

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ, НАНОСТРУКТУРЫ, МАТЕРИАЛЫ

Тезисы докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции
с международным участием, посвященной памяти ректора
Красноярского государственного технического университета профессора,
доктора физико-математических наук Анатолия Михайловича Ставера

Красноярск, 24–25 октября 2019 г.

Электронное издание



Красноярск
СФУ
2019

УДК 621.762(083)
ББК 30.377я43
У515

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-79-202018 (РНФ-11) «Применение наножидкостей в технологиях разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений»

Ответственный за выпуск Минаков Андрей Викторович

У515 Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы : тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной памяти ректора Краснояр. гос. техн. ун-та проф., д-ра физ.-мат. наук Анатолия Михайловича Ставера. Красноярск, 24–25 октября 2019 г. [Электронный ресурс] / отв. за вып. А.В. Минаков. – Электрон. дан. (5,66 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – Электрон. опт. диск. (CD-Rom). – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb Ram ; Windows 98/XP/7 ; Adobe Reader v 8.0 и выше. – Загл. с экра-на.

ISBN 978-5-7638-4225-8

Включены тезисы докладов научных исследований по следующим направлениям: получение и свойства ультрадисперсных (нано-) порошков и систем; наноструктуры и тонкие пленки в материалах и микротехнике; исследование и аттестация ультрадисперсных (нано-) порошков, наноструктур и материалов; ультрадисперсные (нано-) порошки в материалах и технологиях различного назначения; гидродинамика, теплообмен в многофазных средах; использование ультрадисперсных (нано-) порошков и материалов в задачах разработки и извлечения углеводородов.

Предназначены специалистам, инженерам, научным работникам, аспирантам, магистрантам, студентам старших курсов, занимающимся созданием, исследованием и внедрением новых перспективных материалов и нанотехнологий.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

УДК 621.762(083)
ББК 30.377я43

© Сибирский федеральный университет, 2019

ISBN 978-5-7638-4225-8

Электронное научное издание

Корректурa и компьютерная верстка *А.А. Быковой*

Подписано в свет 08.11.2019. Заказ № 9909
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Е.А. Петров, А.А. Колесова, А.Б. Прибавкин, А.Ю. Удалова НАНОАЛМАЗЫ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА	8
Е.А. Петров ДЕТОНАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ ИЗ ТРИАМИНОТРИНИТРОБЕНЗОЛА	10
В.С. Бондарь, А.П. Пузырь, Н.О. Ронжин, А.В. Барон, А.Е. Буров ДЕТОНАЦИОННЫЕ НАНОАЛМАЗЫ – ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЯХ	11
Е.А. Оводок, М.И. Ивановская, А.М. Мальтанова, С.К. Позняк, С.В. Войтехович СОСТОЯНИЕ ЗОЛОТА И ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ Au/TiO ₂	13
А.О. Чудинова, А.П. Ильин ОСОБЕННОСТИ НИТРИДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СГОРАНИИ СМЕСЕЙ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ С ПЕНТАОКСИДАМИ V ГРУППЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА	15
Ф.А. Губарев, А.В. Мостовщиков, Л. Ли, А.П. Ильин, П.А. Антипов ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ И СМЕСЕЙ	17
А.П. Пузырь, Г.Е. Селютин, А.Е. Буров, В.С. Бондарь НАНОАЛМАЗЫ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА В ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗКАХ	19
Г.Е. Селютин, А.П. Пузырь, А.Е. Буров УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАСЛАХ	21
А.Л. Верещагин, Н.В. Бычин, О.Б. Кудряшова, Е.А. Петров КОАЛЕСЦЕНЦИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО УГЛЕРОДА УЛЬТРАЗВУКОМ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	23
А.Л. Верещагин, Е.А. Петров, А.В. Сергиенко, А.А. Колесова ГОРЕНИЕ СОСТАВОВ С ДЕТОНАЦИОННЫМИ НАНОАЛМАЗАМИ	25
Т.В. Трофимова, С.В. Сайкова, А.Ю. Павликов, Д.В. Карпов, М.Н. Волочаев СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИТА МЕДИ В ПРИСУТВИИ ПОЛИСАХАРИДОВ	27
О.А. Могильная, Н.О. Ронжин СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗОВ И ЭКСТРАКТЕЧНЫХ ОКСИДАЗ СВЕЯЩЕГОСЯ ГРИБА <i>NEONOTHOPANUS NAMBI</i>	29
И.А. Рогова ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ СОВМЕСТНОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ	31
А.В. Ушаков, И.В. Карпов ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР	33
С.А. Белякович, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ГАФНИЯ И МИКРОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ	35



Н.О. Ронжин, Е.Д. Посохина, Е.В. Михлина, М.М. Симунин, И.И. Рыжков, В.С. Бондарь КОМПОЗИТ ИЗ НАНОВОЛОКОН ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И НАНОАЛМАЗОВ – ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНДИКАТОРНЫХ СИСТЕМ	37
Р.Д. Иванцов, С.А. Петерсон НАНОКОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ЧАСТИЦ СЛАБОГО_ФЕРРОМАГНЕТИКА α - Fe_2O_3	39
Ф.К. Горбунов, В.А. Полубояров, Л.К. Бердникова, А.И. Сапрыкин НАНОЧАСТИЦЫ КАРБИДА КРЕМНИЯ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРА ДЛЯ ЛИТЬЕВОГО ПОЛИУРЕТАНА.....	41
В.А. Полубояров, Ли Чен-Мён, А.Ю. Ларичкин, Г.Е. Селютин, З.А. Коротаева, Л.К. Бердникова, А.А. Жданок, Ф.К. Горбунов МЕХАНОХИМИЯ КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК.....	43
И.Р. Волкова, А.И. Лямкин, В.Е. Редькин, П.О. Суходаев ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КРАСКИ ДЛЯ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ	45
И.Р. Волкова, А.И. Лямкин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОНАМИ МЕДИ НАНОАЛМАЗОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ МЕДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ.....	47
А.П. Ильин, Л.О. Роот, А.В.Мостовщиков КОЛЕБАНИЯ СКОРОСТИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ЭНЕРГИИ	49
Ф.М. Носков, М.Б. Лесков, Л.И. Квеглис ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ЗОНАХ КОНТАКТА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА СТАЛЬ – МЕДЬ – ЛАТУНЬ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ.....	51
С.В. Юркевич, Н.С. Николаев ЗАВИСИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОТОКЕ УГЛЕРОДНО-ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ	53
Ж.В. Еремеева, Ю.Ю. Капланский, С.А. Воротыло, А.А. Непапушев, Д.А. Сидоренко СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКА ГАФНАТА ДИСПРОЗИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ.....	55
В.Ю. Лопатин, Ж.В. Еремеева, Л.В. Мякишева, А.И. Лизунов ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПЛОТНОГО КАРБИДА БОРА ИЗ СВС-ПОРОШКА В4С И МЕХАНОСИНТЕЗИРОВАННОГО ПОРОШКА В4С	57
Е.В. Инжеваткин, А.В. Барон, Н.Г. Максимов, М.Б. Волкова, А.П. Пузырь, Н.О. Ронжин, В.С. Бондарь ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ ЖИВОТНЫХ ВНУТРИВЕННО ВВЕДЕННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ МЕТОДОМ ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИИ....	59
С.А. Сацук, С.В. Комогорцев КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ НАНОНИТИ. РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ	61



Е.В. Григорьева ПОДБОР УСЛОВИЙ АНИОНООБМЕННОГО СИНТЕЗА ЖЕЛЕЗО-ЭРБИЕВОГО ГРАНАТА	63
Я.Н. Чеботаева, Н.Г. Внукова, А.И. Дудник ОБОГАЩЕНИЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ СМЕСИ ЭНДОЭДРАЛЬНЫМИ МЕТАЛЛОФУЛЛЕРЕНАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КИСЛОТЫ ЛЬЮИСА	65
П.О. Суходаев, В.Е. Редькин, Т.А. Богданова ПРИМЕНЕНИЕ НАНОПОРОШКОВ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	67
П.О. Суходаев, М.Ю. Чулкова, В.И. Турчин, С.В. Юркевич, В.Е. Редькин, П.П. Турчин ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ Al_2O_3 НА МИКРОСТРУКТУРУ И МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА D16	69
А.Н. Калашникова, Н.С. Николаев, Г.А. Глущенко, В.Г. Исакова КОМПОЗИТ Al_2O_3/C И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО НОСИТЕЛЯ ПАЛЛАДИЕВОГО КАТАЛИЗАТОРА	71
О.Е. Безрукова, Е.В. Михлина, А.С. Вяткин, А.А. Мишин, М.М. Симунин, И.И. Рыжков ПОЛУЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОПОРИСТЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ CVD.....	73
Д.И. Сайкова, Е.Д. Емельянов, С.В. Сайкова СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $NiFe_2O_4@Au$	75
И.Г. Важенина, Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ СПИН-ВОЛНОВОГО РЕЗОНАНСА НА ПРИМЕРЕ ПЛАНАРНЫХ СИСТЕМ СО-Р	76
А.А. Антипенко, А.В. Смирнова, А.С. Гареева, И.Н. Макаров, Л.И. Квеглис ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ В ПОРОШКОВОЙ КЕРАМИКЕ $Al_2O_3 + C$, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ SPS.....	78
А.С. Вяткин, Е.В. Михлина, М.М. Симунин, И.И. Рыжков ТРАНСПОРТ ИОНОВ В ПРОВОДЯЩИХ НАНОПОРИСТЫХ МЕМБРАНАХ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ	80
М.М. Симунин, М.О. Мишнёв, А.В. Минаков, И.И. Рыжков ОСОБЕННОСТИ ПИРОЛИЗА ЭТАНОЛА ПРИ СИНТЕЗЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР..	82
В.А. Зверев, С.М. Жарков, Л.И. Квеглис ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЕ $Al-PT$	84
П.П. Турчин, А.И. Зайцев, А.В. Черепахин, А.Г. Нечепурышина ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ СОСТАВА $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$	86
Д.И. Чистяков, Е.В. Пикурова, С.В. Сайкова СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ КОБАЛЬТА С УГЛЕРОДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ.....	88
А.С. Воронин, Ю.В. Фадеев, М.М. Симунин, С.С. Добросмыслов, С.В. Хартов МИКРОСЕТЧАТЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗОВАННОГО ШАБЛОНА КАК ГИБКИЙ ПРОЗРАЧНЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.....	89



Ю.В. Фадеев, А.С. Воронин, М.М. Симунин, И.В. Говорун, С. В. Хартов Ni-Ag МИКРОСЕТКА СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ПРОЗРАЧНЫЙ РАДИОЭКРАНИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ	91
М.С. Дмитриев, С.В. Комогорцев АТОМНЫЙ СВОБОДНЫЙ ОБЪЕМ И КОНСТАНТА ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРОВОЛОКАХ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ.....	93
В.И. Елесина, Я.Н. Чеботаева, Н.Г. Внукова, И.В. Осипова, А.И. Дудник, Г.Н. Чурилов ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВЫХ СМЕСЕЙ С Gd РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ	95
Л.А. Чеканова, Е.А. Денисова, Р.С. Исхаков, И.В. Немцев СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА 3D МЕТАЛЛ-СОДЕРЖАЩИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ	97
Р.М. Соболев, Т.В. Фадеев, Ю.М. Кузнецов, Л.И. Квеглис ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СТАЛИ ГАДФИЛЬДА	99
В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, В.Д. Минаков ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМЫ СО СПЛОШНОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ	101
А.С. Воронин, М.М. Симунин, Е.Н. Вершинникова, Ю.И. Мухаметшина, А.В. Достовалов, А. Банзаракцаев, А. Марьяшин, Е. Щука ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ ВНУТРИ ГРАФЕНОПОДОБНОЙ КАПСУЛЫ.	103
А.Г. Мейлах, Ю.В. Концевой, А.Б. Шубин ДИСПЕРСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ	105
В.Н. Хмелев, Г.А. Боброва, Р.Н. Голых МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ НА МАССОПЕРЕНОС В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ.....	107
В.А. Кузнецов, П.А. Необъявляющий, О.Л. Магдеева, А.А. Дектерев ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОЗГОРАНИЯ БУРОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ	109
Т.А. Шалыгина, С.Ю. Воронина, А.Ю. Власов, К.А. Пасечник, И.В. Обверткин МЕХАНИЗМ ДИФфуЗИОННОЙ АДГЕЗИИ В ПОЛИУРЕТАНОВОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ, ПРИВОДЯЩИЙ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ТРОЙНОЙ ФОРМЫ.....	111
Я.А. Живая, Г.С. Патрин, А.В. Кобяков, В.И. Юшков СТРУКТУРЫ CoNi/Si/FeNi/Si С ЭФФЕКТОМ СПИНОВОЙ ПРУЖИНЫ.....	113
Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, Л.А. Скоробогатова ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ СПЕКАНИИ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ ЦИНКА И ОЛОВА	115
А.С. Лобасов, А.А. Шебелева, А.В. Шебелев РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ.....	117



Д.В. Платонов, Д.А. Дектерев, А.С. Лобасов РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РОТОРОВ ДЛЯ СВОБОДОПОТОЧНЫХ МИНИГЭС	119
В.А. Жигарев, А.В. Минаков, А.Л. Неверов, А.В. Матвеев ИССЛЕДОВАНИЕ СООРУЖЕНИЯ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КЫЗЫЛ-ТАШТЫГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	121
А.А. Шебелева, А.В. Шебелев, А.В. Минаков МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПАДА ОТДЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬ ГЕКСАНА В ГРАДИЕНТНЫХ ПОТОКАХ.....	123
В.А. Жигарев, А.В. Минаков, А.Л. Неверов, М.И. Пряжников, А.В. Матвеев РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСА ШЛАМА.....	125
В.В. Будько, А.В. Шебелев, А.А. Шебелева МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА С О-ОБРАЗНЫМ РАЗВЕТВЛЕНИЕМ.....	127
Д.В. Гузей ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НАНОСУСПЕНЗИЙ.....	128
Б.Б. Дамдинов, М.Д. Богоманшин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ.....	130
А.В. Минаков, М.И. Пряжников, А.С. Лобасов, В.Я. Рудяк РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЭСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ НАНОЖИДКОСТЬЮ	131
А.В. Минаков, М.И. Пряжников, Д.В. Гузей, Е.И. Михиенкова РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ММП.....	133
Е.И. Михиенкова, А.В. Минаков, С.В. Лысаков ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ НАНОЧАСТИЦ НА СВОЙСТВА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ	135



УДК 679.826-022.532

Е.А. Петров^{1,2}, А.А. Колесова², А.Б. Прибавкин³, А.Ю. Удалова³

¹ Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

² АО «ФНПЦ «Алтай», Бийск, Россия

³ ООО НПП «СИДАЛ», Качканар, Россия

НАНОАЛМАЗЫ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА

В науке и технике находят применение наноалмазы детонационного синтеза как из углерода молекулы взрывчатого вещества (ДНА), так и из смеси ВВ с добавкой графита или сажи (ДАЛАН). Алмазы, обладая наноразмерами и высокой поверхностной энергией, оказывают структурирующее и дисперсноупрочняющее воздействие на любые контактирующие с ними материалы. Во многом области применения наноалмазов определяются их дисперсностью, реакционной способностью и агрегативным состоянием в различных средах. В работе исследовались свойства промышленных ДНА и ДАЛАН производства ООО НПП «СИДАЛ», одного из ведущих производителей в России.

Детонационный синтез ДНА и ДАЛАН осуществлялся в промышленных взрывных камерах объемом 4 м³ в буферной охлаждающей среде из собственных продуктов детонации. Применялись литые заряды из сплавов тротила с гексогеном 40/60 и прессованные заряды гексогена с графитом 80/20 по массе соответственно. Масса ВВ составляла 1,0–2,0 кг. Результаты исследований свойств ДНА и ДАЛАН приведены в таблице.

По данным элементного анализа, содержание углерода в образцах ДНА заметно ниже, чем для ДАЛАН, выше содержание водорода, азота и кислорода. В ДАЛАН отсутствует азот, и это может быть связано с разными кинетическими условиями зарождения и роста кристаллитов алмаза в детонационной волне. Размеры кристаллитов (область когерентного рассеивания решётки) для ДАЛАН больше, чем для ДНА, примерно в 1,5 раза, при этом $S_{БЭТ}$ отличается на порядок. Частицы ДНА представляют собой монокристаллические образования, так как размеры кристаллитов совпадают с размерами частиц, рассчитанных по $S_{БЭТ}$. Незначительное отличие в значениях можно объяснить наличием искажений и дефектов внутри зерна. Это увеличивает ширину дифракционных линий и занижает размер кристаллита. Частицы ДАЛАН – это поликристаллические образования, собранные на стадии синтеза из кристаллитов 6,8–7,4 нм в частицы размером 58–89 нм.

Наличие большого числа некомпенсированных связей на поверхности частиц приводит к появлению «запасенной энергии», повышению реакционной способности. Судя по температурам начала и максимума окисления, реакционная способность для ДНА выше, чем для ДАЛАН, в целом выше и теплота сгорания. Необходимо отметить, что для ДНА и ДАЛАН в районе 300 °С на кривой ДТА практически всегда наблюдается значительный тепловой эффект, соизмеримый для ряда образцов с теплотой сгорания. При этом на кривой ТГА потери массы не наблюдается. Такое поведение можно объяснить наличием избыточной поверхностной энергии, разрушением и окислением поверхностного слоя.



Ненасыщенные поверхностные связи и поверхностные энергии приводят к агрегации алмазов, образуя последовательную иерархическую систему первичных, вторичных и последующих агрегатов. Рыхлость агрегатов по мере их укрупнения растет, а плотность падает. В порошках ДНА и ДАЛАН, предварительно растертых в ступке, размеры агрегатов примерно равны. В суспензиях без воздействия ультразвука образуются более крупные агрегаты. На дифференциальных кривых наблюдаются двух-, а для ДНА также трехмодальное распределение агрегатов по размерам. При ультразвуковой обработке размеры агрегатов снижаются и по истечении 120 с практически не изменяются. Размеры агрегатов для ДАЛАН и ДНА становятся соизмеримыми, однако для ДНА на дифференциальной кривой двухмодальное распределение частиц иногда сохраняется.

Таблица

Основные свойства ДНА и ДАЛАН

Показатель	ДНА	ДАЛАН
Размер кристаллитов (рентгеноструктурный анализ), нм	4,7–5,2	6,8–7,4
Удельная поверхность (адсорбционный, метод БЭТ), м ² /г	220–246	21–32
Размеры частиц (расчет по данным $S_{БЭТ}$), нм	7,6–8,5	58–89
Элементный состав, % (анализатор Thermo Quest при сжигании 900 °С):		
Н	86–88	93–95
С	0,8–1,2	0,3–0,9
N	1,7–2,1	0,0
О	9,7–10,3	3,7–4,6
зольность	0,1–0,3	0,1–0,3
Плотность, г/см ³ :		
насыпная	0,21–0,31	0,78–0,85
пикнометрическая	3,05–3,21	3,35–3,48
Температура окисления (ДТА/ТГА), °С:		
начальная	540–580	630–650
максимальная	590–614	693–714
Теплота сгорания (ДТА), кДж/г	13,7–26,7	13,0–17,1
Диаметр агрегатов в порошке, мкм (видеопроцессор OLYNPUS OMES DC130):		
среднемассовый	2,5–3,3	2,6–3,2
медианный	2,2–5,6	2,5–3,2
Диаметр агрегатов в суспензии, мкм (лазерный анализатор Horiba LA 950):		
средний	35,2–63,4	14,1–21,2
медианный	21,3–48,3	9,1–11,3
Диаметр агрегатов в суспензии после обработки ультразвуком, мкм:		
средний	2,3–4,7	3,4–6,1
медианный	1,8–5,6	3,0–6,1

Исследования показали, что главное отличие ДНА и ДАЛАН заключается в размерах кристаллитов и зернистости частиц. Этим объясняются и другие отличия: по содержанию углерода, реакционной способности, энергонасыщенности и склонности к образованию агрегатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержки РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19070 МК.

УДК 679.826-022.532

Е.А. Петров^{1,2}¹ Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия² АО «ФНПЦ «Алтай», Бийск, Россия

ДЕТОНАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ ИЗ ТРИАМИНОТРИНитРОБЕНЗОЛА

Детонационные наноалмазы (НА) – это уникальный наноматериал, который уже в течение 37 лет находит все большее применение в науке и технике [1]. В научном плане детонационную волну (ДВ) можно рассматривать как высокоэнергетический химический реактор для синтеза наноструктур и наноматериалов с новыми свойствами, а образование и размеры НА могут служить своеобразной меткой для изучения физико-химических процессов протекающих в ДВ [2]. На массовый выход и размеры НА влияют давление и температура в ДВ, состав, масса и кинетика разложения ВВ, условия охлаждения продуктов детонации в камере [1–3]. В промышленном синтезе НА применяются литые заряды ТГ 60/40.

В работе исследовались продукты детонационного синтеза, полученные из зарядов триаминотринитробензола (ТАТБ). Данное ВВ, по давлению и конденсированному углероду (КУ) в ДВ, близко к ТГ 60/40, но имеет более низкую температуру и отличается шириной зоны химической реакции. Эксперименты проводились во взрывной камере 0,175 м³ в среде азота при 0,8 МПа. Масса заряда равна 100 г, диаметр – 40 мм (таблица).

Таблица

Зернистость ТАТБ, мкм	Плотность заряда, г/см ³	Массовый выход, %		S _{БЭТ} , см ³ /г	
		КУ	НА	КУ	НА
200	1,05	14,94	0,14	70,3	235,0
	1,83	17,91	2,08	344,5	532,8
50	0,96	14,68	3,74	14,7	341,5
	1,45	20,48	4,92	166,8	567,2
	1,80	23,04	4,74	537,7	748,0

При снижении зернистости ТАТБ повышаются детонационная восприимчивость и полнота химических реакций; с увеличением плотности растет давление в ДВ, уменьшаются время и ширина зоны химической реакции [3]. В этих условиях растет массовый выход и дисперсность НА и КУ. Изменяются термическая стабильность, размер микрокристаллитов и тепловой эффект сгорания НА в сравнении с ТГ 60/40.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19070 МК.

Список литературы

1. Сакович Г.В., Жарков А.С., Петров Е.А. Результаты исследований физико-химических процессов детонационного синтеза наноалмазов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8, № 9–10. С. 11–20.
2. Петров Е.А. Детонационный синтез наноалмазов. Наноалмазы и нанотехнологии: монография. Бийск: Изд-во Алт. ун-та, 2015. 253 с.
3. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. М.: Энергоатомиздат. 2010. 784 с.

УДК 679.826-022.532:615.46

В.С. Бондарь, А.П. Пузырь, Н.О. Ронжин, А.В. Барон, А.Е. Буров

Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

ДЕТОНАЦИОННЫЕ НАНОАЛМАЗЫ – ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В БИМЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЯХ

Активное развитие нанотехнологии открывает большие возможности для новых решений широкого спектра биомедицинских задач. Научное сообщество предполагает, что внедрение наноматериалов разной физико-химической природы в биомедицинские сферы деятельности человека (рис. 1) пополнит арсенал и повысит эффективность применяемых в них методов и обеспечит выход на новый качественный уровень.



Рис. 1. Биомедицинские сферы применения наноматериалов разной физико-химической природы

В частности, ученые всего мира разрабатывают подходы к использованию наноматериалов в технологиях эффективной сепарации и выделения биомолекул, в создании средств индикации и диагностики, нейтрализации токсических веществ, разработке новых терапевтических препаратов, в конструировании управляемых или целевых носителей лекарств.

