. Вполне вероятно, что платформа, соответствующая целям организации, будет представлять собой высоковиртуализированную и распределенную сеть поставщиков. Для практической реализации предприятия выбирают из множества вариантов по принципу оптимизации инфраструктуры и упрощения управления, не забывая при этом о пользовательском опыте и преобразовании бизнес-сервисов. Бесспорно, чтобы быть успешной, цифровая трансформация должна быть итеративной, отзывчивой и гибкой.

Список используемых источников

1. Что такое цифровая трансформация? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hpe.com/ru/ru/what-is/digital-transformation.html> - Загл. с экрана.

2. Перспективы цифровой трансформации в России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [PowerPoint Presentation \(ac.gov.ru\)](https://www.ac.gov.ru) - Загл. с экрана.

СПЕЦИФИКА ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Орцуева Б.И., Тайсумова Х.В.

Чеченский государственный педагогический университет, Грозный.

ortsuevabanata@mail.ru

Современный менеджмент неразрывно связан с инновациями. Инновационный менеджмент на современном этапе стал важнейшим фактором научно-технического развития экономик стран мира. Согласно принципам инновационного менеджмента нововведения, во всех областях и сферах деятельности напрямую определяют будущий рост страны.

От традиционного менеджмента управление инновациями отличается ее тесной связью с нестабильными условиями организации, высоким уровнем риска и степенью нестабильности. Поэтому инновационный менеджмент предполагает разработку особых методов и подходов принятия управленческих решений. Технология и технологический процесс - одни из основных понятий в инновационном менеджменте.

Конечным результатом инновационного менеджмента выступает принятое новое рациональное решение, направленное на создание изобретения, проведение исследовательских работ, организацию производства и реализацию нового товара и усилению конкурентных позиций.

Для достижения цели учитываются ряд факторов:

- наличие источника идей с большим потенциалом;
- отбор проектов с надлежащим экономическим обоснованием;
- соответствие инноваций целям компании и рынку сбыта;
- способность предприятия внедрять новые решения;
- эффективность методов управления проектами и наличие четкого контроля над их реализацией;
- ответственность за полученный результат коллективно и индивидуально.

Добиться желаемого результата возможно решением ряда задач инновационно-технологического менеджмента.

| Область инновационного менеджмента | Задачи |
|------------------------------------|---|
| Зависимые от внутренних факторов | Разработка разделов бизнес-плана инновационного проекта Анализ продуктивности инновационного проекта Обеспечение сохранности производственных инноваций |

| | |
|-------------------------------|---|
| Зависимые от внешних факторов | Осознание возможности и обязательности реализации производственных инноваций Определение и оценка новой технологии Выявление результатов научно-исследовательской и опытно-конструктивной работы, необходимые для реализации производственных инноваций |
| Выход на рынок | Проведение обучения технологии Организация обучения, связанного с продуктом Начало выпуска товара (продукт или услуга) Наблюдение, анализ и контроль осуществления инновационного проекта |

Экономика развития и менеджмент инновационных технологий предполагает четыре основных этапа развития:

1. Факторный. На данном этапе проходит изучение технологий инноваций как тенденцию для развития определенной страны.

2. Ситуационный. Осуществляется деятельность с соответствии с ситуацией на рынке.

3. Системный. Фактор предполагает рассмотрение организации в совокупности всех взаимосвязанных элементов.

4. Функциональный. Этап внедрения всего массива методов принятия решений в управлении.

Инновационный менеджмент имеет особую специфику черт, по которым его можно отличить от других деятельности. Будучи управленцем инновациями, его основная цель – не изобрести, а организовать работу, направленное на изобретение нового.

Работая со специфическими технологиями, информацией, достижениями, инновационный менеджмент предполагает использование уникальных ресурсов – научных, технических, интеллектуальных.

Для эффективного и рационального внедрения большого комплекса решений в управлении инновациями важен системный структурированный подход. Так, инновационный менеджмент предполагает определение проблемы в целостности и решение нестандартных задач.

Примером применения рационального инновационного менеджмента стало внедрение основы создания сервиса проверки электронных документов с применением электронных средств – блокчейн, который способствовал резкому сокращению затрачиваемого времени и финансов на подобные процессы в сфере государственных и коммерческих структур.

Также инновационный менеджмент выражен в применении 3D сканеров в работе интернет-магазинов продажи обуви -еще один яркий пример.

Создание российскими разработчиками сервиса примерки обуви в бесконтактном режиме «Imigize» еще один пример рационального менеджмента в управлении.

Инновационный менеджмент, как самостоятельное направление, нуждается в выработке новых концепции и методологии управления инновациями. Являясь важным фактором общественного развития, это требует, в свою очередь трансформации имеющихся моделей менеджмента с целого их приспособления к особенностям инновационных процессов. Это позволит разработать основные направления и контуры нового менеджмента, который мог бы с высокой степенью вероятности гарантировать наиболее эффективные развития инноваций с целью обеспечения динамичного общественного развития.

Список используемых источников

1. Агарков, А.П. Управление инновационной деятельностью: Учебник для использования в образовательном процессе образовательных организаций, реализующих программы высшего образования по направлениям подготовки «Менеджмент», «Инноватика» (уровень бакалавриата) / А.П. Агарков, Р.С. Голов. – 2-е издание. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2020. – 204 с.

2. Боева, А.А. Методы инновационного менеджмента предприятия в условиях рыночной экономики / А.А. Боева, Ю.В. Пахомова // Организационно-экономические и управленческие аспекты функционирования и развития социально-экономических систем в условиях инновационной экономики : Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 23 мая 2019 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2019. – С. 34-42.

3. Зверева, Т.М. Необходимость обновления форм и методов управления в условиях использования инновационного менеджмента / Т.М. Зверева // Электронный научный журнал. – 2020. – № 1(30). – С. 67-70.

Научное электронное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОФАЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА И ИННОВАЦИОННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Материалы XIV Международной научно-инновационной
молодежной конференции

Обложка, упаковка, тиражирование Т. Ю. Зотовой

ISBN 978-5-8265-2541-8



Подписано к использованию 16.12.2022.
Тираж 100 шт. Заказ № 108

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.
Тел. 8(4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@.tstu.ru