Следует сказать, что работающие в данной области специалисты проявляют заметный интерес к изучению применимости в биологических и медицинских целях разных форм наноглерода (фуллерены, нанотрубки, графен). Одним из перспективных материалов этой группы являются детонационные наноалмазы, метод взрывного синтеза которых впервые разработан российскими учеными.

В докладе обобщаются результаты многолетних исследований, проводимых в ИБФ СО РАН (Красноярск) с наноалмазами детонационного синтеза и направленных на изучение их свойств и оценку применимости в биомедицине. Сообщается о получении модифицированных наноалмазов (МНА) с высокой коллоидной стабильностью в разных дисперсионных средах, что открыло возможности их использования в качестве материала биотехнологического назначения для широкого спектра биологических и медицинских исследований (рис. 2).



Рис. 2. Варианты перспективных биомедицинских приложений модифицированных наноалмазов детонационного синтеза

Приводятся примеры перспективных биомедицинских приложений МНА в качестве полифункционального адсорбента для эффективных способов сепарации и очистки белков из сложных белковых смесей, сенсорного элемента для обнаружения фенола и фенольных соединений в водной среде, носителя для конструирования систем биохимической диагностики физиологически важных веществ и адресной доставки биоактивных субстанций, адсорбента для связывания и нейтрализации токсикантов и разработки новых технологий гемодиализа и плазмафереза, основы для создания лечебных средств комбинированного и пролонгированного действия.

УДК 620.22-022.532:546.59:544.032.4

**Е.А. Оводок, М.И. Ивановская, А.М. Мальтанова,
С.К. Позняк, С.В. Войтехович**Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь**СОСТОЯНИЕ ЗОЛОТА И ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОКОМПОЗИТОВ Au/TiO₂**

Адсорбционно-каталитические и электрокаталитические свойства материалов на основе оксидов металлов с закрепленными на них частицами золота в существенной степени зависят от размеров частиц Au и характера их взаимодействия с оксидным носителем. Эти факторы особенно сильно выражены при размерах частиц Au 5 нм и менее.

В работе исследованы электрокаталитические свойства диоксида титана, полученного золь-гель методом, с введенными частицами золота. Использование разных методик введения золота позволило получить частицы, различающиеся размерами. В золь гидроксида TiO₂·nH₂O вводили HAuCl₄ и коллоидное золото, стабилизированное цитрат-ионами или тетразолом. Образцы прогревали на воздухе при 400 °С. Средний размер частиц золота в образцах указан в таблице. Состояние Au и характер взаимодействия между компонентами на границе TiO₂/Au при разных методиках получения и размерах частиц золота исследовали методами РФЭС, ПЭМ, ЭПР, ИК и оптической спектроскопии. Электрокаталитические свойства изучали в реакции восстановления кислорода в растворе KOH, насыщенном кислородом.

Таблица

Сравнение данных РФЭС-спектров Au 4f в образцах Au/TiO₂

Образец	d_{Au} , нм	$E_{св} Au 4f_{7/2}$, эВ	$E_{св} Au 4f_{5/2}$, эВ	O/Ti	Состояние золота	№
TiO ₂ , HAuCl ₄	2,5±0,5	83,9 87,0	87,2 90,2	1,96	Au ⁰ Au ³⁺ (Au ³⁺ -O-Ti)	1
TiO ₂ , Au-тетразол	1,9±0,1	82,9 83,9	86,6 87,6	2,14	Au ^{δ-} (Au←Ti) Au ⁰	2
TiO ₂ , Au-коллоид	4,0±0,5	83,3	86,7	2,90	[(Au ⁰) _n] m Cit ⁻	3

Из данных РФЭС следует, что только в спектре образца 2 с минимальным размером частиц золота наблюдается отрицательный химический сдвиг пиков Au 4f. В спектре Au 4f этого образца выделяется два состояния золота, одно из которых с меньшей энергией связи ($E_{св} Au 4f_{7/2} = 82,9$ эВ), чем в металле ($E_{св} Au 4f_{7/2} = 83,9$ эВ). Его содержание составляет ~60 %, что превышает содержание Au⁰ (40 %). Для кластеров золота с размерами 1,5–3,0 нм характерны связи молекулярного, а не металлического типа, в РФЭС-спектре при этом наблюдается уменьшение расщепления уровней $4f_{7/2}$ – $4f_{5/2}$ и $5d_{5/2}$ – $5d_{3/2}$. Отрицательный химический

сдвиг, как правило, свидетельствует о появлении на частицах Au избыточной электронной плотности, что может быть связано с переносом электронной плотности $\text{Au}^{\delta-} \leftarrow \text{Ti}^{\delta+}$. Однако отрицательный химический сдвиг линий в РФЭ-спектрах Au $4f$ не всегда означает перенос электронной плотности на золото ($\text{Au}^{\delta-}$) от соседних атомов, он может быть вызван квантоворазмерным эффектом, который характеризуется повышенной заселенностью p -АО по сравнению с конфигурацией $d^{10}s^1p^0$. В кластерах Au может иметь место частичный переход электронной плотности с d -орбитали на p -орбиталь: $[d^{10}s^1] \rightarrow [d^8s^1p^2]$, что вызывает изменение энергии связи электронов в кластерах относительно металлического золота.

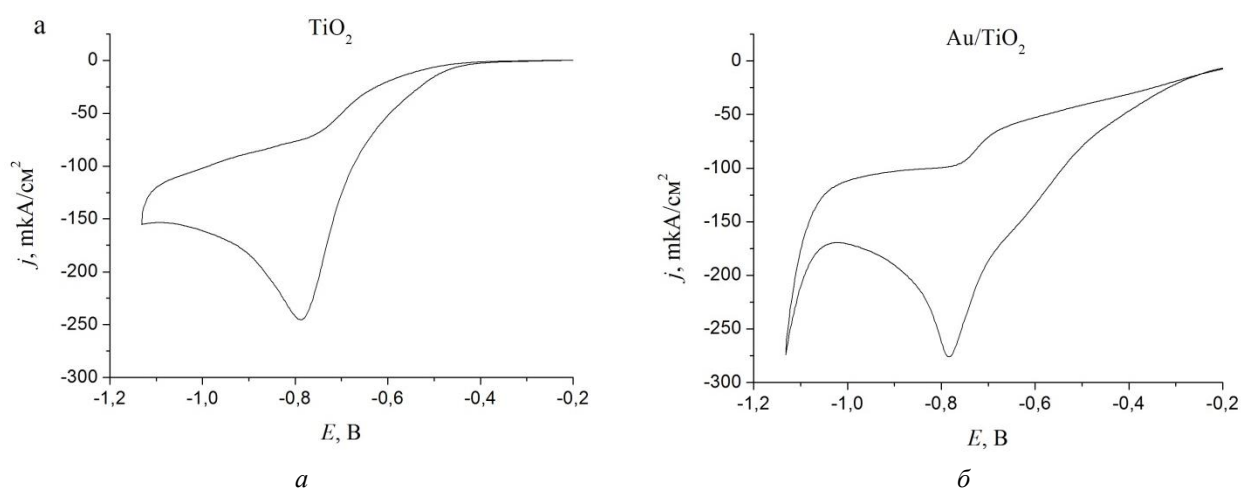


Рисунок. ЦВА кривые на пленке TiO_2 (а) и пленке TiO_2 с введенным коллоидным золотом, стабилизированным тетразолом (б). Электролит – 0,1 М раствор КОН, насыщенный кислородом

Существенным изменением электронных свойств Au, прежде всего состояния d -орбиталей, ответственных за адсорбцию кислорода и перенос заряда, можно объяснить наблюдаемое на образце 2 протекание процесса восстановления кислорода при меньших перенапряжениях, чем основной процесс (рисунок, б). Отмеченными особенностями электронного состояния золота на границе Au/ TiO_2 может быть вызвано уменьшение перенапряжения электрокаталитического восстановления кислорода, поскольку лимитирующей стадией этого процесса является эффективность адсорбция кислорода и первая стадия переноса заряда.



УДК 661.571.1:620.22-022.532:544.452

А.О. Чудинова, А.П. Ильин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

ОСОБЕННОСТИ НИТРИДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СГОРАНИИ СМЕСЕЙ НАНОПОРОШКА АЛЮМИНИЯ С ПЕНТАОКСИДАМИ V ГРУППЫ ПОБОЧНОЙ ПОДГРУППЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Среди нитридных соединений переходных металлов V группы побочной подгруппы Периодической системы Д.И. Менделеева большое внимание привлекли нитриды ванадия, ниобия и тантала благодаря своим свойствам. С точки зрения механических свойств нитриды V группы обладают высокой твердостью [1] и высокой износостойкостью [2]. Кроме того, эти соединения обладают высокой температурой плавления ($t_{\text{пл}}(\text{VN}) = 2\,320\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{пл}}(\text{Nb}_2\text{N}) = 2\,400\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{пл}}(\text{Ta}_2\text{N}) = 2\,697\text{ }^{\circ}\text{C}$) и хорошей высокотемпературной химической устойчивостью [3].

Нитриды (MeN_x) считаются перспективными материалами для многих технических и промышленных применений. В работе нитриды были получены синтезом сжигания смесей нанопорошка алюминия с пентаоксидами ванадия, ниобия и тантала в режиме теплового взрыва. Особенности процесса нитридообразования – образование нитридов в присутствии кислорода и распространение тепловой волны, которая проходит через весь образец. Температура во фронте волны горения может достигать высоких значений (2 000–2 200 °C).

Целью настоящей работы являлось получение нитридов ванадия, ниобия и тантала при горении смесей нанопорошка с соответствующими пентаоксидами с максимальным выходом.

Из данных дифференциального термического анализа следует, что все приготовленные смеси имеют температуру начала окисления выше 300 °C, т.е. они не пирофорны. Сжиганию подвергалась смесь нанопорошка алюминия с пентаоксидом ванадия. В полученном продукте сгорания была идентифицирована кристаллическая фаза нитрида ванадия (VN). Выход данного нитрида VN в продукте сгорания смеси нанопорошка алюминия с пентаоксидом ванадия, согласно рентгенофазовому анализу, достигает $\text{VN} = 61$ отн. %.

Исходя из данных рентгенофазового анализа (РФА) в образце, содержащем пентаоксид ниобия, выход нитрида ниобия составил $\text{Nb}_2\text{N} = 42$ отн. %. При этом в образце присутствуют кристаллические фазы Al_2O_3 и невосстановленный Nb_2O_5 (рисунок, а). Согласно штрих-рентгенограмме (рисунок, б) видно, что рефлексу интенсивностью 100 % соответствует рефлекс фазы $\text{Ta}_2\text{N} = 63$ отн. %.

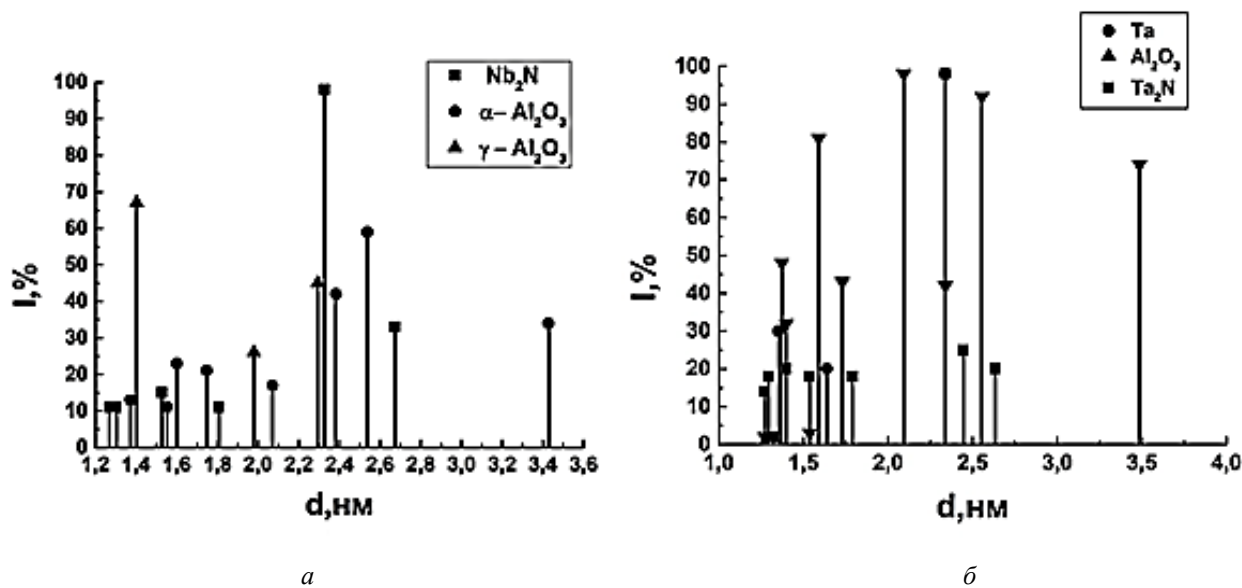


Рисунок. Штрих-рентгенограммы продуктов сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия:
а – с пентаоксидом ниобия; б – с пентаоксидом тантала

Таким образом, химическое связывание азота воздуха играет большую роль в нитридообразовании, так как определяет состав продуктов сгорания и синтеза тугоплавких нитридов металлов. Выход нитридов ниобия, тантала и ванадия в продуктах сгорания смесей нанопорошка алюминия с соответствующими пентаоксидами, согласно рентгенофазовому анализу, достигает Nb₂N = 42 отн. %, Ta₂N = 63 отн. % и VN = 61 отн. %.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.1928.2017/4.6 и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-03-00160.

Список литературы

1. Andrievski R.A., Anisimova I.A., Anisimov V.P. Structure and microhardness of TiN compositional and alloyed films // Thin Solid Films. 205 (1991). P. 171–175.
2. Brown G.M., Maya L. Ammonolysis products of the dialkylamides of titanium, zirconium, and niobium as precursors to metal nitrides // Journal of the American Ceramic Society. 71 (1988). P. 78–82.
3. Formation of nanocrystalline niobium carbide (NbC) with a convenient route at low temperature / J. Ma, M. Wu, Y. Du [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 475 (2009). P. 415–417.



УДК 621.6.04-022.532:534.522

Ф.А. Губарев, А.В. Мостовщиков, Л. Ли, А.П. Ильин, П.А. Антипов

Томский политехнический университет, Томск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ И СМЕСЕЙ

В настоящее время одним из перспективных направлений развития нанотехнологий является исследование, синтез и применение нанопорошков металлов, в частности нанопорошка алюминия [1]. Процесс горения нанопорошка алюминия и смесей на его основе протекает при высокой температуре и в некоторых случаях сопровождается разлетом продуктов сгорания.

В докладе представлена методика и результаты мониторинга в реальном времени процесса горения нанопорошка алюминия и его смеси с нанопорошком железа с использованием оптических систем с усилением яркости. Рассмотрены лазерные мониторы с традиционной схемой построения, коротким фокусным расстоянием и дистанционной схемой, имеющей увеличенную (50 см) дистанцию мониторинга. Предлагаемая техника эксперимента позволяет в режиме реального времени исследовать поверхность образцов во время высокотемпературного горения, сопровождающегося интенсивным свечением и разлетом продуктов сгорания.

Оптические системы с усилением яркости с коротким фокусным расстоянием подробно рассмотрена нами в работе [2]. В работе [3] нами рассмотрена дистанционная схема лазерного монитора. Обе схемы построены на основе изготовленного в лаборатории усилителя яркости на парах бромида меди (длины волн 510,6 и 578,2 нм).

В работе исследовался слабоагломерированный нанопорошок алюминия, полученный с помощью электрического взрыва алюминиевого проводника в среде аргона, с распределением частиц по диаметру, близким к нормально-логарифмическому с максимумом 80 нм. Нанопорошок железа, который добавлялся в объеме 40 % к нанопорошку алюминия, имел распределение частиц по диаметру, близкое к нормально-логарифмическому с максимумом 110 нм.

На рисунке показаны кадры видеорегистрации горения смеси $\text{наноAl} + \text{наноFe}$ в собственном свете (обычная скоростная видеозапись) и с использованием различных схем лазерного монитора.

В докладе также представлены результаты скоростной визуализации поверхности образца твердого топлива во время горения. Твердое топливо на основе микронного порошка алюминия АСД-6М является примером смеси, горение которой сопровождается не только ярким свечением, но и значительным разлетом продуктов сгорания [4]. Применение дистанционного лазерного монитора позволило визуализировать поверхность горящего образца, и оценить скорость и характер процесса горения.

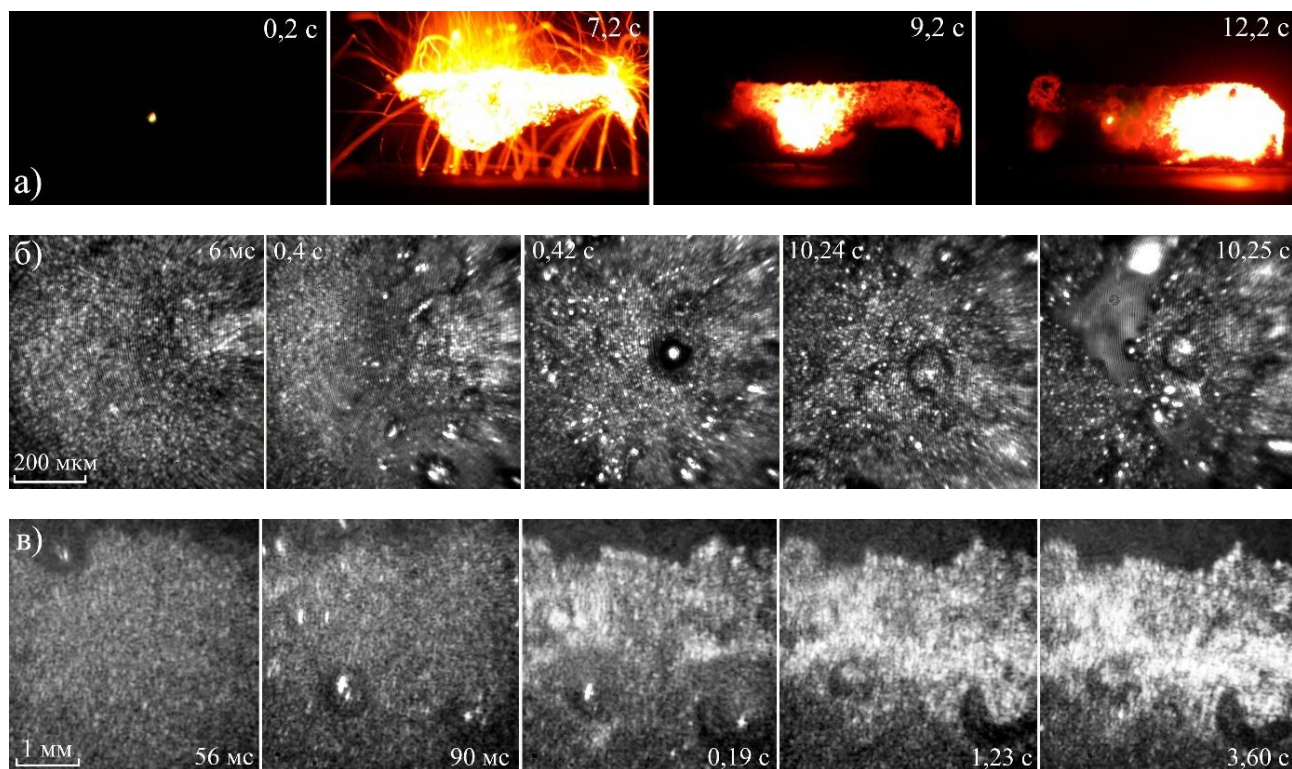


Рисунок. Кадры скоростной видеозаписи процесса горения смеси $\text{nanoAl} + \text{nanoFe}$ в собственном свете (а), при наблюдении с использованием традиционной (а) и дистанционной (б) схем лазерного монитора

Список литературы

1. Zarko V.E., Gromov A.A. Energetic nanomaterials: synthesis, characterization, and application. Elsevier, Amsterdam, 2016.
2. Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin [et al.] // IEEE T. Instrum. Meas. 2019 (early access).
3. Laser systems for distant monitoring of nanopowder combustion / L. Li, P.A. Antipov, A.V. Mostovshchikov [et al.] // PIER M 2019. Vol. 84. P. 85–93.
4. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants / A.G. Korotkikh, O.G. Glotov, V.A. Arkhipov [et al.] // Combust. Flame 2017. Vol. 178. P. 195–204.

УДК 665.765:679.826-022.532

А.П. Пузырь¹, Г.Е. Селютин², А.Е. Буров^{1,3}, В.С. Бондарь¹¹ Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Институт химии и химической технологии ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия³ Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярск, Россия

НАНОАЛМАЗЫ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА В ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗКАХ

Трение и износ являются основными причинами выхода из строя машин и оборудования. Использование смазочных материалов позволяет увеличить время эксплуатации механизмов с узлами трения. Существует большое количество работ, в которых показано, что добавление углеродных наноматериалов улучшает трибологические характеристики смазочных материалов. Исторически сложилось так, что наибольшее внимание уделялось изучению увеличения эксплуатационных характеристик моторных и трансмиссионных масел. Консистентным смазкам, применяемым практически во всех механизмах, уделялось гораздо меньше внимания.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния добавления наноалмазов детонационного синтеза (ДНА) на трибологические и эксплуатационные характеристики пластичных смазок. В исследованиях использовались коммерческие смазки и ДНА российского и зарубежного производства. Результаты проведенных трибологических исследований на четырехшариковых машинах трения представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Усредненные результаты испытаний консистентных смазок
(по данным HeiLongjiang Huasheng Graphite Co., LTD, Китай)

Смазочный материал	Концентрация ДНА, масс. %	Время испытания, с			Диаметр пятна контакта, мм	
		300	600	1 800		
		Нагрузка при испытании, Н				
		300	600	1 000		
Литол-2424	0			0,09 схватывание после 10 с		
	0,04	0,092	0,082	0,078	0,62	
Китайский аналог Литола-24	0			0,15 схватывание после 11 с		
	0,04	0,096	0,09	0,064	1,03	
Силиконовая	0	0,216	схватывание после 9 с			
	1,5	0,137	0,109	0,058	0,65	

Согласно результатам трибологических испытаний, независимо от типа используемых смазок и ДНА добавление наночастиц приводит к увеличению несущей способности пластичных смазок, включая силиконовую смазку.

В результате заводских и стендовых испытаний было показано, что пластичные смазки, содержащие ДНА, способны восстанавливать технические характеристики изношенных



или несоответствующих техническим условиям узлы трения. Так, простая замена смазки «Литол-24» на смазку с ДНА без замены подшипников шпиндельного узла станка ИС-500 (ОАО «Красмаш») и последующая 80-часовая работа станка привели к снижению уровня вибрации вследствие частичной компенсации износа поверхностей трения. После 200 ч работы станка радиальная вибрация шпиндельного узла в режиме нагрузки снизилась с 24 до 15 dB, горизонтальная – с 23 до 12 dB, торцевая – с 13,5 до 10 dB. Испытания смазки «Орбита» (ПО «КОРПУС» Федерального космического агентства) с ДНА в приборах датчика угловых скоростей с несоответствующими электромеханическими параметрами, геометрией и внешним видом шарикоподшипников (коррозия, вмятины, наколы) привели к восстановлению геометрии поверхностей трения и требуемых рабочих характеристик. Проверка работоспособности в течение 100 ч в экстремальных условиях для данных изделий показала, что приборы соответствуют конструкторской документации и проходят приемо-сдаточные испытания.

Таблица 2

Результаты испытаний консистентной смазки (CHANG AM LS CO., LTD, Корея)
при нагрузке 1,23 кН

Концентрация ДНА, масс.%	0	0,2	0,4	0,5
Диаметр пятна контакта, мм	0,84	0,80	0,71	0,85
Коэффициент трения	0,1849	0,1693	0,1750	0,1733

Полученные результаты однозначно показывают, что добавление ДНА в пластичные смазки улучшает их трибологические характеристики, увеличивает несущую способность и восстанавливает изношенные поверхности трения. В докладе представлены результаты и акты проведенных испытаний.

За возможность проведения испытаний авторы благодарны заместителю главного технолога ПО «КОРПУС» Федерального космического агентства А.В. Ефимову, генеральному директору ОАО «Красмаш» В.А. Колмыкову, главному инженеру – техническому директору ОАО «Красмаш» Л.Н. Кайчук, сотрудникам HeiLongjiang Huasheng Graphite Co., LTD (Китай) и Daewha Alloy Tech (Корея).

УДК 621.892.8:620.22-022.532

Г.Е. Селютин¹, А.П. Пузырь², А.Е. Буров^{2,3}¹ Институт химии и химической технологии ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия³ Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярск, Россия**УГЛЕРОДНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАСЛАХ**

С 1983 по 1996 г. А.М. Ставер, являясь ректором Политехнического института, организовал в Красноярске процесс синтеза и выделения из детонационной шихты наноалмазов. Под его руководством было показано, что добавление в масло детонационной шихты сокращает время обкатки новых двигателей. Полученный положительный результат стимулировал дальнейшие изучения влияния углеродных наноматериалов на свойства масел. В настоящее время спектр таких материалов существенно расширился – наноалмазы, фуллерены, нанотрубки, графены, нановолокна.

Настоящая работа посвящена исследованиям влияния наноалмазов детонационного синтеза (ДНА), нановолокон и графенов на трибологические и эксплуатационным характеристикам моторных масел. В исследованиях использовались материалы российского и зарубежного производства, для которых была решена главная проблема, длительное время препятствующая их применению, – получение коллоидно-устойчивых масляных суспензий.

Согласно результатам испытаний общей продолжительностью 45 мин, проведенных на четырехшариковой машине трения в HeiLongjiang Huasheng Graphite Co., LTD (Китай), введение нановолокон или графенов уменьшает коэффициент трения и диаметр пятна контакта (таблица).

Таблица

Результаты испытаний моторных масел

Смазочный материал	Концентрация углеродного наноматериала, масс%	Нагрузка при испытании, Н			Диаметр пятна контакта, мм
		300	600	1 000	
		Коэффициент трения			
Моторное масло	0	0,068	0,072	0,078	0,68
Моторное масло + нановолокна	0,01	0,063	0,078	0,055	0,66
Моторное масло + графены	0,04	0,064	0,054	0,049	0,59

На основе разработанных технологий были получены сертификаты государственного образца в г. Хэган (Китай) и фирмой HeiLongjiang Huasheng Graphite Co., LTD, проводятся пусконаладочные работы по запуску промышленного производства автомобильных масел, содержащих графен. В настоящее время в Железногорске эффективность масла с графеном проверяется при эксплуатации пассажирского автотранспорта.



Необходимо отметить, что трибологические и эксплуатационные испытания масел, имеющих в составе ДНА, проводились в течение ряда лет и показали положительный эффект (испытательный центр «Надежность» (г. Самара), ИП «Шнуряев» (Челябинская обл.), ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть» и др.). Например, в результате промышленных испытаний на медном заводе ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» применение ДНА в составе масла позволило в три раза увеличить срок эксплуатации подшипников редуктора дымососа марки ГД20-500У. Эффективность масел, содержащих ДНА, была подтверждена испытаниями за рубежом. По данным Государственной испытательной лаборатории по транспортной безопасности и экономному расходованию ресурсов Университета Циньхуа (Пекин), использование в маслах ДНА при эксплуатации новых легковых автомобилей в городских условиях приводит к снижению выбросов до 4,4 %, а расхода топлива до 5,67 %.

При эксплуатации легковых автомобилей с высокой степенью износа цилиндропоршневой группы использование в маслах ДНА позволяет снизить выбросы СО и СН до трех раз, а расход топлива до 20 % (по данным Харбинского политехнического института).

Таким образом, добавление углеродных наночастиц с определенными свойствами в оптимальной концентрации приводит к повышению трибологических характеристик масел и, как следствие, к улучшению их эксплуатационных свойств. Результаты натурных испытаний показывают, что при эксплуатации автомобилей применение масел с наноуглеродными материалами дает экономический и экологический эффект. Большинство серийно выпускаемых масел, обладая хорошими трибологическими характеристиками, содержат в своем составе сульфонаты, которые провоцируют коррозионный износ металла и наносят вред экологии. Углеродные наноматериалы не обладают этими недостатками. С большой степенью вероятности можно прогнозировать, что в ближайшее десятилетие основные производители масел будут использовать углеродные наноматериалы взамен сульфонатов. Подтверждением этому является появление на рынке графеновых масел, произведенных в Испании и США.



УДК 679.826-022.532:534-8

А.Л. Верещагин, Н.В. Бычин, О.Б. Кудряшова, Е.А. Петров

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

КОАЛЕСЦЕНЦИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО УГЛЕРОДА УЛЬТРАЗВУКОМ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Имплозии в облаках кавитирующих пузырьков создают температуру 5 000 К и давление 1000 бар [1]. Чрезвычайно короткие времена жизни кавитационных событий приводят к скорости нагрева и охлаждения более 10^{10} К с⁻¹ [2]. В результате экстремальных условий при обрушении кавитационного пузыря инициируются как физические, так и химические процессы.

Принимая во внимание такой мощный синтетический потенциал кавитационных процессов, неудивительно, что в них образуются метастабильные нанофазы углерода – в процессах гидродинамической [3], акустической [4; 5] и электроразрядной кавитации [6; 7].

Целью данной работы является изучение влияния ультразвуковой обработки на дисперсность детонационного углерода в масляных суспензиях.

По экспериментальным оценкам при частоте ультразвука 20 кГц кавитационные пузырьки имеют размер порядка 170 мкм [8]. Отсюда следует, что в нашем эксперименте ультразвуковая обработка (22 кГц, 8 Вт/см²) золь должна создавать главным образом режим дезагрегации кластеров наночастиц.

Для исследования был взят образец УДАГ – детонационного углерода, представляющего собой конденсированные продукты детонации сплава тринитротолуола с гексогеном состава 60/40 и состоящего из неалмазной и алмазной фаз углерода. Для ультразвуковой обработки были приготовлены суспензии детонационного углерода в полусинтетическом моторном масле 10w40 с массовой долей УДАГ 1 %.

Определялся размер частиц образцов УДАГ методами оптической и электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

На первом этапе происходит диспергирование частиц примерно в 4 раза – с 8 до 2 мкм. Последующее облучение привело к росту частиц до 8,9 мкм.

Исследование осадка методом СЭМ показало образование отдельных частиц углеродной фазы неправильной формы размером 2×20 мкм.

По данным рентгенографии первоначальный размер кристаллитов ДНА увеличился с 32,5 до 38,2 А, что выше ошибки измерения.

Коалесценция частиц УДАГ может быть объяснена большим запасом поверхностной энергии и ее минимизацией при росте частиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-19070 мк.



Список литературы

1. Suslick K.S., Flannigan D.J. (2008) Inside a collapsing bubble: sonoluminescence and the conditions during cavitation // *Annu Rev Phys Chem* 59:659–683. DOI: 10.1146/annurev.physchem.59.032607.093739.
2. Xu H., Eddingsaas N.C., Suslick K.S. (2009) Spatial separation of cavitating bubble populations: the nanodroplet injection model // *J. Am. Chem. Soc.* 131(17):6060–6061.
3. Экспериментальное подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации / Э.М. Галимов, А.М. Кудин, В.Н. Скоробогатский [и др.] // *Докл. Акад. наук.* 2004. Т. 395, № 2. С. 187–191.
4. Carbon spheres synthesized by ultrasonic treatment / Z. Wang, L.Yu, W. Zhang, Z. Zhu. // *Physics Letters A.* 2003. Vol. 307, is. 4. P. 249–252.
5. Стеблева О.В., Верещагин А.Л., Леонов Г.В. Способ получения наночастиц углеродной фазы в процессе ультразвуковой кавитации // *Ползуновский вестн.* 2008. № 1–2. С. 38–40.
6. Получение углеродных наноматериалов в процессе электроразрядной обработки органических жидкостей / Н.И. Кускова, А.Н. Ющишина, А.П. Малюшевская [и др.] // *Электронная обработка материалов.* 2010. № 2. С.72–76.
7. Hinman J.J., Suslick K.S. Nanostructured Materials Synthesis Using Ultrasound // *Top Curr. Chem. (Z).* 2017. № 375: 12. URL: <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0100-9>.
8. Suslick K.S. Sonochemistry // *Science.* 1990. Vol. 247, № 4949. P. 1439–1445.



УДК 679.826-022.532:544.452

А.Л. Верещагин, Е.А. Петров, А.В. Сергиенко, А.А. Колесова

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

ГОРЕНИЕ СОСТАВОВ С ДЕТОНАЦИОННЫМИ НАНОАЛМАЗАМИ

Детонационные наноалмазы (ДНА) по таким показателям, как энергоемкость (энтальпия образования 41,173 кДж/моль) и плотность 3 210 кг/м³ [1], представляют определенный интерес как компонент твердого ракетного топлива. Однако высокая стоимость ДНА существенно ограничивает их применение по этому назначению. В недавно опубликованной работе [2] были проведены расчеты эффективности использования ДНА в качестве высокоплотных и энергоемких компонентов СТРТ. Расчеты были проведены по влиянию ДНА на термодинамический удельный импульс эталонного топливного состава, состоящего из базовых компонентов: 80 % перхлората аммония (ПХА) и 20 % активного горючесвязующего вещества (АГСВ).

Проведенное моделирование составов СТРТ и анализ полученных результатов показали возможность выбора перспективных смесевых составов, использующих ДНА в качестве эффективного компонента СТРТ в массовой доле до 10 %, и представляют практический интерес для проектирования и изготовления перспективных твердых ракетных топлив, содержащих наночастицы.

Однако исследование взаимодействия ДНА с нитритом натрия [3] показало, что их реакция сопровождается интенсивным диспергированием в отличие от смеси нитрита натрия с сажей. Объяснение этому может быть связано с наличием газовых включений в ДНА. По расчетам, представленным в работе [1], эти газовые включения состоят из азота и водорода и находятся под давлением порядка 200 МПа.

В связи с изложенным выше целью настоящей работы является экспериментальное исследование горения модельных составов с ДНА.

Модельная топливная смесь содержала активное горючее, октоген и углеродные добавки (сажа, детонационный углерод и ДНА). В качестве исходной модельной топливной композиции выбрана смесь из 40 % связующего и 60 % октогена и от 3 до 10 % углеродной добавки сверх 100 %.

Зависимость линейной скорости горения модельных составов от давления представлялась в форме $U = A \cdot P^v$ и определялась в бомбе постоянного давления при комнатной температуре (таблица).

Замена сажи на УДАГ незначительно повышает скорость горения по сравнению с сажей. Введение выделенных из шихты алмазов приводит к более значительному повышению скорости горения за счет увеличения показателя в законе скорости горения – до 10 раз при давлении 14 Мпа.



Таблица

Влияние добавок на скорость горения

Добавка	A, мм/МПа·с	$v \pm \Delta S$ (при $P = 6-14$ МПа)	Δv , %	$z = \frac{u_{\text{модифицированного}}}{u_{\text{базового состава}}}$ при P, МПа		
				6	10	14
Сажа	1,01±0,3	0,93±0,3	–	–	–	–
УН-Г2	1,6±0,3	0,96±0,2	3,2	1,67	1,70	1,71
УН-А2	0,123±0,2	2,23±0,2	140	1,25	2,43	3,76
УН-Г6	4,69±0,2	0,5±0,2	–46,2	2,15	1,73	1,49
УН-А6	1,2±0,2	1,75±0,2	88,2	5,16	7,85	10,3

Таким образом, введение ДНА в состав данного типа может в определенных условиях привести к переходу процесса горения в режим детонации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19070 мк.

Список литературы

1. Верещагин А.Л. Свойства детонационных наноалмазов // Алт. гос. тех. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. 134 с.
2. Детонационный наноалмаз – как перспективный компонент смесевых твердых ракетных топлив / В.А. Горбачев, Е.Ю. Убей-Волк, Н.В. Шевченко, А.А. Голубев // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59, вып. 8. С. 96–100.
3. Верещагин А.Л., Бычин Н.В., Реакционная калориметрия детонационных наноалмазов // Ползуновский вестн. 2017. № 2. С. 77–81.

УДК 669.35-191-022.532:577.114.4-047.84

**Т.В. Трофимова, С.В. Сайкова,
А.Ю. Павликов, Д.В. Карпов, М.Н. Волочаев**

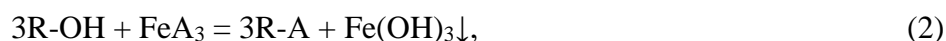
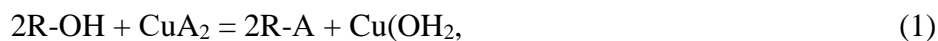
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ФЕРРИТА МЕДИ В ПРИСУТВИИ ПОЛИСАХАРИДОВ

Ферриты являются востребованными магнитными материалами, которые широко применяются в электронике, телекоммуникационном и космическом оборудовании, электродвигателях, а также в медицине в качестве средства доставки лекарственных препаратов в организм человека [1].

Существующие методы получения CuFe_2O_4 (твердофазный синтез из исходных оксидов, золь-гель методы и метод химического соосаждения) имеют ряд недостатков [2]. В данной работе для синтеза нанопорошков феррита меди предлагается метод анионообменного осаждения [3], который обеспечивает получение однородного продукта, не содержащего примесей и не нуждающегося в многократных операциях промывки и очистки [4].

Процесс основан на ионном обмене между анионами исходных солей и ОН-группами анионообменной смолы. Он протекает в гетерогенной системе анионит-раствор, где на границе раздела фаз происходит формирование новой фазы – осадка, представляющего собой совместно осажденные гидроксиды металлов:



где А – анион исходной соли (NO_3^- , $1/2 \text{SO}_4^{2-}$); R-OH, R-A – анионит в ОН и анионной формах, соответственно.

Ранее нами [2; 5] были получены порошки CuFe_2O_4 с частицами размером 100–200 нм. С целью уменьшения размеров частиц в данной работе использованы растворы полисахаридов (декстран и инулин), отличающихся молекулярной массой (М), которые стабилизируют систему и предотвращают агломерацию частиц.

Установлено, что при использовании любого типа полисахарида основная доля металлов осаждается в виде отдельной фазы осадка, а количество катионов в фазе анионита и раствора незначительно. По данным рентгенофазового анализа (РФА) продукты, полученные с использованием декстрана-40 после прокаливании, представляют собой чистые фазы ферритов. Однако размер частиц зависит от молярной массы полисахарида.

Таким образом, молярная масса полисахарида оказывает заметное влияние на рост и агломерацию частиц прекурсоров феррита меди. Можно предположить, что при использовании инулина стабилизация наночастиц не эффективна вследствие его низкой молекулярной массы, а в случае декстрана-70 процесс анионообменного осаждения осложнен более высокой



вязкостью использованных растворов, что, к тому же, приводит к флокуляции частиц. Минимальный размер нанокристаллитов получен при использовании декстрана со средней молекулярной массой $\sim 40\,000$ г/моль. В процессе синтеза формируются однородные нанопорошки, состоящие из частиц с размером 10–20 нм близкой к сферической форме.

Список литературы

1. Synthesis of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nanoparticles using combustion, coprecipitation, and precipitation methods: A comparison study of size, structural, and magnetic properties / H. Mahboubeh, Z. Fatemeh, J.R. Zahra [et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2014. Vol. 371. P. 43–48.
2. Трофимова Т.В., Павликов А.Ю., Сайкова С.В. Новый метод синтеза наноразмерных порошков CoFe_2O_4 // *Вестн. Перм. ун-та. Серия: Химия*. 2017. № 2, Т. 7. С. 137–144.
3. Определение оптимальных условий ионообменного синтеза гидроксида кобальта(II) с помощью анионита АВ-17-8 в ОН-форме / С.В. Сайкова, М.В. Пантелеева, Р.Б. Николаева [и др.] // *Журнал прикладной химии*. 2002. Т. 75, № 11. С.1823–1825.
4. Белов К.П., Зайцева М.А. Новые магнитные материалы – феррит-гранаты // *Успехи физических наук*. 1058. Т. 66, № 1. С. 141–144.
5. Pashkov G.L., Saikova S.V., Panteleeva M.V. Anion-exchange synthesis of yttrium-aluminum garnet powders // *Glass and Ceramics*. 2016. № 3. P. 107–110.



УДК 544.147:679.826-022.532+577.152.1:582.28

О.А. Могильная, Н.О. Ронжин

Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗОВ И ЭКСТРАКТЕЧНЫХ ОКСИДАЗ СВЕТЯЩЕГОСЯ ГРИБА *NEONOTHOPANUS NAMBI*

Аналитические системы на основе иммобилизованных пептидных биомаркеров находят широкое применение в разных сферах человеческой деятельности – мониторинге загрязнений окружающей среды, медицинской диагностике, фарминдустрии, пищевой промышленности, сельском хозяйстве. Потребность в таких системах огромна, поскольку их отличает, прежде всего, высокая селективность и чувствительность, а также относительная простота и быстрота проводимого анализа. Базидиомицеты обладают высоким биотехнологическим потенциалом благодаря уникальным ферментным системам, участвующим в разложении растительного материала (лигнина и целлюлозы). Экстраклеточные ферменты грибов активно исследуются и применяются в качестве пептидных биомаркеров для иммобилизации и конструирования сенсорных и аналитических систем. Применению грибных секретлируемых оксидаз в аналитических системах зачастую мешает недостаточная стабильность ферментов, которая может быть преодолена как улучшением свойств самих ферментов, так и их иммобилизацией на подходящей матрице. Перспективным материалом для иммобилизации ферментов являются наноалмазы детонационного синтеза, интерес к изучению которых не ослабевает на протяжении многих лет. В настоящей работе из мицелия светящегося базидиомицета *Neonothopanus nambi* выделены две фракции экстраклеточных ферментов (Ф1 и Ф2) с оксидазными функциями, имеющими характерные особенности по спектральным характеристикам и каталитической специфичности. С помощью адсорбции каждого из ферментов на модифицированные наноалмазы (МНА) получены супрамолекулярные комплексы, проведена сравнительная оценка активности иммобилизованных ферментов в сравнении со свободными аналогами, а также оценка стабильности комплексов при хранении и многократном использовании. Эксперименты показали, что инкубация каждого из ферментов с частицами МНА (весовое соотношение фермент: МНА = 1 : 6) сопровождалась прочной адсорбцией Ф1 и Ф2 на наночастицы (количество не связавшегося фермента составляло около 15–20 % от исходного). При этом каталитическая активность адсорбированного фермента Ф1 была существенно ниже по сравнению со свободным ферментом и значительно снижалась как при последовательном трехкратном использовании комплекса для окисления субстрата (вератрилового спирта), так и по мере его хранения при 40 °С в течение 15 суток. В то же время иммобилизованный на МНА фермент Ф2 в реакции соокисления фенола и 4-аминоантипирина проявлял в 10 раз большую активность по сравнению с активностью свободного фермента. Данный комплекс сохранял 70 % своей функциональной активности и коллоидную стабильность при хранении в виде водной суспензии при 40 °С в течение 15 суток (рисунок).

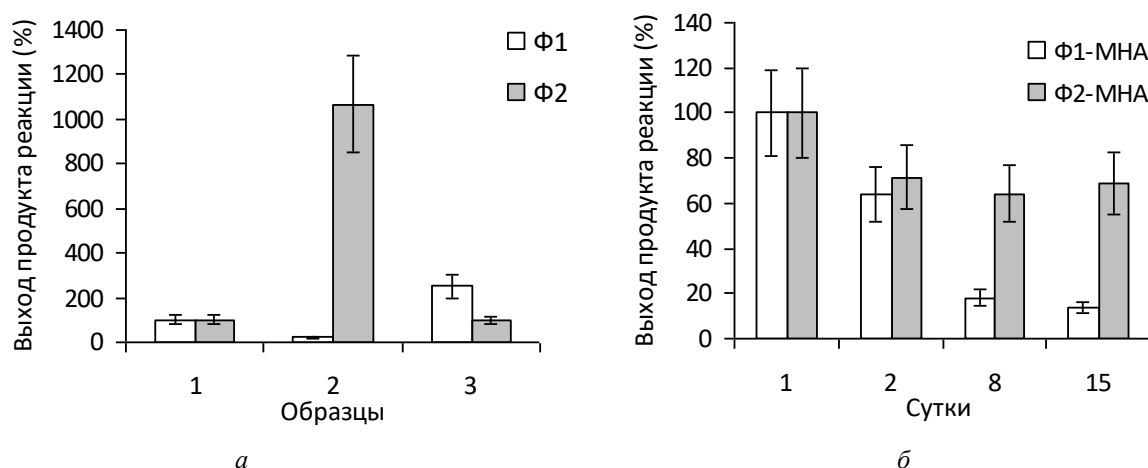


Рисунок. (а) Выход продуктов реакции окисления вератрилового спирта ферментом Ф1 и реакции соокисления фенола и 4-аминоантипирина ферментом Ф2 в образцах на стадиях получения комплексов с МНА: 1 – свободные ферменты; 2 – ферменты, адсорбированные на МНА; 3 – супернатанты после обработки растворов ферментов частицами МНА. (б) Активность супрамолекулярных комплексов при хранении в виде водной суспензии при 40 °С в течение 15 суток. Данные рассчитаны на мг белка и нормированы на выход продукта в реакции со свободными ферментами

Таким образом, результаты исследований показали, что выделенные оксидазы из бази-диомицета *Neonothopanus nambi* по-разному сохраняют свою каталитическую активность после адсорбции на наночастицы алмаза. Полученный в работе комплекс Ф2-МНА, благодаря эффекту увеличения активности и достаточной стабильности фермента после иммобилизации, представляет интерес для его дальнейшего изучения как перспективного индикаторного элемента в конструировании ферментативного биосенсора, например, для обнаружения фенола в водной среде.



УДК 669.248:544.016

И.А. Рогова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ СОВМЕСТНОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Химические никель-фосфорные покрытия широко используются для защиты деталей машин и механизмов, так как обладают рядом ценных свойств [1]. При этом сам процесс химического никелирования занимает длительное время. Соответственно, описанный способ [2] совместного нанесения химического и электрохимического никеля из раствора электролита химического никелирования позволил получать покрытия за меньшее время. Следовательно, целью данного исследования было получение и изучение физико-химических свойств никель-фосфорных покрытий, полученных при совместном химическом и электрохимическом никелировании.

Совместное нанесение химического и электрохимического никеля проводили в растворе химического никелирования с использованием трехэлектродной системы. Рабочим электродом была алюминиевая пластина, на которую осаждали никель. В зависимости от смещения стационарного потенциала алюминиевой пластины в катодную область были получены никелевые покрытия с разными характеристиками (таблица).

Таблица

Зависимость физико-химических характеристик
никель-фосфорного покрытия от катодного смещения стационарного потенциала

Смещение стационарного потенциала поверхности, В	Средняя скорость осаждения, мкм/ч	Количество фосфора, мас. %	Шероховатость Ra, мкм	Твердость, МПа	Усилие отрыва, Н
-0,01					
-0,05					
-0,10					

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при смещении стационарного потенциала алюминиевой пластины в катодную область увеличивается средняя скорость осаждения никеля. Следовательно, сокращается время, за которое можно получить покрытия большей толщины, чем при стандартном химическом никелировании. При этом покрытия, полученные совместным нанесением никеля, отличаются от химически полученного по физико-химическим характеристикам. С увеличением смещения стационарного потен-

циала увеличивается твердость покрытий, а также адгезионные характеристики, но снижается содержание фосфора в покрытии и уменьшается шероховатость.

На рисунке, *a* представлена типичная микрофотография структуры поверхности никелевого покрытия, полученного химическим способом: поверхность однородная, среднеповерхностный размер кристаллитов составляет 2 мкм. Наиболее близкий по структуре к химическому покрытию является образец, полученный при катодном смещении на $-0,05$ В (рисунок, *б*).

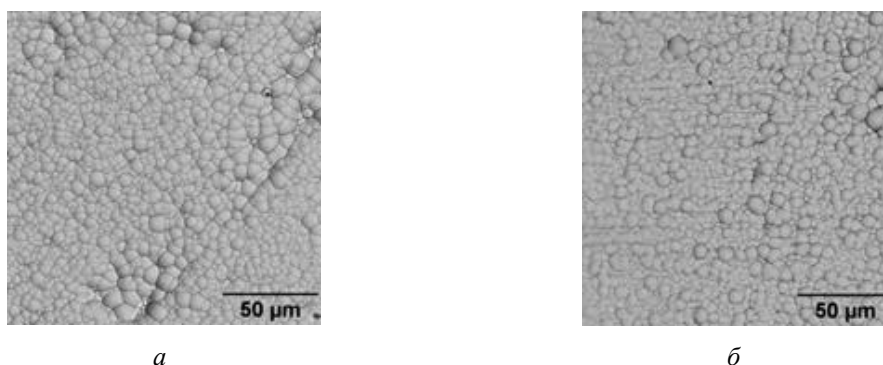


Рисунок. Микрофотографии поверхности образцов (увеличение 1 000 раз), полученных покрытий: *a* – никель осажден химически; *б* – покрытие получено при смещении потенциала поверхности подложки на $-0,05$ В

Использование способа совместного химического и электрохимического никелирования позволяет за меньшее время получать покрытия с лучшими характеристиками, чем у химического покрытия.

Список литературы

1. Volkova I.R., Chiganova G.A., Kiseleva S.A. The structure and main characteristics of diamond-bearing Ni–P coatings // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2018. Т. 54, №. 1. С. 95–98.
2. Рогова И.А., Ильин А.П., Налесник О.И. Влияние смещения стационарного потенциала алюминиевой поверхности на микрорельеф и свойства никель-фосфорных покрытий // Лучшая научно-исследовательская работа 2018: сб. ст. XVII Междунар. науч.-исслед. конкурса. 2018. С. 26–30.

УДК 548.736.65:66.095.712:544.556.1

А.В. Ушаков^{1,2}, И.В. Карпов^{1,2}¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР

Металлоорганические каркасные структуры (МОК) представляют собой пористые материалы с высокой площадью поверхности. Каркас МОК состоит из органических молекул – линкеров, которые связывают вторичные структурные единицы. МОК открывает широкие перспективы для создания уникальных материалов обладающих высокой селективностью при высокой скорости процессов [1]. Например, в разделении газов, катализе, реакциях ионного обмена, создавая серьезную конкуренцию цеолитам.

МОК обычно синтезируют гидротермальными или электрохимическими методами [2], кристаллизацией из раствора. В этой связи вода и особенно органические растворители заполняют поры вместе с остатками непрореагировавших веществ, поэтому возникает необходимость в постсинтетической обработке МОК – очистке и активации.

В данной работе для синтеза МОК предлагается плазмохимический метод с применением плазмы дугового разряда низкого давления, хорошо зарекомендовавший себя для прямого синтеза наночастиц различного химического состава [3]. Для плазмохимического метода характерно наличие в плазме сверхнасыщенных паров исходных соединений и высокие скорости их закалки. Изменение энергии частиц в процессе конденсации позволяет получать различные структуры конкретного материала.

На рис. 1 приведены снимки высокоразрешающей просвечивающей микроскопии, гistogramмы распределения частиц и функции плотности распределения по размерам наночастиц Cu-МОФ, полученных в плазме дугового разряда при давлении газовой смеси 90%Ar + 7%O₂ + 3%С₁₅Н₃₂ 80 Па. Как следует из полученных результатов, порошок Cu-МОФ представляет собой сильно агломерированные частицы почти сферической формы. На снимке (рис. 1) видна кристаллическая упорядоченность наночастиц с большим (порядка 2 нм) параметром решетки. Размеры частиц варьируются в диапазоне от 5 до 30 нм. Средний размер частиц 13 нм.

Как следует из рентгенограмм, представленных на рис. 2, полученный нанопорошок имеет сложный химический состав и состоит из четырех кристаллических фаз, соответствующих [Cu₃(BTC)₂], Cu, Cu₂O и CuO. При увеличении подачи C₁₅H₃₂ до 2 % содержания Cu-BTC растет, однако при увеличении подачи C₁₅H₃₂ до 3 % содержание Cu-BTC практически не увеличивается. Это связано с особенностью плазмохимического синтеза, при котором химические реакции получаемых наночастиц проходят в термодинамически неравновесных условиях, с нарушением стехиометрии, при больших остаточных напряжениях и дефектности кристаллической структуры [4].

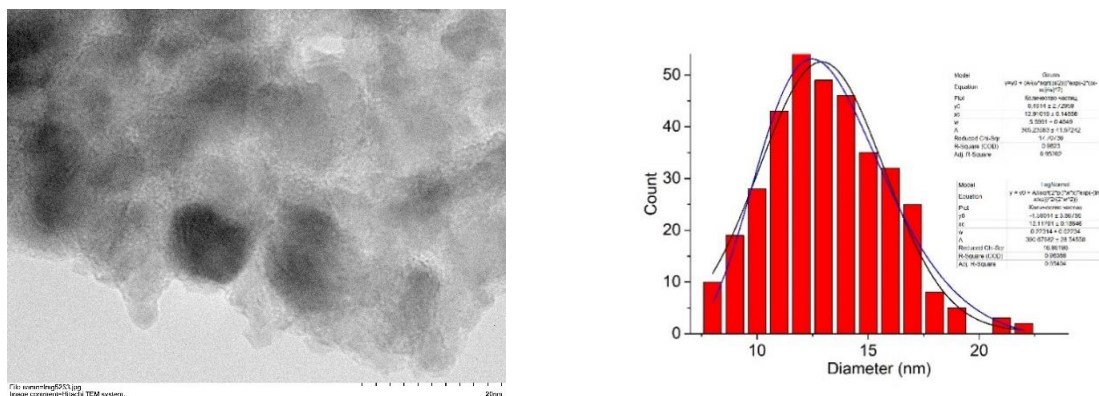


Рис. 1. ПЭМ изображения, гистограмма и функции распределения плотности вероятности наноразмерных порошков Cu-MOF

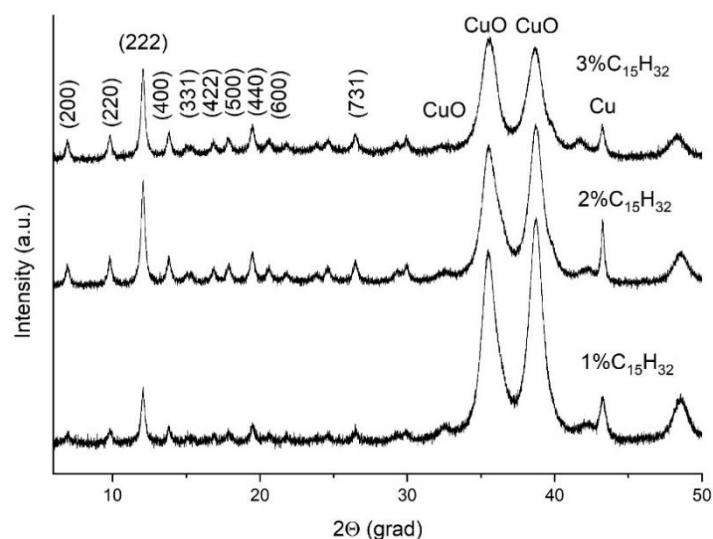


Рис. 2. Порошковая рентгенограмма наночастиц Cu-MOF, полученных в плазме дугового разряда при давлении газовой смеси 90%Ar + 7%O₂ + (1–3%)C₁₅H₃₂ 80 Па

Список литературы

1. The chemistry and applications of metal-organic frameworks / H. Furukawa, K.E. Cordova, M. O’Keeffe, O.M. Yaghi // Science. 2013. № 341. 1230444.
2. Schlichte K., Kratzke T., Kaskel S. Improved synthesis, thermal stability and catalytic properties of the metal-organic framework compound Cu₃(BTC)₂ // Microporous and Mesoporous Materials. 2004. № 73. 81–8.
3. Copper oxide of plasma-chemical synthesis for doping superconducting materials / A.V. Ushakov, I.V. Karpov, A.A. Lepeshev, L.Yu. Fedorov // Int. J. of Nanoscience. 2017. № 16. 1750001.
4. Plasma-chemical reactor based on a low-pressure pulsed arc discharge for synthesis of nanopowders / I.V. Karpov, A.V. Ushakov, A.A. Lepeshev, L.Yu. Fedorov // Technical Physics. 2017. № 62. P. 168–173.



УДК 621.762.2-033.78

С.А. Белякович, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДИБОРИДА ГАФНИЯ И МИКРОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

В связи с развитием ядерных технологий существует необходимость в создании материалов для защиты от ионизирующего и нейтронного излучений, обладающих невысокой плотностью и низкими массогабаритными характеристиками получаемых изделий. В качестве решения предложен материал на основе алюминия и диборида гафния, так как последний характеризуется высокой поглощающей способностью нейтронов и γ -излучения и рекомендуется в системах защиты персонала от излучений. Вместе с тем диборид гафния является хрупким материалом, поэтому для исследования поглощающих способностей предложен его сплав с алюминием [1–3].

Целью работы являлось получение металлокерамического материала на основе диборида гафния и микропорошка алюминия, активированного СВЧ-излучением.

Среднеповерхностный диаметр частиц порошка алюминия составляет 2,3 мкм, форма частиц близка к сферической. Порошок произведен с помощью распыления расплава алюминия в специальной атмосфере [4]. Содержание алюминия в порошке – 97 масс. %. Облучение порошка проводили согласно параметрам и методике, описанным в [5]. Для приготовления образцов материала использовали смеси HfB_2 : Al, равные 90 : 10, 50 : 20, 50 : 50, 10 : 90 масс. %, состав смесей порошков представлен в таблице. Полученные смеси прессовали с помощью гидравлического пресса. Давление прессования – 1,5 МПа. Спекание прессованных таблеток осуществляли в муфельной печи при 550 °С в условиях ограниченного доступа кислорода в течение 4 ч. Рентгенофазовый анализ (РФА) спеченных образцов проводили с использованием дифрактометра «Дифрей–401» (излучение рентгеновской трубки $F_{K\alpha}$, $\lambda = 1,93 \text{ \AA}$).

Таблица

Состав исходных смесей порошков HfB_2 и Al

№ п/п	Содержание HfB_2 , масс. %	Содержание Al, масс. %	Содержание добавки, масс. %	Масса смеси, г
1	90	10	0	5,5
2	50	50	0	10
3	10	90	0	9,5
4	50	20	30	8

Методом визуального контроля механическая прочность образцов с необлученным алюминием и образцов с СВЧ-облученным алюминием была оценена как удовлетворительная.



Согласно результатам РФА, на поверхности образца обнаружен бор, окисленный до B_2O_3 . Al_2O_3 на поверхности не был обнаружен. Согласно полученным результатам фазовый состав спеченных образцов согласуется с составом спеченных образцов и соответствует аддитивности состава компонентов. В то же время имеются значимые отличия в результатах РФА для образцов под номерами 3 и 4. В первом случае для образца 3 это может быть объяснено несовершенством однородности структуры, когда большая часть алюминия сконцентрировалась в поверхностном слое образца. Для образца 4 различие в содержании продуктов спекания связано с возможностью окисления добавки (W) при повреждении сплошности структуры.

Таким образом, основываясь на визуальном контроле образцов и результатах РФА, произошло повышение активности порошков алюминия в результате воздействия СВЧ-излучения и, как следствие этого, улучшение параметров спекания образцов, изготовленных на их основе.

Список литературы

1. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1991. 352 с.
2. Филянд М.А., Семенова Е.И. Свойства редких элементов. М.: Metallurgy, 1964. 899 с.
3. Дрица М.Е. Свойства элементов. М.: Metallurgy, 1985. 672 с.
4. Пат. РФ 2559080, МПК В22 F9/08. Способ получения металлических порошков распылением расплавов / С.В. Змановский, В.А. Архипов [и др.]; заявл. 26.11.2012; опублик. 10.03.2014.
5. Влияние СВЧ-излучения на термическую стабильность нанопорошка алюминия / А.В. Моствовщиков, А.П. Ильин. П.Ю. Чумерин [и др.] // Письма в ЖТФ, 2016. Т. 42, вып. 7. С. 17–22.



УДК 621.763-022.532:53.085

**Н.О. Ронжин¹, Е.Д. Посохина^{1,2}, Е.В. Михлина³, М.М. Симунин²,
И.И. Рыжков^{2,3}, В.С. Бондарь¹**

¹ Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт вычислительного моделирования ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

КОМПОЗИТ ИЗ НАНОВОЛОКОН ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И НАНОАЛМАЗОВ – ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНДИКАТОРНЫХ СИСТЕМ

Создание новых эффективных средств индикации и диагностики для биологии и медицины – одна из актуальных нанотехнологических задач. Ученые многих стран мира изучают применимость наноматериалов разной физико-химической природы для конструирования аналитических систем биомедицинского назначения. Перспективным материалом для этих целей являются модифицированные наноалмазы (МНА) детонационного синтеза, которые образуют высокостабильные коллоиды в дисперсионных средах. Химически активная полиморфная поверхность МНА и возможности ее химической модификации являются основой для использования данных наночастиц в разработке средств биомедицинской аналитики. Ранее мы обнаружили каталитический эффект МНА в реакции окислительного азосочетания и установили его механизм [1]. Это открыло возможности для применения МНА в создании аналитических тест-систем обнаружения фенола в водной среде. При этом надо сказать, что индикаторные системы на основе МНА, в которых сенсорный элемент (МНА) зафиксирован в твердой матрице, более удобны для практического применения, например, пользования в экологическом мониторинге загрязнений окружающей среды фенольными соединениями.

Из нановолокон оксида алюминия (НВОА) в качестве матрицы и МНА в качестве сенсорного элемента нами создан композит и исследована его применимость для тестирования фенола в водной среде. Получение композита включало (рис. 1): предварительное диспергирование НВОА ультразвуком, смешивание водных суспензий НВОА и МНА при весовом соотношении 5 : 1, инкубацию смеси 15 мин при 32 °С с постоянным перемешиванием, вакуумную фильтрацию смеси через фильтр с диаметром пор 0,6 мкм для формирования из композита круглых дисков диаметром 40 мм, термообработку дисков при 300 °С для придания композиту структурной стабильности в водных растворах.

Показано, что при использованных экспериментальных условиях МНА полностью связываются с НВОА. Взаимодействие НВОА и МНА может происходить из-за разницы их дзета-потенциалов, что обеспечивает ионообменные реакции материалов с образованием их межповерхностных химических связей. По данным сканирующей электронной микроскопии полученный композит имеет сетчатую структуру с распределением МНА по поверхности НВОА (рис. 2, а). Установлено, что в составе композита МНА проявляют каталитическую функцию, обеспечивая образование цветного продукта в реакции окислительного азосочета-

ния. Показана применимость композита НВОА-МНА для многократного тестирования фенола в водной среде (рис. 2, б).

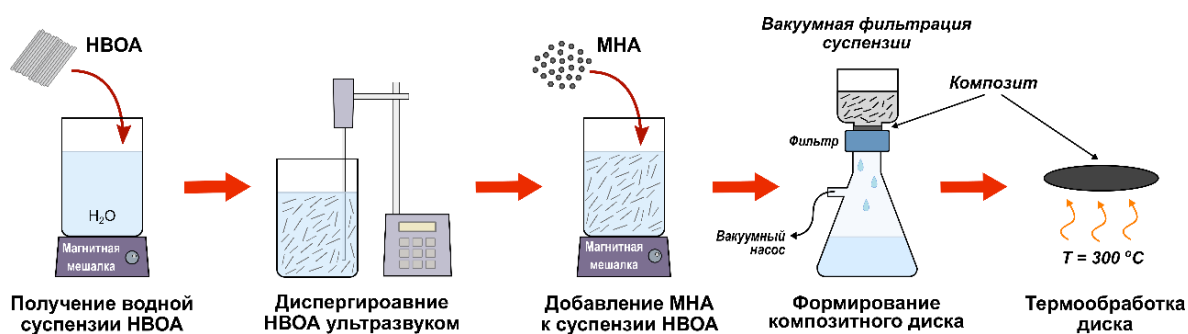


Рис. 1. Схема получения композита НВОА-МНА

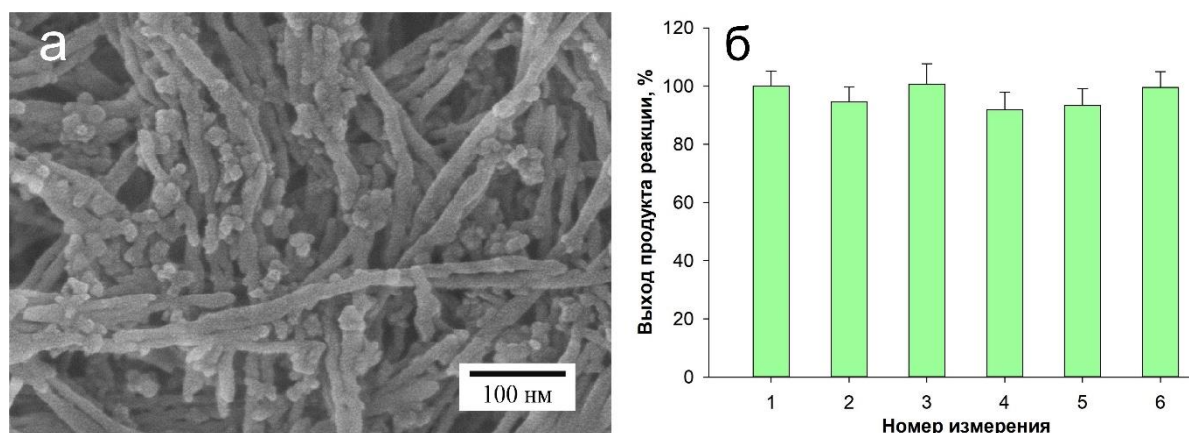


Рис. 2. СЭМ-изображение структуры композита НВОА-МНА (а); выход продукта реакции азосочетания при многократном использовании композита в ходе тестирования фенола в водных образцах с одинаковой концентрацией аналита (б)

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-19078 мк).

Список литературы

1. Ronzhin N.O., Puzyr A.P., Bondar V.S. Journal of nanoscience and nanotechnology. 2018. Vol. 18. P. 5448–5453.

УДК 621.763-022.532

Р.Д. Иванцов¹, С.А. Петерсон²¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия**НАНОКОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ЧАСТИЦ СЛАБОГО
ФЕРРОМАГНЕТИКА α - Fe_2O_3**

Гематит α - Fe_2O_3 представляет собой слабый ферромагнетик, в котором магнитные моменты подрешеток направлены противоположно друг другу под некоторым углом. Наличие такого угла обеспечивает результирующий магнитный момент кристалла. В отличие от известных слабых ферромагнетиков, таких как FeVO_3 , CoCO_3 , MnCO_3 и др., гематит претерпевает переход Морины при 260 К, когда магнитные моменты подрешеток становятся антипараллельными и результирующий магнитный момент исчезает. Из-за разнообразия магнитных свойств и широкого спектра применений этот материал привлекает внимание ученых и разработчиков новых технологий. Наши предварительные исследования выявили высокую магнитооптическую активность гематита при энергии 2,31 эВ, что практически совпадает с энергией излучения зеленого лазера. Это позволяет рассматривать возможность применения гематита в магнитооптических устройствах.

В настоящей работе представлены результаты исследования магнитного кругового дихроизма (МКД) в нанокompозите на основе наночастиц α - Fe_2O_3 , диспергированных в немагнитной прозрачной матрице. Данные рентгеновской дифракции и электронной микроскопии (рис. 1) показали, что наночастицы являются однофазными нанокристаллами α - Fe_2O_3 со средним размером 50 нм.

МКД, который измерялся с помощью установки, использующей модуляцию состояния поляризации световой волны, обусловлен различием поглощения электромагнитных волн, поляризованных по правому и левому кругу относительно направления намагниченности образца, в котором они распространяются.

На рис. 2 приведена спектральная зависимость МКД, которая принципиально отличается от спектров других подобных соединений. В большинстве магнитных материалов амплитуды максимумов МКД резко уменьшаются при уменьшении энергии световой волны (например, [1]). В данном случае наблюдается очень сильная S-образная линия в интервале энергий 2,0–2,5 эВ.

Мы интерпретируем эту линию, как экситон-магнонный процесс, когда электрический дипольный переход происходит одновременно в соседних ионах Fe^{3+} , связанных обменным взаимодействием, и при этом в этих ионах происходят магнитодипольные переходы между подуровнями основного состояния. Таким образом, магнитное состояние пары ионов не изменяется. Электрические дипольные переходы определены как $2 ({}^6\text{A}_{1g} ({}^6\text{S})) \rightarrow 2 ({}^4\text{T}_{1g} ({}^4\text{G}))$, и расстояние от пика до пика S-образной линии приблизительно равно суммарной энергии двух *магнонов в спектре комбинационного рассеяния* α - Fe_2O_3 . При больших энергиях световой волны ($E > 2,5$ эВ) вид спектра МКД гематита близок к спектрам, например, феррита-

граната, бората железа, маггемита [1–3], и он связывается с переходами между основным и возбужденными уровнями иона Fe^{3+} .

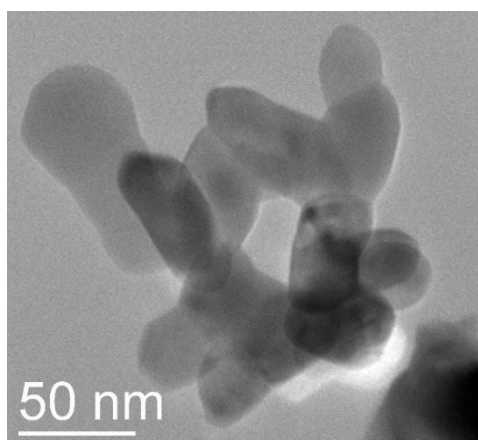


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение нанокристаллов $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

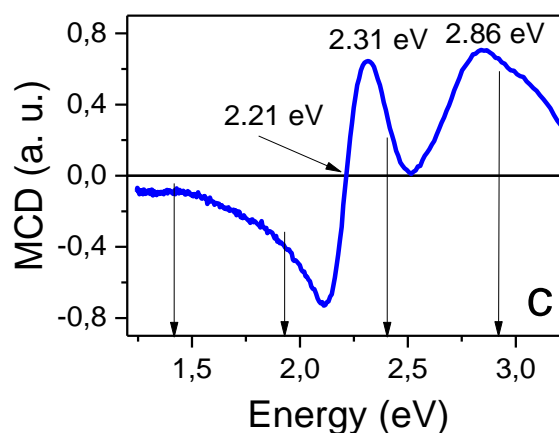


Рис. 2. Спектральная зависимость МКД (MCD) нанокompозита на основе частиц гематита. $H = 1,2$ Тл

В работе детально обсуждается природа обнаруженной в спектре МКД интенсивной полосы в области энергий 2,2–2,3 эВ. Ответственные за нее двух частичные процессы в гематите могут быть обусловлены особенностями симметрии расположения Fe^{3+} в соседних координационных сферах, которые отвечают за переход Морина, наблюдаемой только в гематите.

Список литературы

1. Phys. Rev. B. / G.B. Scott, D.E. Lacklison, H.I. Ralph, J.L. Page. 1975. Т. 12. С. 2562.
2. J. Magn. Magn. Mat. / R. Ivantsov, O. Ivanova [et al.]. (In Press)
3. J. Appl. Phys. / I. Edelman, O. Ivanova, R. Ivantsov [et al.]. 2012. 112. 084331.



УДК 678.074:661.665.1-022.532

Ф.К. Горбунов^{1,2}, В.А. Полубояров^{1,2}, Л.К. Бердникова¹, А.И. Сапрыкин³

¹ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

НАНОЧАСТИЦЫ КАРБИДА КРЕМНИЯ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРА ДЛЯ ЛИТЬЕВОГО ПОЛИУРЕТАНА

Целью работы – изучение влияния наночастицы карбида кремния на структуру, прочностные и упруго-деформационные свойства полимерных материалов на основе литьевого полиуретана (ПУ).

Модификатор был получен термическим разложением моносилана методом адиабатического сжатия газовой смеси: моносилан в аргоне (1 : 9), в состав которой вводили ацетилен в количестве 2,5–15,0 об. %. При стехиометрическом составе газовой смеси в зависимости от условий сжатия возможно получение монодисперсных порошков карбида кремния (SiC) различного размера (от 20 до 70 нм) и структуры (аморфная, кристаллическая или их смесь). При избытке ацетилена получали наночастицы карбида кремния, покрытые углеродной оболочкой различной толщины и модификации. В работе использовали наночастицы SiC размером $d_{\text{ср}} = 50$ нм как в чистом виде, так и покрытые углеродной оболочкой.

Для получения материалов на основе ПУ исходные компоненты (преполимер СКУ ПФЛ-100 и отвердитель УРЕЛИНК-107), разогретые до рабочей температуры (60 и 25 °С соответственно), смешивали в определенном соотношении до гомогенного состояния с последующей дегазацией в вакуум-камере. Полученную смесь выливали в специальную форму открытого типа, в которой и происходит полимеризация полиуретана при температуре 100 °С. Модификатор вводили в материал в процессе синтеза, когда исходные компоненты находились в жидком состоянии.

Введение в ПУ модификатора без углеродной оболочки в количестве менее 1 масс. % приводит к увеличению предела прочности при разрыве и относительного удлинения. Модифицирование карбидом кремния, покрытым углеродной оболочкой, не привело к значительному изменению прочности при разрыве (таблица).

Улучшение эксплуатационных характеристик ПУ в первом случае обусловлено структурными изменениями полимера, происходящими в присутствии наночастиц: немодифицированный полимер имеет размер зерна более 5 мкм. Добавление SiC без углеродной оболочки в количестве 0,0015 масс. % привело к измельчению зерна полимера практически до 2 мкм, что обеспечивает образование более однородной структуры композита и улучшает его служебные характеристики.

Чтобы частицы модификатора могли изменять свойства материала, они должны смачиваться этим материалом. В противном случае эти частицы выступают в качестве дефектов структуры, ухудшающих свойства материала. Керамические частицы карбида кремния, по-

крытые углеродной оболочкой, вероятнее, обладают худшей смачиваемостью в отличие от этих же частиц без углеродной «шубы». Таким образом, данные частицы практически не влияют на размер зерна полимера, а изменение прочности данных образцов лежит в пределах доверительного интервала.

Таблица

Характеристики материалов на основе ПУ и наночастиц SiC

Модификатор	Количество модификатора, масс. %	Предел прочности при разрыве, МПа	Относительное удлинение, %	Размер зерна полимера, мкм
SiC без углеродной оболочки	0	28,1±1,2	625,1±16,3	5,2±0,7
	0,0015	37,4±0,4	695,6±13,2	2,4±0,4
	0,003	36,7±1,3	802,1±24,1	2,7±0,4
	0,005	36,2±0,5	787,3±10,0	4,1±0,9
	0,01	30,8±0,7	669,6±10,0	4,8±0,8
	0,03	30,5±0,5	792,2±15,9	4,9±0,9
	0,05	30,2±1,0	663,0±16,3	–
SiC, покрытый углеродной оболочкой	0	28,1±1,2	625,1±16,3	5,2±0,7
	0,001	25,2±0,1	741,5±25,3	3,4±0,9
	0,005	25,4±0,7	746,4±72,4	4,8±0,4
	0,01	27,5±0,2	811,6±8,4	4,5±0,9
	0,05	24,9±0,8	649,9±47,1	3,5±0,8
	0,1	24,3±0,1	775,0±35,2	3,5±0,9



УДК 621.763:678.742

**В.А. Полубояров^{1,2}, Ли Чен-Мён³, А.Ю. Ларичкин⁴, Г.Е. Селютин⁵,
З.А. Коротаева¹, Л.К. Бердникова¹, А.А. Жданок¹, Ф.К. Горбунов^{1,2}**

¹ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³ Университет города Ульсан, Ульсан, Республика Корея

⁴ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск, Россия

**МЕХАНОХИМИЯ КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ
НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК**

В работе представлены результаты исследований порошковых и конструкционных композитов (пластин) на основе полиэтиленов (СВМПЭ компании Braskem (молекулярная масса $6,4 \cdot 10^6$ г/моль), ПЭВД 15803-020, LLDPE 6101RQ) и неорганических добавок (SiC, TiO₂, CaCO₃, SiO₂) в диапазоне концентраций 0,05–70,00 масс. %.

Свойства всех применяемых материалов даны в таблице.

Таблица

Свойства исходных образцов

№ п/п	Образец	Марка	$S_{уд}$, м ² /г	Плотность, г/см ³
1	СВМПЭ	молекулярная масса $6,4 \cdot 10^6$ г/моль	–	0,936
2	Полиэтилен высокого давления	ПЭВД 15803-020	–	0,916
3	Полиэтилен высокого давления	LLDPE 6101RQ	0,06	0,863
4	SiC	SiC, зеленый 63С, ГОСТ 3647–80	0,3	–
	SiC-1		6,0	–
	SiC-2		10,0	–
6	TiO ₂	TR-92 (рутил)	17,1	–
7	CaCO ₃	ГОСТ 4530–76	3,5	–
8	Росил-175 (SiO ₂)	ТУ 2168-038-00204872–2001	155,0	–

Для получения композитов на основе СВМПЭ порошок полимера обрабатывали совместно с карбидом кремния в центробежно-планетарной мельнице-активаторе (АГО-2) в течение 20 с. Полученный таким образом предварительный композит вводили в оставшуюся часть полимера при интенсивном перемешивании в миксере. Содержание карбида кремния варьировали в диапазоне 1–20 масс. %. Порошковые композиции на основе полиэтиленов высокого давления с содержанием неорганических добавок более 5 масс. % получали совместной обработкой в мельнице-активаторе (АГО-3), а с низким содержанием неорганиче-



ских добавок (≤ 5 масс. %) – различными способами: непосредственным смешением в активаторе; предварительным смешением в миксере, затем обработкой в активаторе; разбавлением более концентрированных составов с использованием миксера и активатора. Далее из порошковых композиций получали пластины методом горячего прессования.

Методом ДТА обнаружено, что ультрадисперсные неорганические частицы способствуют образованию новой приповерхностной фазы полимеров. За счет увеличения количества фаз происходит измельчение структуры полимеров, обнаруженное методом МУРР, и, как следствие, улучшаются прочность и износостойкость композитов: износостойкость СВМПЭ с содержанием 7 масс. % SiC-2 ($S_{уд} = 10 \text{ м}^2/\text{г}$) увеличивается более чем в 150 раз по сравнению с исходным СВМПЭ, а износостойкость ПЭВД 15803-020 (20 масс. % SiC различной дисперсности) – в 2,0–2,5 раза.

Для образцов композитов на основе LLDPE 6101RQ, содержащих добавки TiO_2 , SiO_2 и CaCO_3 в количестве 0,05–5,00 масс. %, прочность при разрыве увеличивается в пределах 7–24 %; модуль упругости (вдоль) увеличивается в 1,2–1,4 раза, удлинение снижается в пределах 13,5–38,0 %. Максимальное увеличение прочности при разрыве наблюдается для образцов с содержанием 20 масс. % SiO_2 (38,5 %) и 50 масс. % TiO_2 (43,6 %), при этом удлинение снижается в 2,8 и 3,9 раза, а модуль упругости увеличивается в 1,9 и 2 раза соответственно. Сравнительные данные по кислородопроницаемости пластин при разных способах смешения исходных компонентов показывают, что образцы, приготовленные смешением полимера с неорганическими добавками в миксере (количество добавок 5 и 20 масс. %), дают снижение кислородопроницаемости в пределах 5,6–11,2 %; а образцы, приготовленные смешением в активаторе АГО-3, – в пределах 16,8–28,7 % по сравнению с исходным образцом.



УДК 625.746.533.8:691.57

И.Р. Волкова^{1,3}, А.И. Лямкин^{1,2}, В.Е. Редькин², П.О. Суходаев²

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ ООО «ЛКМ-Спектр», Красноярск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КРАСКИ ДЛЯ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) широко применяются для нанесения дорожной разметки. Одним из главных требований, предъявляемых к таким ЛКМ, является износостойчивость. Для улучшения эксплуатационных характеристик и повышения срока службы дорожных красок в них вводятся высокодисперсные функциональные добавки (ВДД). Ранее проведенные исследования подтвердили высокую эффективность использования ВДД практически во всех известных материалах: металлах, резинах, пластиках, смазочных материалах, технических жидкостях, суспензиях, пастах и др. Удалось реализовать принцип повышения качества практически всех известных материалов: малые или сверхмалые добавки малых частиц (0,01–0,20 %) приводили к существенному росту качества материалов (в 1,2–2,5 раза).

В нашей работе были проведены исследования влияния различных ВДД на основные эксплуатационные характеристики краски для дорожной разметки на основе акриловых сополимеров. Целью работы стало получение модифицированной краски для дорожной разметки с повышенной износостойкостью при сохранении остальных эксплуатационных характеристик в нормативных диапазонах для подобных красок.

В краску вводились три вида ВДД: электровзрывной оксид алюминия, наноалмазы детонационного синтеза (НА), механоактивированный глинозем (филтростатки). Добавки вводились в краску тремя способами:

- в процессе изготовления краски с предварительным диспергированием в растворителе;
- в виде сухого порошка в готовую краску;
- в готовую краску с предварительным диспергированием в дополнительном объеме растворителя.

Концентрации вводимых добавок составили 0,5; 0,25; 0,1 и 0,05 масс. %.

Проводилась проверка таких эксплуатационных характеристик полученных образцов, как вязкость, степень перетира, скорость высыхания, адгезия к стеклу, содержание нелетучих веществ, яркость. Подготовка образцов и методов испытаний выполнялась по ГОСТ 32829–14. Лабораторные испытания на износостойкость полученных модифицированных образцов проводились на специально разработанной установке абразивного износа.

По совокупности результатов проведенных экспериментов были отобраны 10 образцов краски с различным содержанием в них ВДД для проведения испытаний на износ в условиях, приближенных к реальным. Выяснилось, что наибольший интерес в качестве модификатора краски для дорожной разметки представляет электровзрывной оксид алюминия.



Был доработан способ введения порошка в краску. Повторные испытания показали, что введение в краску оксида алюминия в количестве 0,05 масс. % позволяет увеличить ее износостойкость примерно на 30 %, при этом остальные эксплуатационные характеристики остаются в пределах норм, предъявляемых к краскам для дорожной разметки. Результаты сравнительных испытаний красок представлены в таблице.

Таблица

Результаты сравнительных испытаний

Показатель	Краска без добавок	Краска + Al ₂ O ₃ (взрыв.)
Цвет	Белый	Белый
Коэффициент яркости, %	86,7	86,9
Условная вязкость, с	141	133
Массовая доля нелетучих веществ, %	76,2	76,3
Степень перетира	25	25
Плотность	1,58	1,59
Время высыхания до степени 3, мин	9	10
Адгезия к стеклу	1	1
Износостойкость, %	7,3	5,5

Выражаем благодарность сотрудникам ООО «Формула-К» (Красноярск), директору компании А.А. Грязнову и главному технологу А.С. Ткачуку за помощь в проведении испытаний.



УДК 669.058.7:679.826-022.532:546.56-71

И.Р. Волкова¹, А.И. Лямкин²

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОНАМИ МЕДИ НАНОАЛМАЗОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ МЕДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Медные гальванические покрытия широко используются в металлургии, радиоэлектронике и других областях промышленности. Часто в покрытия вводят различные высокодисперсные добавки, при этом формируются композиционные электрохимические покрытия (КЭП) с улучшенными свойствами. В проведенной нами работе исследовалось влияние модифицирования поверхности детонационных наноалмазов ионами меди на свойства медных композиционных гальванических покрытий.

Покрытия получали из сульфатного электролита меднения, служащего для нанесения медных покрытий на сталь с подслоем меди или никеля, медные сплавы [1]. Покрытия наносились на латунные подложки. В работе использовались наноалмазы (НА), соответствующие ТУ 3974-001-10172699–94. Модифицирование НА ионами меди проводилось по методике, использованной в [2]. НА и модифицированные наноалмазы (МНА) вводились в электролит в концентрации 13 г/л.

Были получены медные гальванические покрытия толщиной 14–16 мкм. Все покрытия отличали высокая адгезия и беспористость.

На поверхности полученных КЭП наблюдалась микродендритная структура и шероховатость. Размеры зерен были больше, чем у покрытий без добавок. Однако КЭП отличал более равномерный рост зерен.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, диаграммы покрытия без добавок и с НА имеют обычный для меди вид (рисунок, *а, б*), но диаграммы покрытий с МНА отличает преимущественный рост кристаллитов меди (74 %) в плоскости (220) (рисунок, *в*).

Микротвердость покрытий с МНА возросла на 18 %, в то же время микротвердость покрытий с НА увеличилась в пределах погрешности по сравнению с покрытиями без добавок.

Износостойкость покрытий определялась по площади пятна контакта пары трения «стальное кольцо – покрытие».

В таблице приведены усредненные результаты расчетов площадей пятна контакта рабочей зоны пар трения.

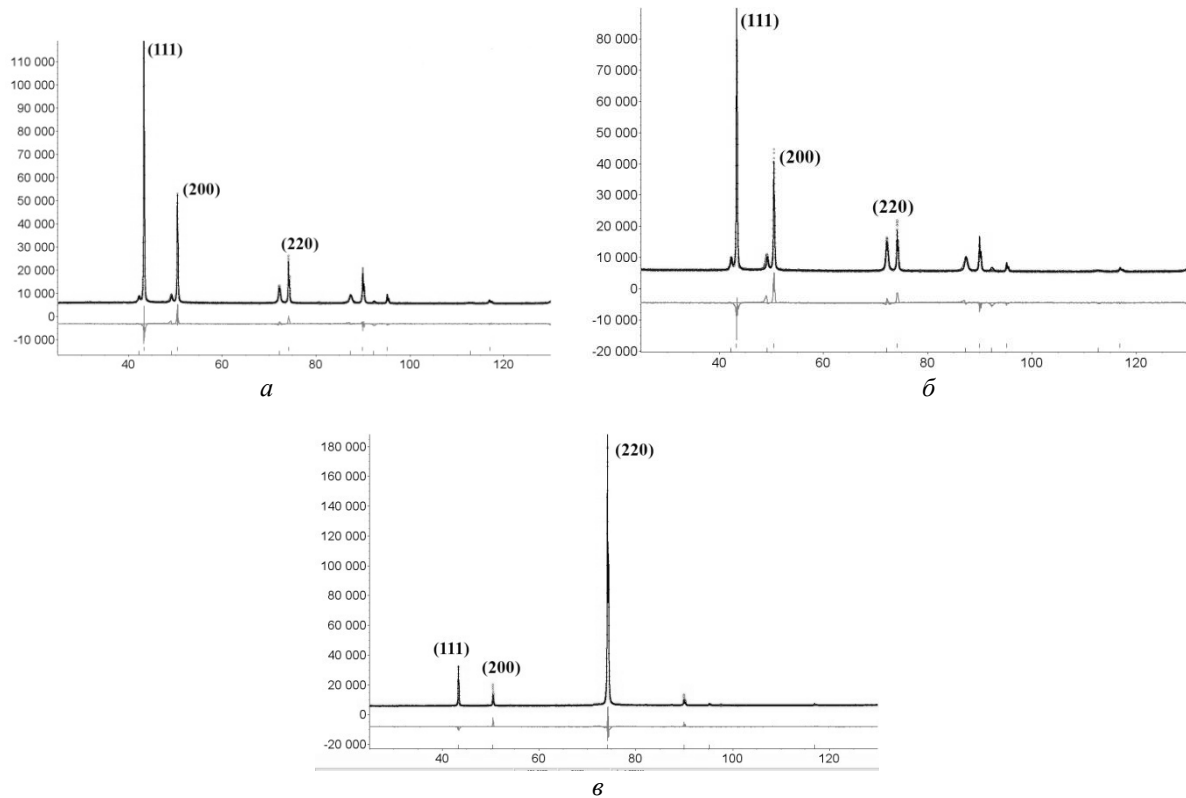


Рис. 1. Рентгенограммы медных гальванических покрытий:
a – без добавок; *b* – с НА; *c* – с МНА

Таблица

Площадь пятна контакта

Вид покрытия	Площадь пятна контакта, см ²
Cu	0,0551±0,0030
Cu+НА	0,0844±0,0087
Cu+МНА	0,0514±0,0032

НА более чем на 50 % ухудшили износостойкость композиционных покрытий по сравнению с покрытиями без добавок, в то время как МНА, наоборот, улучшили. Можно предположить, что увеличение микротвердости и износостойкости медных КЭП с МНА связано с упорядоченностью роста кристаллитов меди в покрытии.

Список литературы

- ГОСТ 9.305–84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий.
- Чиганова Г.А., Мордвинова Л.Е. Неорганические материалы. 2011. Т. 47, № 7. С. 1.



УДК 533.9-11

А.П. Ильин, Л.О. Роот, А.В. Мостовщиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

КОЛЕБАНИЯ СКОРОСТИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ЭНЕРГИИ

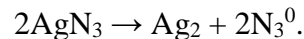
При горении различных ракетных топлив и пиротехнических составов иногда возникают турбулентные и нестационарные процессы [1; 2]. Аналогичные процессы происходят в условиях теплового взрыва и детонации. Экспериментально установлено, что при горении активного нанопорошка (НП) алюминия в воздухе на второй стадии горения (2 200–2 400 °С) наблюдаются колебания температуры ± 200 °С [3; 4]. Основным продуктом сгорания НП алюминия является нитрид алюминия AlN [5; 6].

Исследование механизма горения НП алюминия в воздухе с использованием синхротронного излучения *in situ* показало, что образование кристаллической фазы AlN происходит одновременно по двум механизмам: путем последовательного вытеснения атомов кислорода из γ -Al₂O₃ атомами азота и прямым взаимодействием азота воздуха с алюминием [7; 8]. Сравнение энтальпий образования Al₂O₃ и AlN показывает, что они значительно различаются: –837 и 320 кДж/моль соответственно. В условиях теплового взрыва происходят повышение плотности мощности выделяемой энергии за счет формирования Al₂O₃ и интенсивный рост температуры. Сопровождающее горение излучение снижает реакционную способность кислорода: триплетный кислород переходит в неактивный синглетный [9]. В процесс окисления включается азот с формированием более низкоэнтальпийного AlN. Снижение температуры понижает концентрацию неактивного синглетного кислорода, и вновь происходит процесс формирования Al₂O₃ и следующее повышение тепловой мощности и температуры, т.е. колебательные процессы. Снижение температуры на определенных стадиях горения способствует стабилизации фазы AlN. Отсутствие колебательных процессов при использовании синхротронного излучения (0,101 нм), наиболее вероятно, связано с его действием на активный кислород, переводя в неактивный синглетный кислород. Вместе с тем выход AlN при облучении синхронным излучением достигал 90 %, что также подтверждает участие излучения в дезактивации кислорода [7; 8]. Таким образом, синхротронное излучение в случае горения нанопорошка алюминия является не только методом диагностики, но и фактором воздействия на процесс нитридообразования.

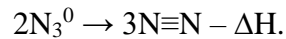
Аналогичные колебательные процессы наблюдаются в условиях детонации монокристаллов азидов серебра AgN₃ вытянутой формы. После инициирования скорость детонации в экспериментах отклонялась от средней на ± 50 % при средней скорости 1 500 м/с [10]. В то же время измельченный и прессованный образец AgN₃ аналогичных размеров детонировал более равномерно: колебания скорости детонации после инициирования составляли ± 5 %. При нарастании плотности мощности процесс протекал по энергетически менее выгодному механизму, например, через несколько стадий, и это снижало скорость детонации.



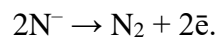
При повышении температуры в предпрогревочной зоне склонность Ag^+ к восстановлению возрастает: при нагревании Ag^+ в оксиде Ag_2O восстанавливается выше 180°C :



Энергетически (термодинамически) более выгодно бимолекулярное взаимодействие молекул:



Причем при образовании N_2 происходит выделение достаточно значительной энергии 840 кДж/моль . Другая последовательность реакций в детонационном процессе менее выгодна с точки зрения термодинамики, и скорость превращений требует большего времени:



Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-03-00160.

Список литературы

1. Киверин А.Д. Исследование нестационарных процессов горения газообразных горючих смесей в каналах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2011. 125 с.
2. Футько С.И. О механизме ограничения максимальных температур в волнах фильтрационного горения газов // ФГВ. 2003. № 2. С. 15–25.
3. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. 154 с.
4. Ильин А.П., Роот Л.О. Высокотемпературное химическое связывание азота воздуха // Изв. Том. ун-та, 2012. Т. 321, № 3. С. 6–11.
5. Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия на воздухе // ФГВ. 1990. Т. 26, № 2. С. 71–72.
6. Ильин А.П., Мостовщиков А.В. Кристаллические продукты сгорания в воздухе нанопорошка алюминия при действии магнитного поля // Изв. ТПУ, 2013. Т. 323, № 2. С. 101–104.
7. Изучение зарождения, роста и формирования AlN при горении в воздухе нанопорошка алюминия с использованием синхронного излучения / А.П. Ильин, Н.А. Тимченко, А.В. Мостовщиков [и др.] // Изв. вузов. Серия: Физика. 2011. № 11/3. С. 307–312.
8. Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Тимченко Н.А. Изучение последовательности фазообразования при горении пресованного нанопорошка алюминия в воздухе с применением синхронного излучения // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 3. С. 72–76.
9. Ильин А.П., Роот Л.О. Новый механизм высокотемпературного химического связывания азота воздуха // Фундаментальные исследования. 2013. № 6 (6). С. 1377–1381.
10. Ципилев В.П. Кинетика взрывного разложения азидов тяжелых металлов при лазерном импульсном инициировании // Изв. ТПУ, 2003. Т. 306, № 5. С. 45–50.

УДК 621.763-034.3:621.791.13

Ф.М. Носков, М.Б. Лесков, Л.И. Квеглис

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
В ЗОНАХ КОНТАКТА МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА
СТАЛЬ – МЕДЬ – ЛАТУНЬ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ**

В настоящее время слоистые композиционные материалы представляют большой интерес так как позволяют получить уникальные механические и физические свойства. Композиты, сочетающие слои на основе меди со сталью позволяют изготавливать детали и узлы электротермического, теплообменного оборудования и т.п. Однако происходящие при сварке взрывом процессы в зоне контакта подобных материалов исследованы недостаточно [1; 2]

Цель работы – исследование процессов, которые происходят при сварке взрывом в слоистых композиционных материалах сталь 20 – медь М1 – латунь Л80. После получения образцов слоистого композиционного материала были проведены их металлографические, рентгенофазовые и микрорентгеноспектральные исследования с целью выявления их структуры и фазового состава.

Выявлено, что при сварке взрывом латуни, меди и стали образуются волнообразные межслойные границы (рисунок). Установлено, что в результате сварки взрывом образуются зоны резкого концентрационного перехода. Анализ полученных результатов показывает, что в локализованных областях зон интенсивной деформации возможен аномально быстрый массоперенос.

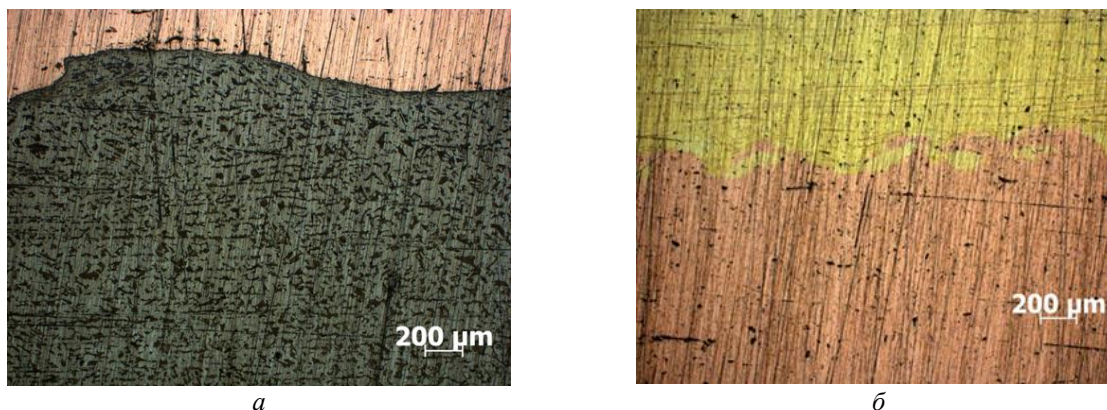


Рисунок. Микроструктура зон контакта композиционного материала:
а – сталь 20 – медь М1; *б* – медь М1 – латунь Л80

При расшифровке картин дифракции рентгеновских лучей были обнаружены равновесные фазы CuZn и Cu в области контакта меди М1 и латуни Л80, наряду с неравновесной фазой Cu₅Zn₈. Также в зоне контакта, образованного сваркой взрывом, меди М1 и стали 20 образовались равновесные фазы Cu, Fe и неравновесная Fe (Fm3m).



Аномальный массоперенос, установленный в работе, может быть объяснён возникновением межузельных бифрукационных структурных состояний, возникающих при пластической деформации [3]. Благодаря массопереносу возможно образование неравновесных фаз, таких как Cu_5Zn_8 .

Выводы

1. Получен образец слоистого композиционного материала сталь 20 – медь М1 – латунь Л80 сваркой взрывом.
2. Показано, что в результате механохимического взаимодействия в процессе сварки взрывом в слоистом композиционном материале в зонах контакта, имеющих волнообразную форму, образуются продукты реакций в виде неравновесных и равновесных фаз.
3. При расшифровке картин дифракции рентгеновских лучей были обнаружены равновесные фазы CuZn и Cu в области контакта меди и латуни, наряду с неравновесной для латуни Л80 фазой Cu_5Zn_8 . Так же в зоне контакта меди и стали, образованного сваркой взрывом, появились равновесные фазы Cu , Fe и неравновесная фаза Fe с ГЦК-решеткой.
4. Происходящие структурные превращения объяснялись с помощью современных теорий о структурообразовании при пластической деформации.

Список литературы

1. Кан К.Т., Сон Ч.С., Хон С.И. Влияние температуры процесса соединения прокаткой на прочность и удельную электропроводимость получаемого композита α -латунь / сплав Cu -1 вес. % Cr / α -латунь // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118, № 2. С. 200–208.
2. Mashimo T., Huang X. S. Metastable BCC and FCC alloy bulk bodies in Fe-Cu system prepared by mechanical alloying and shock compression // J. Alloys Compd. 1999. Vol. 288. P. 299–305.
3. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем // Физ. мезомех. 2015. Т. 18, № 5. С. 100–113.



УДК 533.932-116

С.В. Юркевич, Н.С. Николаев

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОТОКЕ УГЛЕРОДНО-ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ

В работе использована установка для синтеза фуллеренов в ВЧ разряде между графитовыми электродами. С помощью спектральных методов было установлено распределение температуры в потоке ионизированного газа при давлениях 50, 103 и 131 кПа. Из результатов исследования видно, что при изменении давления в камере происходит нелинейное изменение распределения температуры.

В работе [1] было показано, что на синтез углеродных наноструктур оказывает влияние давление в камере реактора, которое, в свою очередь, воздействует на распределение параметров плазмы. Для управления процессом синтеза необходимо экспериментально установить распределения этих параметров в процессе работы установки.

В основе установки [1], как и в других установках этого вида, лежит процесс охлаждения углеродосодержащей плазмы в атмосфере гелия, полученной в результате распыления графитовых стержней, т.е. в основе работы установки лежит модифицированный метод В. Кретчера. Отличительной особенностью установки, по сравнению с большинством установок, используемых на сегодняшний день, является применение дугового разряда переменного тока средней частоты. Параметры синтеза можно менять в широких пределах: ток дуги – от 50 до 400 А, частота тока – от 20 до 160 кГц, давление гелия в камере – от 30 до 400 кПа. Камера, в которой осуществляется синтез, снабжена кварцевыми и солевыми окнами для проведения визуальных и спектральных исследований при совмещении установки со спектрографом.

Измерения проводились методом относительных интенсивностей спектральных линий. По максимальному значению интенсивностей линий 473,7 и 471,5 нм в первой полосе C_2 [2].

Как видно из рисунка, изменение температуры по мере увеличения высоты в потоке углеродно-гелиевой плазмы имеет волнообразный характер при всех давлениях, задаваемых в эксперименте. Это говорит о вертикальной стратификации разряда. Видно, что давление в камере оказывает влияние на распределение температуры в потоке углеродно-гелиевой плазмы. Наблюдается разница в распределениях температуры при атмосферном давлении, выше и ниже него. Таким образом, управление давлением в камере позволяет изменять условия синтеза, что, в свою очередь, может привести к изменению состава и структуры полученных продуктов.

В дальнейшем планируется измерение распределения температуры при влиянии на дугу магнитного поля.

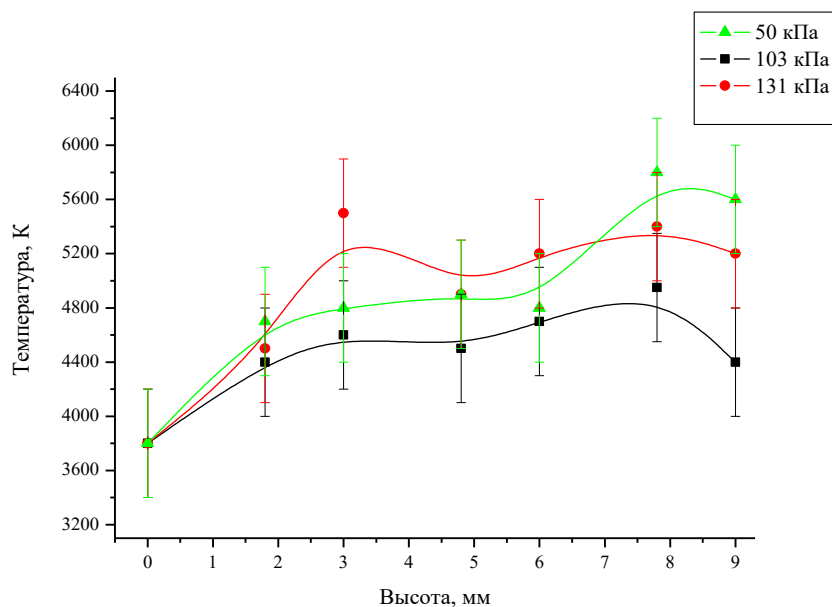


Рисунок. Распределения температуры вдоль высоты потока углеродно-гелиевой плазмы при различных давлениях

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-20011.

Список литературы

1. Synthesis of fullerenes in a high-frequency arc plasma under elevated helium pressure / G.N. Churilov [et al.] // CARBON, 2013.
2. Соболев Н.Н. Оптическая пирометрия плазмы: сб. ст. М.: Изд-во ин. лит., 1960. 438 с.

УДК 661.866.4

**Ж.В. Еремеева, Ю.Ю. Капланский,
С.А. Воротыло, А.А. Непалушев, Д.А. Сидоренко**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКА ГАФНАТА ДИСПРОЗИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕХАНОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

В работе проведено изучение получения нанопорошка гафната диспрозия механохимическим синтезом. В качестве исходных веществ для синтеза гафната диспрозия использовали оксид диспрозия и диоксид гафния квалификации («ч.д.а.»), взятых в стехиометрическом соотношении.

Механохимический синтез (МХС) осуществляли с использованием шаровой планетарной мельницы «Активатор 2S» при скорости вращения планетарного диска 700–1 200 об/мин, скорости вращения барабанов 800–2 400 об/мин, при отношении массы шаров к массе шихты 30–45 : 1 в атмосфере аргона при $P = 3–5$ атм. в течение 5–90 мин.

Полное превращение исходных оксидов в нанокристаллический гафнат диспрозия происходит при обработке смесей в течение 30–60 мин. Полученные результаты свидетельствуют о том, что механоактивация эквимольной смеси оксидов диспрозия и гафния в течение 30–60 мин приводит к образованию однофазного гафната диспрозия с кубической решеткой типа флюорита с параметрами решетки $5,248 \pm 2 \cdot 10^{-3}$ анг.

На основании данных исследования гранулометрического состава порошка и сканирующей электронной микроскопии установлено, что синтезированные механохимической активацией порошки гафната диспрозия представляют собой нанокристаллические частицы неравноосной формы с размером 10–95 нм, объединённые в агломераты.

Исследования методом СЭМ показали, что дисперсный продукт, полученный механо-синтезом, сильно агломерирован. Наибольший размер агломерата составляет примерно 1–2 мкм (рис. 1).

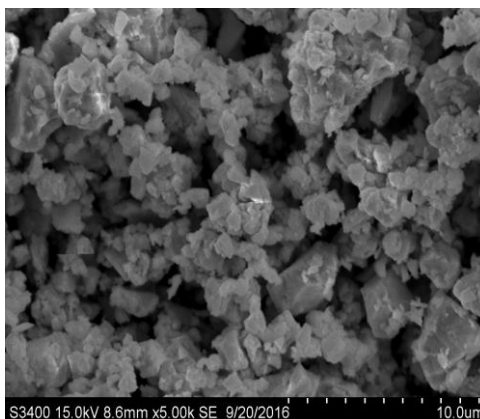


Рис. 1. СЭМ-изображение частиц порошка Dy_2HfO_5 , полученного механосинтезом смеси оксидов диспрозия и гафния

ПЭМ-снимок (рис. 2) подтверждает, что порошок находится в сильно агломерированном состоянии и преимущественно состоит из ультрадисперсных кристаллических частиц. Кроме того, наблюдается некоторое количество частиц сферической формы размером до 60 нм.

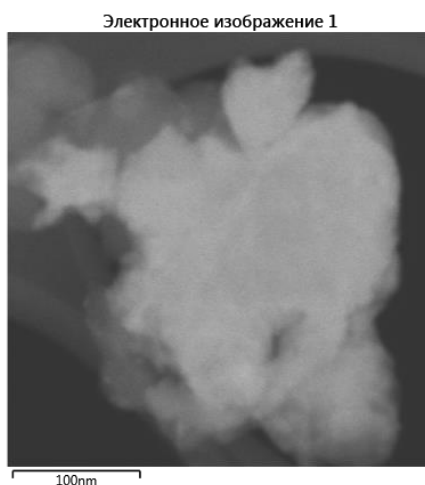


Рис. 2. ПЭМ-изображение агломерата порошка Dy_2HfO_5 , полученного механосинтезом оксидов диспрозия и гафния

В таблице приведены некоторые свойства порошка гафната диспрозия, полученного механосинтезом.

Таблица

Свойства порошков гафната диспрозия, полученного механосинтезом

Материал	Текучесть, с	Насыпная плотность, $г/см^3$	Удельная поверхность, $м^2/г$	Средний размер агломератов, $мкм$	Размер частиц, $нм$
Dy_2HfO_5	Не течет	1,87–1,89	16–24	1–2	10–95

Работа выполнена по гранту РФФИ 19-08-00273.

УДК 661.665.3:54.057

В.Ю. Лопатин, Ж.В. Еремеева, Л.В. Мякишева, А.И. Лизунов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПЛОТНОГО КАРБИДА БОРА
ИЗ СВС-ПОРОШКА В4С И МЕХАНОСИНТЕЗИРОВАННОГО ПОРОШКА В4С**

В качестве объекта исследования был использован порошок карбида бора В4С, полученный механосинтезом смеси сажи марки ПМ-15 и бора аморфного марки А с размером частиц 5–20 мкм и осколочной формой частиц; СВС-методом со средним размером частиц 7–28 мкм и хлопьевидной формой частиц.

На рис. 1 представлены микроструктуры частиц порошка карбида бора, полученных механосинтезом.

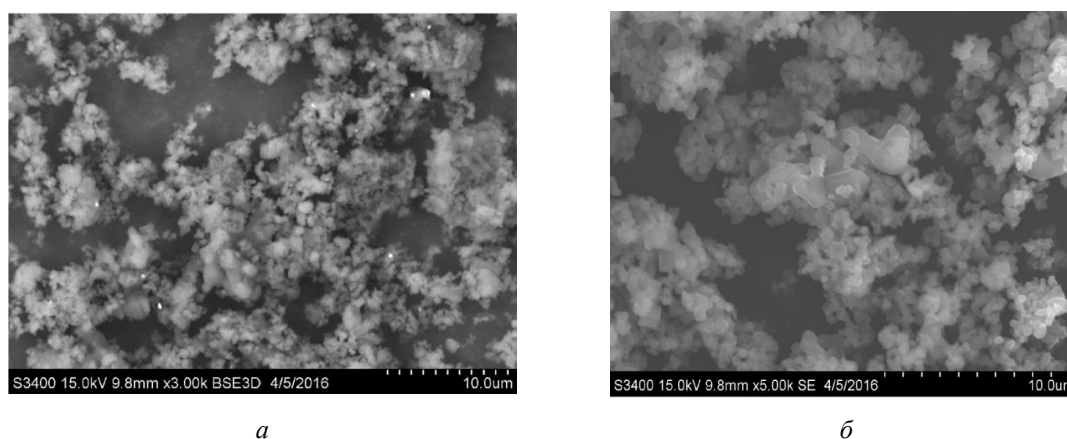


Рис. 1. Микроструктуры частиц порошка карбида бора:
а – полученного механоактивацией сажи и бора аморфного; *б* – полученного СВС-методом

Механохимический синтез (МХС) осуществляли в шаровой планетарной мельнице «Активатор 2S» при скорости вращения планетарного диска 600–900 об/мин, скорости вращения барабанов 1 000–1 800 об/мин, при отношении массы шаров к массе шихты 30–45 : 1 в атмосфере аргона при $P = 3–5$ атм. в течение 5–90 минут.

В таблице приведены некоторые свойства порошка карбида бора, полученного механохимией.

Таблица

Свойства порошков карбида бора, полученного механохимией

Материал	Текучесть, с	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, м ² /г	Средний размер агломератов, мкм	Размер частиц, нм
В4С мехсинтез.	Не течет	1,195	16–24	5–10	100–300
В4С-СВС	Не течет	1,25	18–32	5–25	200–500

Был проведен цикл горячего прессования данных порошков, который продолжался в течение 200 мин, скорость подъема температуры $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, температура горячего прессования изменялась от 2 000 до 2 150 $^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 показана зависимость относительной плотности образцов из карбида бора полученного различными методами от температуры горячего прессования.

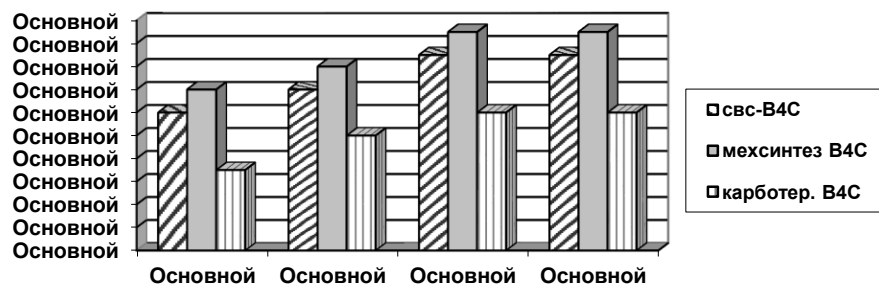
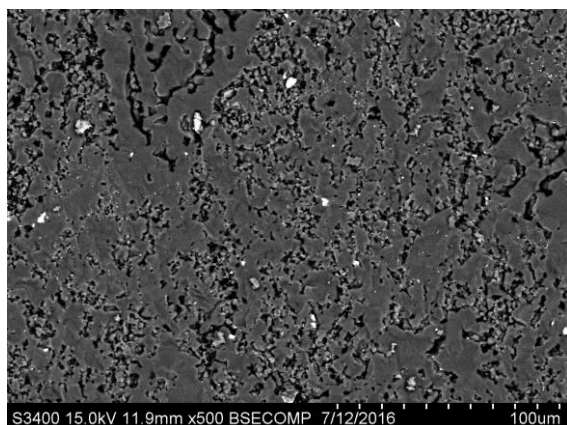
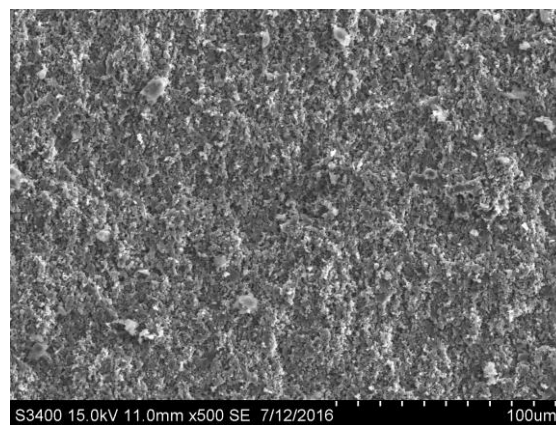


Рис. 2. Зависимость относительной плотности образцов из различных порошков карбида бора от температуры горячего прессования

На рис. 3 приведена структура горячепрессованных образцов из карбида бора, полученного СВС-методом и механосинтезом.



СВС-В4С



Механосинтезированный В4С

Рис. 3. Микроструктуры образцов карбида бора после горячего прессования

В результате проведенных исследований установлена возможность получения нанодисперсного порошка карбида бора механохимической обработкой сажи и бора аморфного, а также после проведения горячего прессования теоретической плотности заготовок из карбида бора из механосинтезированного порошка В4С.

Работа выполнена по гранту РФФИ 17-08-00204.

УДК 576.32/.36:543.429.22:679.826-022.532

**Е.В. Инжеваткин^{1,2}, А.В. Барон^{1,3}, Н.Г. Максимов^{1,4},
М.Б. Волкова^{1,3}, А.П. Пузырь^{1,2}, Н.О. Ронжин¹, В.С. Бондарь¹**¹ Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Международный научный центр исследований экстремальных состояний организма
ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия⁴ Институт химии и химической технологии ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ОРГАНИЗМЕ ЖИВОТНЫХ ВНУТРИВЕННО ВВЕДЕННЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ МЕТОДОМ ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИИ

В последние годы в ряде стран (Китай, США, Япония, Германия, Тайвань, Индия) изучается применимость детонационных наноалмазов как носителей для создания систем направленного транспорта лекарственных веществ к очагам патологии. Однако в этих исследованиях не уделяется достаточного внимания вопросам фармакокинетики и фармакодинамики наноалмазов при их введении в организм. Изучение этих аспектов имеет ключевое значение, так как накопление наноносителя в органах и тканях может приводить к нежелательным эффектам и потенциальным рискам его применения. Следует отметить, что изучение распределения наноалмазов в организме сопряжено с методическими трудностями выявления данных наночастиц в биологических образцах.

Нами в экспериментах *in vitro* и *in vivo* (рис. 1) впервые доказана пригодность метода ЭПР-спектроскопии для выявления и количественной оценки модифицированных наноалмазов (МНА) детонационного синтеза в биоматериалах (кровь и гомогенаты органов животных).

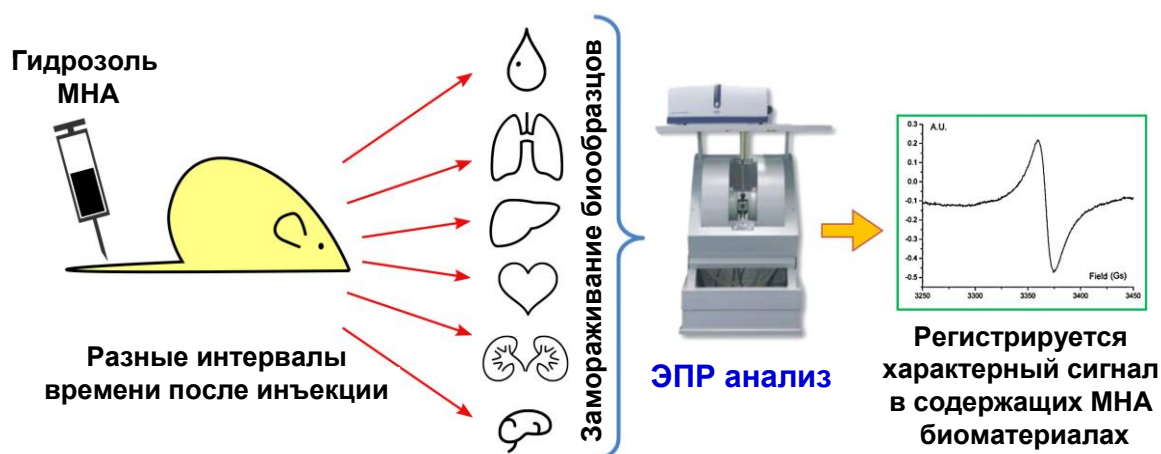


Рис. 1. Применение метода ЭПР-спектроскопии для детекции МНА в биоматериалах

Экспериментально показано, что в содержащих МНА биопробах регистрируется характерный ЭПР сигнал, амплитуда которого линейно зависит от концентрации наночастиц. Установлено, что через 2,5 часа после внутривенного введения мышам МНА аккумулируются главным образом в легких и печени. Значительно меньшее количество МНА обнаруживается в сердце и почках. В крови, селезенке, головном мозге и мышцах бедра мышей наличие МНА методом ЭПР не выявлено. Через 10 суток регистрируется перераспределение МНА в организме животных – их количество значительно уменьшается в легких и увеличивается в печени, наблюдается аккумуляция наночастиц в селезенке. Такая тенденция сохраняется через 1 и 3 месяца: содержание МНА продолжает увеличиваться в печени и селезенке и снижаться в легких (рис. 2). При этом в печени мышей через 3 месяца накапливается до 85–90 % МНА от суммарной дозы введенных наночастиц. Изменения некоторых биохимических показателей крови, выявленные через 2,5 ч после инъекции МНА, полностью нормализуются через 10 суток – это может свидетельствовать, что они вызваны прямым воздействием МНА на систему крови и не являются следствием их аккумуляции в органах.

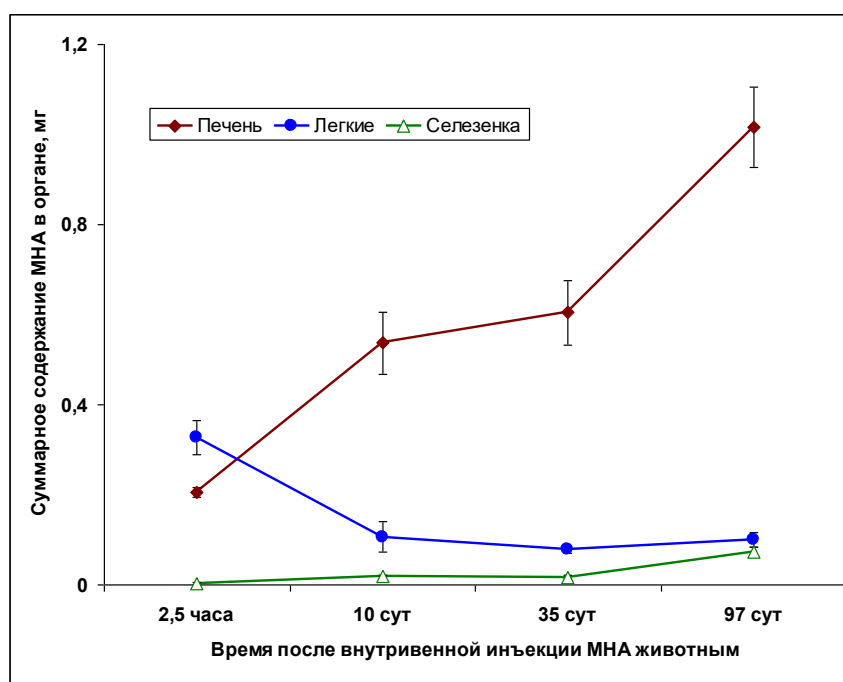


Рис. 2. Динамика распределения внутривенно введенных МНА в органах мышей

В целом полученные данные открывают перспективы дальнейших исследований, направленных на установление механизмов распределения и аккумуляции в органах животных внутривенно введенных МНА и изучение возможностей их элиминации из организма.



УДК 537.622.4:538.975-022.532

С.А. Сацук, С.В. Комогорцев

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ НАНОНИТИ. РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Ферромагнитные нанонити интенсивно изучаются в течение нескольких десятилетий ввиду их приложений как функционального элемента в информационных технологиях и биомедицине [1; 2]. Поперечный размер таких нитей варьируется от единиц до сотен нанометров, при этом длина превышает поперечный размер как минимум на порядок. Петля магнитного гистерезиса лимитирует конкретные приложения функционального магнитного элемента. К настоящему моменту накоплен значительный объем информации о природе процессов перемагничивания нанонитей, включающий точно решаемые микромагнитные проблемы, численное моделирование и экспериментальные исследования. В ряду этих работ недостает исследования влияния поликристаллического строения нитей на их петлю гистерезиса. Между тем исследование структуры нитей, приготовленных методами темплатного синтеза показывает, что они имеют поликристаллическое строение. В настоящий момент точно установлено, что поликристаллическое строение магнитных наноструктур является причиной резкого изменения коэрцитивной силы от размера кристаллита.

Настоящая работа посвящена численному исследованию влияния поликристаллического строения ферромагнитной нанонити на коэрцитивную силу методом микромагнитного моделирования. Расчет производится с помощью специального программного пакета OOMMF, использующего решение уравнения Ландау – Лившица методом конечных разностей [3].

В результате исследований выделено три основных режима поведения магнитного гистерезиса в зависимости от константы магнитной анизотропии кристаллита: режим слабой, средней и сильной магнитной анизотропии. В режиме слабой анизотропии константа анизотропии не влияет на коэрцитивную силу. В режиме средней анизотропии константа анизотропии оказывает влияние на коэрцитивную силу, сопоставимое с влиянием энергии обменного и диполь-дипольного взаимодействия. В режиме сильной анизотропии влияние константы анизотропии на коэрцитивную силу можно рассчитать, используя результат модели Стонера – Вольфарта.

Установлено, что изменения вкладов в полную энергию нитей от обменного, диполь-дипольного взаимодействия и магнитной анизотропии может приводить к качественно разному поведению коэрцитивной силы при изменении размера кристаллита. При увеличении вклада обменной энергии (или размера кристаллита) в случае слабой анизотропии, коэрцитивная сила увеличивается, в случае большой анизотропии – уменьшается. В случае, когда вклад от энергии анизотропии сравним с вкладами других энергий, изменение коэрцитивной силы в зависимости от обменной константы проходит через максимум. Форма петли меняется от прямоугольной до округлой при переходе от ситуации, где превалирует диполь-



дипольное взаимодействие (магнитная анизотропия формы) к ситуации, где решающую роль играет магнитная анизотропия кристаллита.

Показано, что поперечные размеры нанонитей с поликристаллической структурой существенно влияют на зависимость коэрцитивной силы от приведенного размера кристаллита (или от обменной константы). Оказалось, что реальные нанонити проявляют степенную зависимость коэрцитивной силы от размера кристаллита, т.е. могут характеризоваться нецелочисленной размерностью, а также описываться моделью случайной магнитной анизотропии в определенном диапазоне энергетических констант. Нанонити представляют собой не одномерные и не трехмерные объекты, но все же могут характеризоваться нецелочисленной размерностью, величина которой возрастает от 1 до 3 с ростом поперечного размера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-240006 «Наноматериалы с магнитными свойствами, определяемыми топологическими особенностями наноструктуры».

Список литературы

1. Ivanov Y.P., Chubykalo-Fesenko O. Magn. Nano-Microwires. Elsevier. 2015. P. 423–448.
2. Nanotechnology / L.G. Vivas, Y.P. Ivanov, D.G. Trabada [et al.]. 2013. № 24. 105703.
3. Donahue M., Porter D. Object oriented micro-magnetic framework (oommf) // Interagency Report No. NISTIR. 2006. T. 6376. C. 13.



УДК 549.621.99.07:54-128.2

Е.В. Григорьева

Студент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Научный руководитель – доктор химических наук, доцент **С.В. Сайкова**
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ПОДБОР УСЛОВИЙ АНИОНООБМЕННОГО СИНТЕЗА ЖЕЛЕЗО-ЭРБИЕВОГО ГРАНАТА

Уникальные свойства, проявляемые оксидными системами со структурой граната, на протяжении многих лет привлекают внимание исследователей. В частности, железо-эрбиевый гранат (ЖЭГ), представленный формулой $\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, обладает ярко выраженными магнитными и оптическими свойствами, благодаря чему находит широкое применение в качестве изоляторов, циркуляторов, компонентов миниатюрных антенн, магнитных носителей записи [1–3]. Кроме того, ЖЭГ является главным элементом уникальных лазерных излучателей, на основе которых создается медицинское оборудование. Данный тип лазеров помогает реализовать технологию бесконтактного прокола тканей пальца лазерным излучением для забора крови, что практически исключает болевые ощущения, обеспечивает стерильность процедуры, а также снижает ее себестоимость [4].

Синтез ЖЭГ, представляющего собой многокомпонентную систему, является непростой задачей, которая становится еще сложнее при попытке получить материал, характеризующийся химической и фазовой однородностью, что определяет его свойства и области применения. Такой синтез требует тщательного подбора рецептурных и технологических факторов, проведения процесса в строго контролируемых условиях [5].

В данной работе предлагается получение прекурсоров граната $\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ из водных растворов соответствующих солей металлов с использованием в качестве осадителя сильноосновного анионита АВ-17-8 в гидроксидной и карбонатной формах.

Была исследована скорость процесса анионообменного осаждения эрбия, железа (III) и их смеси от времени и типа противоиона анионита путем измерения электропроводности системы. Установили, для осаждения эрбия требуется существенно больше времени, чем для железа, что связано с разницей в произведениях растворимости $\text{Er}(\text{OH})_3$ ($\text{ПР} = 1,3 \cdot 10^{-23}$) и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ($\text{ПР} = 6,3 \cdot 10^{-38}$). При совместном присутствии в растворе эрбия и железа (III) осаждение протекает за 1 ч не более 70 % при использовании анионита в гидроксидной форме. Чтобы увеличить процентное осаждение, в систему вводились новые условия: использовался анионит в карбонатной форме. Измерение электропроводности показало, что катионы металлов практически полностью переходят в осадок, следовательно, выход продукта составляет 99,7 %. Элементный анализ полученных продуктов показал, что в этих условиях анионообменного синтеза при анионитах в разной форме образуется монокристаллическая структура стехиометрического граната состава ($n_{\text{Er}} / n_{\text{Fe}} = 0,6$). По результатам комплексного термического анализа прекурсоров определили, что кристаллизация граната начинается около 700 °С. Оптимальной является температура около 700–900 °С, образцы обжигаются в течение 4 ч. Образцы, обожжен-



ные при температуре <700 °С, по данным РФА, содержат фазы ErFeO_3 , Fe_2O_3 и Er_2O_3 , т.е. данной температуры недостаточно для формирования структуры граната.

Список литературы

1. Гареев К. Г. Получение и анализ свойств наноструктурированных композиционных материалов на основе ферритовых систем // Молодой ученый. 2012. №7. С. 20-23. URL <https://moluch.ru/archive/42/5066/> (дата обращения: 02.04.2019).
2. Белов К. П., Зайцева М А "Новые магнитные материалы — ферриты-гранаты" //УФН. 1958. Т. 66. С.141–144.
3. Ильченко М. Е., Кудинов Е. В. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. К.: Изд-во Киевского университета, 1973. - 175 с.
4. Characterization of oxide phases formed during the synthesis of $\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ / M. Ristic, I. Czako-Nagy, S. Popovic [et al.] // Journal of Molecular Structure. 1997. № 410–411. P. 281–284.
5. Magnetic nanosized rare earth iron garnets $\text{R}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$: Sol- gel fabrication, characterization and rein-spection / O. Opuchovic, A. Kareiva, K. Mazeika, D. Baitrunas // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. № 422. P. 425–433.



УДК 622.766.1:544.361.5

Я.Н. Чеботаева, Н.Г. Внукова, А.И. Дудник

Студент, Сибирский федеральный университет, Красноярск Россия

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Г.Н. Чурилов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

ОБОГАЩЕНИЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ СМЕСИ ЭНДОЭДРАЛЬНЫМИ МЕТАЛЛОФУЛЛЕРЕНАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КИСЛОТЫ ЛЬЮИСА

Эндоэдральные металлофуллерены (ЭМФ) – это вещество, молекулы которого внутри углеродного каркаса содержат один или более атомов металла [1]. Внедрение металла вызывает интерес к исследованию физико-химических свойств получившихся ЭМФ. Эндоэдральные металлофуллерены могут найти свое применение в электронике, оптике, медицине, молекулярной биологии [2].

Для выделения ЭМФ в чистом виде используют высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ), однако содержание ЭМФ в фуллереновой смеси очень низкое, что делает процесс хроматографии достаточно трудоемким. Для увеличения эффективности выделения ЭМФ был предложен метод их обогащения с использованием кислот Льюиса [3]. В данной работе мы провели обогащение фуллереновой смеси эндоэдральными металлофуллеренами с применением кислоты Льюиса $TiCl_4$.

Углеродный конденсат (УК) был получен методом распыления графитовых электродов, имеющих осевое отверстие и заполненных смесью порошка графита и Y_2O_3 в соотношении 1 : 1, в плазме ВЧ-дугового разряда переменного тока килогерцового диапазона [4].

Выделение фуллеренов из УК проводилось экстракцией сероуглеродом в аппарате Сокслета в течение 18 ч [5]. Образец исследовали методом ВЭЖХ (фракция 1). Раствор, полученный после экстракции, обрабатывался кислотой Льюиса $TiCl_4$ и фильтровался. В результате образовалось два раствора: раствор, обогащенный пустыми фуллеренами (C_n , где $n \leq 80$) – фракция 2; раствор, обогащенный ЭМФ и высшими фуллеренами (C_n , где $n > 80$) – фракция 3. Обе фракции также исследовали методом ВЭЖХ. Результаты анализа представлены на рисунке.

Фракция 1 содержит 97,3 % пустых фуллеренов и 2,7 % ЭМФ с высшими фуллеренами; фракция 2 – 98,8% пустых и 1,2% ЭМФ с высшими фуллеренами; фракция 3 – 87,6 % пустых фуллеренов и 12,4 % высших и ЭМФ.

В соответствии с проведенными исследованиями можно сделать вывод, что применение $TiCl_4$ приводит к увеличению относительного содержания ЭМФ и высших фуллеренов до 12,4 % в фуллереновом экстракте, полученным в плазме ВЧ-дугового разряда с внедрением Y_2O_3 .

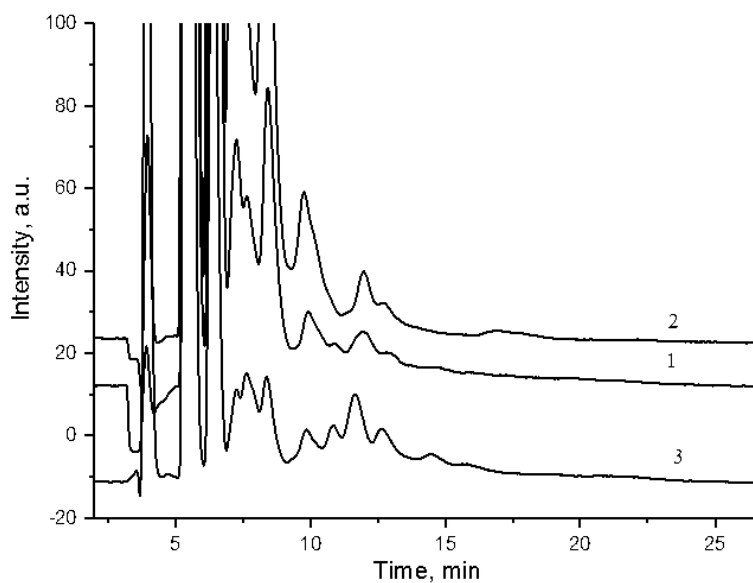


Рисунок. Хроматограмма фуллереновой смеси (ФС): 1 – исходная ФС, выделенная сероуглеродом в аппарате Сокслета; 2 – ФС после обработки кислотой Льюиса, обогащенная пустыми фуллеренами; 3 – ФС после обработки кислотой Льюиса, обогащенная высшими фуллеренами и ЭМФ

Список литературы

1. Сидоров Л.Н. Юровская М.А. Фуллерены: учеб. пособие для вузов. М.: Экзамен, 2005. 688 с.
2. Чурилов Г.Н., Булина Н.В., Федоров А.С. Фуллерены: Синтез и теория образования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 230 с.
3. Wang Z., Nakanishi Y., Noda S. The origin and mechanism of non-HPLC purification of metallofullerenes with TiCl_4 // *The Journal of Physical Chemistry*. 2012. Vol. 116. P. 25563–25567.
4. Churilov G.N. Plasma synthesis of fullerenes // *Instruments and Experimental Techniques*. 2000. Vol. 43, № 1. P. 1–10.
5. Jensen W.B. The origin of the soxhlet extractor // *Journal of Chemical Education*. 2007. Vol. 84, № 12. P. 19–23.



УДК 669.715:621.762-022.532

П.О. Суходаев¹, В.Е. Редькин¹, Т.А. Богданова²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ООО «КиК», Красноярск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОПОРОШКОВ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Металломатричные нанокомпозиты (ММНК) представляют собой металлические сплавы, упрочненные наночастицами (НЧ) тугоплавких соединений. Данный класс материалов интенсивно развивается последнее десятилетие и может быть использован в тех областях, где применение металлов ограничено из-за высоких требований к прочности и термостойкости.

Многочисленные эксперименты и теоретические модели демонстрируют, что наночастицы эффективнее улучшают механические свойства металлов по сравнению с микро-размерными добавками [1].

Часто возникает необходимость изготовления из ММНК изделий с помощью литья. Для этого используются технологии, в которых на промежуточном этапе осуществляется твердофазное смешивание металла матрицы с НЧ, так как прямое введение НЧ в расплав невозможно по причине агрегации частиц и плохого смачивания жидкими металлами большинства тугоплавких материалов в наноразмерном виде.

Среди наноматериалов наиболее перспективными для использования в ММНК являются нанопорошки, получаемые импульсными, ударно-волновыми и детонационными способами. Они имеют невысокую цену и могут производиться в крупных количествах.

В данной работе приведены результаты использования в качестве модификаторов алюминия детонационных ультрадисперсных алмазографитового и алмазного порошков УДП-АГ и УДП-А [2], и порошка оксида алюминия электровзрывного синтеза [3]. Размер первичных частиц используемых порошков находится в диапазоне 5–20 нм. В качестве базового металла использовался алюминий технической чистоты марки А7.

Для изготовления образцов в расплавленный алюминий, нагретый до 800 °С, добавляли таблетку, получаемую из смеси алюминиевых гранул и нанопорошков. Смесь прессовалась в твердую заготовку, которая затем подвергалась нескольким циклам вытяжки и осадки с помощью пресса при давлении 50 т/см², что позволяет замешать частицы внутрь гранул. После выдержки в течение 20 мин расплав заливали в стальную форму и получали образцы квадратного сечения размером 12×12×150 мм. Каждый порошок вводился в двух массовых содержаниях: 0,05 и 0,1 %.

В таблице приведены твердость, удельный износ и размер зерна полученных образцов.



Таблица

Характеристики образцов

Модификатор	Контрольный образец	УДП-А, 0,05 %	УДП-А, 0,1 %	УДП-АГ, 0,05 %	УДП-АГ, 0,1 %	Al ₂ O ₃ , 0,05 %	Al ₂ O ₃ , 0,1 %
Твердость, НВ	24,1	27,9	28,5	25,0	30,1	24,2	30,1
Удельный износ, мг/м·10 ²	37 (100 %)	20 (-46 %)	29 (-22 %)	18 (-51 %)	19 (-49 %)	20 (-46 %)	24 (-35 %)
Размер зерна, мм	0,79	0,24	0,33	0,69	0,16	0,08	0,81

Испытания на износостойкость проводились по схеме шар – сферический пояс со скоростью в зоне контакта 0,5 м/с и нагрузкой 50 Н. Время одного испытания – 15 мин.

Наибольшее снижение износа достигается в образцах, содержащих алмазографитовый порошок УДП-АГ, это связано со смазывающим действием частиц графита при трении.

Полученные материалы обладают повышенной на 10–25 % твердостью по сравнению с базовым металлом, увеличенной до двух раз износостойкостью, уменьшенной до 10 раз размером зерен и могут быть рекомендованы в качестве конструкционных и антифрикционных материалов.

Список литературы

1. Mirza F., Chen D. A unified model for the prediction of yield strength in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites // Materials. 2015. Vol. 8, № 8. P. 5138–5153.
2. Ультрадисперсные алмазные порошки, полученные с использованием энергии взрыва / А.М. Ставер, Н.В. Губарева, А.И., Лямкин Е.А. Петров // Физика горения и взрыва. 1984. Т 20, № 5. С. 100–104.
3. Электровзрывная технология получения наноразмерных порошков: сайт. URL: <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/technologies/tech12.html>.



УДК 669.715:544.016.5

**П.О. Суходаев¹, М.Ю. Чулкова¹, В.И. Турчин¹,
С.В. Юркевич¹, В.Е. Редькин¹, П.П. Турчин^{1,2}**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ Al_2O_3 НА МИКРОСТРУКТУРУ И МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Д16

Применение наночастиц (НЧ) в качестве модифицирующих и упрочняющих добавок в сплавах на основе алюминия и создание алюминиевых нанокомпозитов является перспективным направлением в технике на сегодняшний день.

При изготовлении композитов на металлической основе, модифицированных наночастицами, важное значение занимает контроль изделий, необходимый как для контроля структуры, так и для выявления брака, дефектов, и обеспечения постоянства качества. При этом все больше отдается предпочтение методам неразрушающего контроля, позволяющим быстро и оперативно оценить свойства металлических нанокомпозитов. Среди таких методов широко распространенным являются ультразвуковые исследования металлов.

В данной работе с помощью ультразвукового эхо-импульсного метода исследованы нанокомпозиты на основе алюминия, содержащие частицы оксида алюминия.

Материалы и методы исследования. В качестве материалов для исследований в работе использовался сплав алюминия Д16 (системы алюминий – медь) и нанопорошок Al_2O_3 со средним размером частиц 15 нм, полученный методом электрического взрыва проводников [1].

Образцы получали литьем расплава в металлический кокиль. Для улучшения смачивания и снижения агломерации наночастиц их вводили в расплав, предварительно спрессовав с порошковым сплавом Д16 в виде таблетки. После введения НЧ расплав выдерживали в течение 20 мин, перемешивали крыльчаткой и заливали в форму при температуре 720 °С.

Ультразвуковые исследования проводились на частоте 30 МГц на установке и по методике, описанной в [2].

Результаты. Оптические изображения микроструктуры образцов получены с помощью микроскопа КН-7700.

Из рис. 1 видно, что в образцах с НЧ зернистость образцов уменьшается. Структура зерен становится более равномерной. Значение модуля упругости C_{11} растет с увеличением содержания Al_2O_3 и достигает максимума при содержании 0,2 %. При увеличении содержания Al_2O_3 до 0,3 % величина C_{11} снижается, вероятно, из-за агломерации НЧ Al_2O_3 . Изменение плотности может быть связано с влиянием НЧ Al_2O_3 на выделение меди из твердого раствора, приводящее к различному соотношению фаз сплава в готовом образце, о чем можно судить по оптическим изображениям (рис. 1).

На рис. 2 приведены зависимости плотности и упругой постоянной C_{11} от содержания Al_2O_3 .

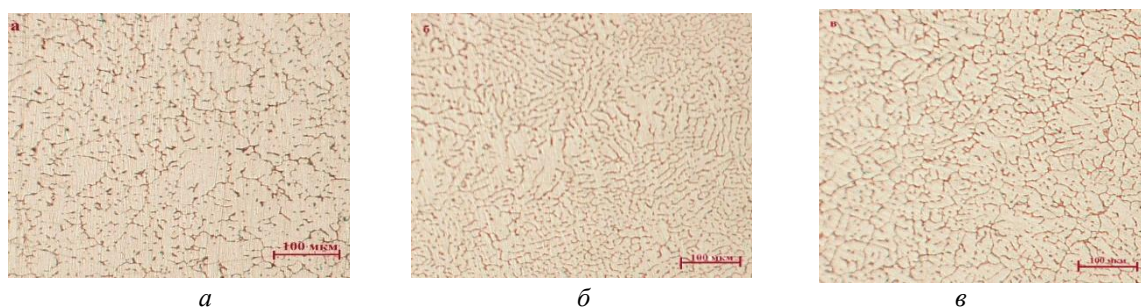


Рис. 1. Микроструктура образцов с различными массовыми содержаниями частиц Al_2O_3 :
a – контрольный; *б* – 0,1 %; *в* – 0,2 % (темные области – фаза $CuAl_2$,
светлые области – раствор меди в алюминии)

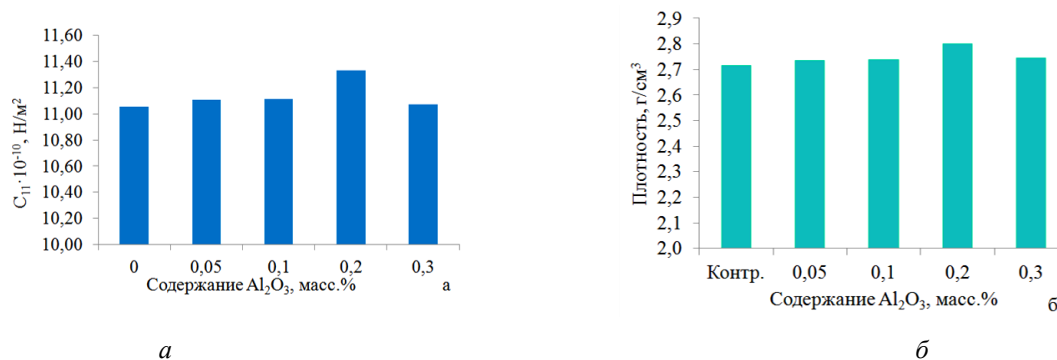


Рис. 2. Упругая постоянная C_{11} (*a*) и плотность образцов (*б*) при различном содержании НЧ

Список литературы

1. Электровзрывная технология получения наноразмерных порошков: сайт. URL: <http://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/technologies/tech12.html>.
2. Импульсные автоматизированные измерения скоростей упругих волн в кристаллах / П.П. Турчин [и др.] // Ползуновский вестн. 2011. № 3/1. С. 143–147.

УДК 621.762: 544.478:537.31

А.Н. Калашникова, Н.С. Николаев, Г.А. Глущенко, В.Г. Исакова

Студент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Г.Н. Чурилов**

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

КОМПОЗИТ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО НОСИТЕЛЯ ПАЛЛАДИЕВОГО КАТАЛИЗАТОРА

В настоящее время особый интерес исследователей вызывают смешанные углеродно-оксидные материалы, которые используют в качестве носителей платиновых металлов в синтезе катализаторов для электрохимических устройств [1].

В данной работе нами использован в качестве носителя палладиевого катализатора покрытый углеродом оксид алюминия, синтезированный по методике, описанной ранее в работе [2]. Отделение покрытых углеродом частиц от частиц без покрытия проводили нагреванием полученного порошка в растворе 0,5 молярной серной кислоты и удаляли растворившуюся часть.

Данные рентгенофлуоресцентного анализа показали, что произошло увеличение содержания углерода в полученном образце по сравнению с исходным (от 12,6 до 22,7 %). Так как дальнейшая обработка кислотой не приводила к потере массы исследуемого образца ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$), то можно считать, что нами получен стабильный композит.

Для нанесения на композит $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ наночастиц палладия использовали метод парофазного разложения до частиц металла ацетилацетонатного комплекса нагреванием его в порошковых смесях с $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ в воздушной среде [3]. Полученный композит ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$), с нанесенными наночастицами палладия исследовали методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) рисунок, *а*, *б*.

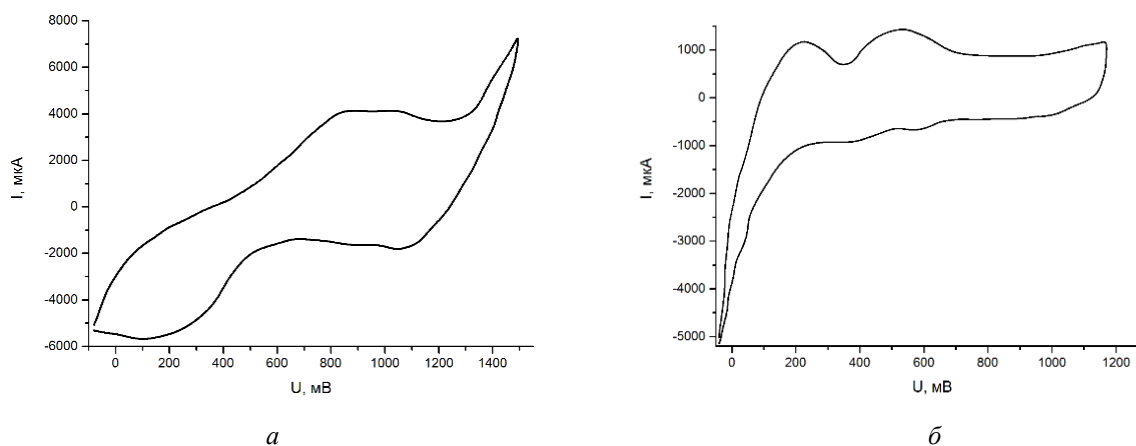


Рисунок. Циклические вольтамперные кривые зависимости силы тока от потенциала в растворах: *а* – 0,5 М H_2SO_4 ; *б* – 0,5 М H_2SO_4 + 0,1 М $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$



В результате исследования методом ЦВА получены циклические вольтамперограммы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C} - \text{Pd}$ в растворах 0,5 М H_2SO_4 и в 0,5 М $\text{H}_2\text{SO}_4 + 0,1$ М $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ при скорости сканирования 500 мВ/с.

По результатам анализа ЦВА определили, что в присутствии спирта происходит рост анодного тока, а на анодной кривой регистрируется два пика, которые свидетельствуют о том, что в кислой среде на электроде $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C} - \text{Pd}$ происходит каталитическое окисление спирта.

Таким образом, выявлено, что полученный стабильный композит $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$ с нанесенными наночастицами металла (Pd) может быть использован в качестве электропроводящего носителя палладиевого катализатора.

Список литературы

1. Wu H.B., Zhang G., Lou D. One-dimensional metal oxide-carbon hybrid nanostructures for electrochemical energy storage // *Nanoscale Horizons*. 2016. № 1. P. 27–40.
2. Дубинина И.А., Лопатин В.А., Глуценко Г.А. Эффективное разделение фуллереновой смеси сорбентом на основе оксида алюминия // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2015. № 8. С. 620–625.
3. Исакова В.Г., Осипова И.В., Дудник А.И. Декорирование порошков углеродных наноматериалов дисперсными частицами платиновых металлов // *Журнал прикладной химии*. 2018. № 7. С. 1040–1048.

УДК 544.725.2:539.217.1-022.532

**О.Е. Безрукова¹, Е.В. Михлина², А.С. Вяткин²,
А.А. Мишин², М.М. Симунин¹, И.И. Рыжков^{1,2}**¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОПОРИСТЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ CVD

Процессы мембранного разделения смесей широко используются в химической, топливно-энергетической, фармацевтической и пищевой отраслях промышленности для разделения смесей и получения чистых веществ, электрохимического преобразование энергии, разработки химических сенсоров, водоочистки. Если поверхность нанопористой мембраны обладает электронной проводимостью, то существует возможность управления селективным транспортом ионов через нее путем приложения заданного электрического потенциала к поверхности.

В настоящее время одним из наиболее доступных и простых в исполнении способов создания мембран с управляемыми транспортными свойствами признано нанесение проводящих пироуглеродных покрытий на пористую структуру методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) из различных углеводородных прекурсоров. В качестве неорганической матрицы для выращивания углеродных нанотрубок методом CVD хорошо подходят мембраны пористого анодного оксида алюминия благодаря их структуре, характеризующейся гексагонально упорядоченными цилиндрическим порах контролируемого размера, а также химической и температурной стабильностью. В данной работе мы получили композиционные мембраны на основе мезопористого анодного оксида алюминия (ПАОА) с проводящими углеродными нанотрубками, выращенными в порах методом CVD без использования катализатора.

Мембраны ПАОА толщиной 60 мкм и диаметром пор 40 нм были получены двухстадийным анодированием алюминиевой фольги высокой чистоты (99,999 %) в растворе ортофосфорной кислоты (0,3 М H_3PO_4) при 40 В в течение 24 ч при температуре 4 °С. Предварительно алюминиевая фольга была отожжена на воздухе в течение при 450 °С в течение 24 ч и затем подвергнута электрохимической полировке в смеси хромового ангидрида и ортофосфорной кислоты при температуре 80 °С.

Синтез нанотрубок в порах мембран проводили в горизонтальном реакторе с системой смешения газов (рис. 1). В качестве прекурсора использовался этанол, в качестве газаносителя – аргон. Мембраны нагревали в токе аргона и выдерживали в течение различного времени в смеси аргон-этанол при температурах 700–800 °С и давлении 50 кПа. В ходе химического осаждения из газовой фазы слой углерода равномерно осаждается на стенках пор мембраны в результате многостадийных химических реакций разложения этанола [1]. На рис. 2 представлены РЭМ изображения мембраны. В порах видны углеродные нанотруб-

ки с толщиной стенок порядка 10 нм. С помощью РЭМ подтверждено, что толщина стенок углеродных нанотрубок прямо пропорциональна времени CVD. Можно сделать вывод, что управление временем и условиями CVD-процесса позволяет контролировать внутренний диаметр нанотрубок и, соответственно, транспортные свойства композиционных мембран.

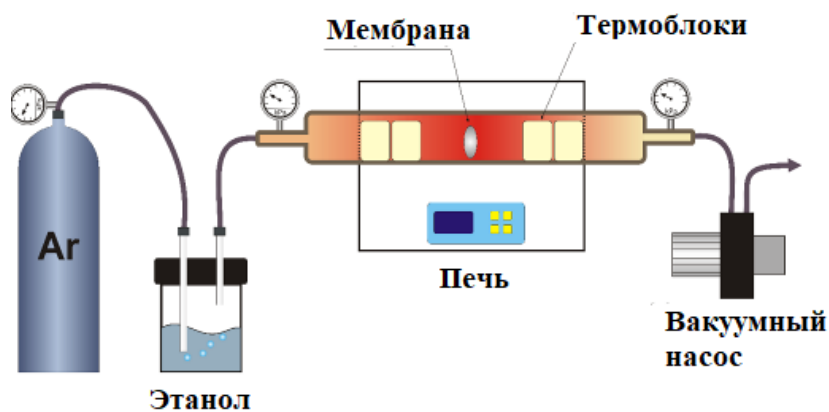
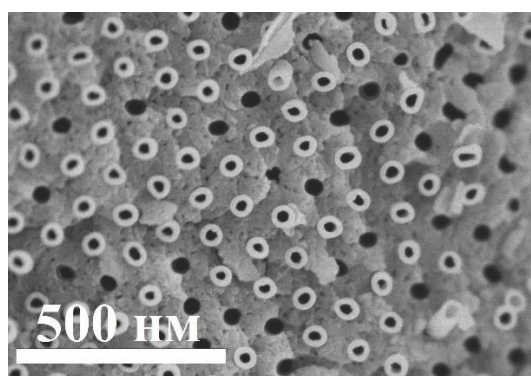
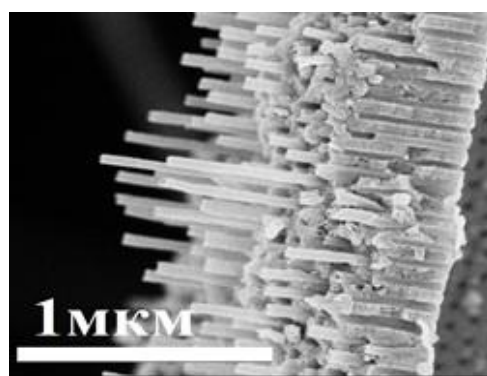


Рис. 1. Схема CVD-установки, использованной для синтеза нанотрубок



a



б

Рис. 2. РЭМ-изображения композиционной мембраны на основе анодного оксида алюминия с углеродными нанотрубками: *a* – поверхность; *б* – поперечный срез

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18–38–20046.

Список литературы

Minakov A.V., Simunin M.M., Ryzhkov I.I. Int. J. Heat Mass Trans., 2019. Accepted, in press.



УДК 669.017.1-022.532

Д.И. Сайкова, Е.Д. Емельянов, С.В. Сайкова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{NiFe}_2\text{O}_4@Au$

Феррит никеля находит широкое применение в радиоэлектронике и вычислительной технике благодаря своим магнитным свойствам. Наночастицы (нч) NiFe_2O_4 считаются перспективными материалами для создания высокоплотных носителей информации, газовых датчиков, а также в различных приборах СВЧ и коммутирующих устройствах [1].

Перспективным направлением использования феррита никеля является также терапия онкологических заболеваний [1]. Благодаря наличию магнитных свойств возможно инкорпорирование магнитных жидкостей в опухолевые ткани, где последующее воздействие высокочастотным магнитным полем приводит к локальному разогреву и уничтожению раковых клеток (так называемая гипертермия). Особого внимания заслуживают гибридные частицы типа ядро-оболочка – наноразмерные частицы, ядро и оболочка которых отличаются по составу, микроморфологии и, как правило, функциональному назначению. Так, в качестве ядра гибридных частиц можно использовать магнитные наночастицы, а оптимальным материалом для образования оболочки является золото, обладающее биосовместимостью и стабильностью. Целью данной работы является синтез наночастиц феррита никеля методом химического соосаждения и получение гибридных частиц $\text{NiFe}_2\text{O}_4@Au$ на их основе.

Образец феррита никеля, полученный в оптимальных условиях, имеет гидродинамический диаметр 222 нм и, по данным рентгенофазового анализа, представляет собой чистую фазу феррита никеля. Размер полученных частиц, рассчитанный по формуле Дебая – Шеррера, составляет 36,2 нм, по результатам просвечивающей электронной микроскопии получены частицы размером около 25 нм. С целью создания гибридных наночастиц $\text{NiFe}_2\text{O}_4@Au$ образцы феррита никеля покрывали наночастицами золота один и три раза. Результаты РФЭС, РФА, ПЭМ свидетельствуют об образовании гибридных частиц с толстой золотой оболочкой на поверхности феррита никеля.

Список литературы

1. Белов К.П., Зайцева М.А. Новые магнитные материалы – феррит-гранаты // Успехи физических наук. 1058. Т. 66, №1. С. 141–144.
2. Трофимова Т.В., Павликов А.Ю., Сайкова С.В. Новый метод синтеза наноразмерных порошков CoFe_2O_4 // Вестн. Перм. ун-та. Серия: Химия. 2017. Т. 7, № 2. С. 137–144.
3. Синтез нанопорошка феррит-граната и изучение магнитооптических свойств композита на его основе/ Г.Л. Пашков, С.В. Сайкова, М.В. Пантелеева [и др.] // Изв. вузов: Химия и химическая технология. 2013. Т.56, вып. 8. С. 77–81.
4. Синтез наночастиц золота, обладающих анизотропией оптических свойств / Т.В. Трофимова, С.В. Сайкова, Д.И. Сайкова, Д.И. Чистяков // Журнал Сиб. федер. ун-та. Химия. 2016. Т. 9, № 4.
5. Mikalauskaite, A. Gold-coated cobalt ferrite nanoparticles via methionine-induced reduction // Center of Physical Sciences and Technology. 2015.

УДК 669.017.1-022.532

И.Г. Важенина, Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МАГНИТНЫХ
НАНОСТРУКТУРНЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ СПИН-ВОЛНОВОГО
РЕЗОНАНСА НА ПРИМЕРЕ ПЛАНАРНЫХ СИСТЕМ СО-Р**

Известно, что в тонких ферромагнитных пленках электромагнитным излучением СВЧ диапазона могут быть возбуждены стоячие спиновые волны [1; 2]. Когда внешнее магнитное поле H приложено ортогонально к плоскости пленки ($H \perp h$), условием резонанса служит соотношение

$$H_n = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M_{eff} - \frac{2A}{M_s} k^2, \quad (1)$$

где ω – фиксированная частота микроволнового поля; A – константа обменного взаимодействия, представляемая выражением $A = 2JS^2/a$; k – волновой вектор ($k = n\pi/L$, где n – номер моды, L – толщина пленки). График зависимости H_r от n^2 можно построить, имея экспериментальную кривую спин-волнового резонанса (СВР) и проводя идентификацию n по некоторым правилам [3; 4].

Теоретически возможности иных видов зависимости резонансных полей при формировании определенного вида магнитного потенциала были предсказаны [5; 6] и экспериментально наблюдались [7–10].

Целью работы является отработка технологической методики формирования структур с заданным распределением магнитного спинового параметра по толщине пленки

Образцы пленок, исследуемые в работе, были синтезированы методом химического осаждения из растворов солей соответствующих металлов. Были получены две серии слоистых пленок Со-Р сплава, отличающиеся друг от друга формируемым профилем изменения концентрации фосфора по толщине покрытия. Образцы первой серии с чередующимися слоями аморфного (90 ат. % Со) и кристаллического (93 ат. % Со) Со-Р сплава представляют собой магнетонный кристалл (толщина слоя сопоставима с длиной возбуждаемой обменной стоячей волны). Вторая серия представлена градиентными покрытиями того же сплава, но концентрация фосфора в этом сплаве была подобрана таким образом, чтобы происходило квазилинейное изменение содержания фосфора от концентрации, обеспечивающей аморфность сплава, до кристаллических составов. Тем самым была создана мультислойная развертка интерфейса «аморфный Со – ГЦК Со». Разный характер изменения средней величины доминирующего магнитного параметра по толщине пленки для двух представляемых случаев приводит к различным модификациям спектров СВР.

Измерения спектров ФМР и СВР пленок проводились на стандартном спектрометре ЭПА-2М с частотой накачки 9,2 ГГц, температура измерения комнатная.



Экспериментальные спектры СВР для выбранных планарных систем свидетельствуют о формировании модифицированного вида спектра обменных стоячих спиновых волн, выявляющих образование первой и второй зоны Бриллюэна магнетонного кристалла [11], а также первой стоп-зоны, обусловленной береговским рассеянием. Второй вид модификации отражает разницу вида профиля изменения от аморфного к кристаллическому состоянию, заданного технологическими параметрами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-42-243005.

Список литературы

1. Kittel C. Phys. Rev. 1958. Vol. 110 (6). P.1295.
2. Seavey M.H. Phys. Rev. Lett. 1958. Vol. 1 (5). P. 168.
3. Саланский Н.М., Ерухимов М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. М.: Наука, 1975.
4. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
5. Schlomann E. J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36 (3). P. 1193.
6. Portis A.M. App. Phys. Lett. 1968/ Vol. 2 (4). P. 69.
7. Hoekstra B., Stapele R.P. van, Robertson J.M. Journal of Applied Physics. 1977. Vol. 48 (1). P. 382.
8. Phys. Rev. B. / C. Bihler, W. Schoch, W. Limmer [et al.]. 2009. Vol.79. P. 045–205.
9. Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism / Y. Sasaki, X. Liu, T. Wojtowicz, J.K. Furdyna. 2003. Vol. 16 (1). P. 143.
10. Liu X., Zhou Y.Y., Furdyna J.K. Phys Rev B. 2007. Vol. 75. P. 195–220.
11. ФТТ / Р.С. Исхаков, С.В. Столяр, Л.А. Чеканова, М.В. Чижик. 2012. Т. 54 (4). С. 704.



УДК 621.762:544.344.015.4

А.А. Антипенко, А.В. Смирнова, А.С. Гареева, И.Н. Макаров, Л.И. Квеглис

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ В ПОРОШКОВОЙ КЕРАМИКЕ $Al_2O_3 + C$, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ SPS

Введение. Искровое плазменное спекание (ИПС) является перспективным методом получением разнообразных материалов, которые все более широко распространены в мире (spark plasma sintering, SPS) [1]. Особенности этого метода консолидация порошковых материалов состоят в том, что нагрев вещества происходит путем пропускания импульсов электрического тока; это позволяет существенно снизить температуру и сократить время спекания по сравнению с обычным спеканием и горячим прессованием.

Цель работы. Исследовать структурообразование в процессе твердофазных реакций в порошковой керамике $Al_2O_3 + C$ методами рентгеноструктурного анализа.

Образцы и методы их исследования. Образец $Al_2O_3 + C$ был получен методом SPS (Spark Plasma Sintering) – методом спекания в плазме искрового разряда. Для этого в ходе опыта производилось спекание в углеродной матрице при $T = 1\ 200\ ^\circ C$ и $T = 1\ 400\ ^\circ C$ и давлении $P = 40$ МПа при прохождении импульсного тока $I = 100$ А.

Обнаружено, что при температуре спекания $1\ 200\ ^\circ C$ получается образец белого цвета с диэлектрическими свойствами и высокой прочностью. При температуре спекания $1\ 400\ ^\circ C$ цвет образца меняется до черного. При этом диэлектрические свойства ухудшаются, а прочность возрастает. Рентгеноструктурный анализ проводили в установке Bruker на медном излучении.

Расшифровку картин дифракции проводили с использованием базы данных кристаллических структур: ICDD PDF 4 + 2012, Pearson's Crystal Data 2013/14.

Результаты и их обсуждение. Карбид алюминия Al_4C_3 используют в качестве абразива в режущих инструментах, поскольку он имеет приблизительно такую же твердость как топаз. Получение этого соединения имеет большое значение для практики.

Анализ дифрактограмм синтезированных образцов показал, что в полученных композициях присутствуют рефлексы карбида алюминия. Расчет параметров кристаллической решетки карбида алюминия показал качественное согласие с известными данными для Al_4C_3 : $a = 0,3338$, $c = 2,4996$, – которые для карбида алюминия составили $a = 0,33618$ нм, $c = 2,3689$ нм. Установлено, что карбид алюминия в материалах образуется вне зависимости от времени изотермической выдержки под давлением и температуры синтеза, однако его объемное содержание изменяется, параллельно меняется параметр решетки [2].

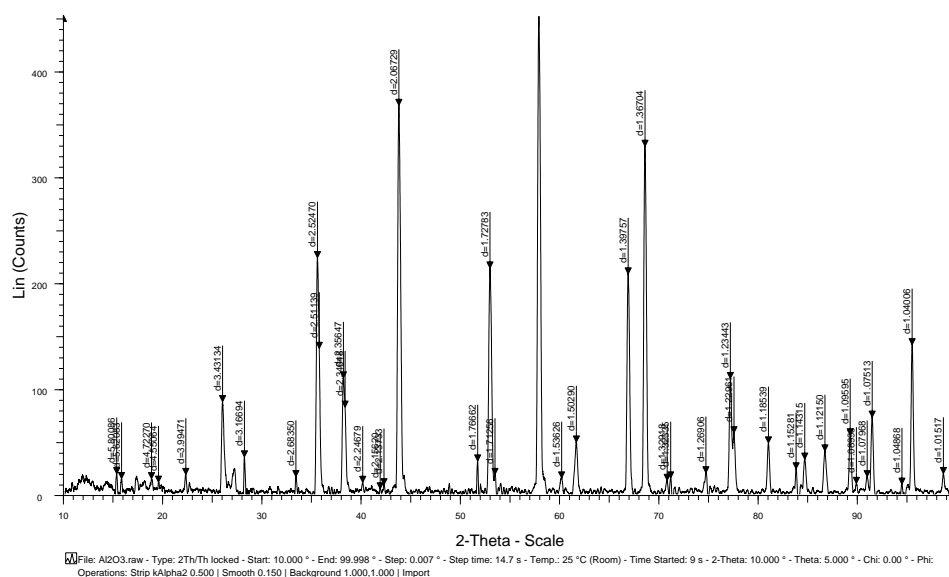


Рисунок. Картина дифракции рентгеновских лучей, полученная от спечённого образца $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{C}$

Расшифровка рентгенограммы порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{C}$

Таблица

Экспериментальные результаты			Al_2O_3	Al_4C_3 hR21 $a = 3,338 \text{ \AA}$ $c = 24,996 \text{ \AA}$
№	$d(\text{Å})$	$I(\text{отн.})$	$d(\text{Å})$ -I-hkl	$d(\text{Å})$ -I-hkl
1	3,4797	45	3,43134 – 19,4 – 116	
2	2,5508	100	2,5247 – 49,5 – 024	
3	2,0853	66	2,06729 – 81,4 – 113	
4	1,7401	34	1,76662 – 7 – 104	
5	1,6016	89	1,59162 – 100 – 012	

Вывод. Проведено исследование процесса фазообразования при твердофазной реакции в спеченном порошке $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{C}$. В процессе твердофазной реакции формируется интерметаллическое соединение Al_4C_3 с различным объемным содержанием и с различными параметрами решетки.

Авторы благодарят В.И. Мали (Институт гидродинамики СОРАН, г. Новосибирск) за любезно предоставленные образцы, А.К. Абкарьяна (СФУ) – за помощь в проведении эксперимента.

Список литературы

1. Получение титановых материалов с градиентной пористостью методом электроискрового плазменного спекания / А.С. Рогачев, Ю.Р. Колобов, С.Г. Вадченко [и др.] // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12-5. С. 947–951.

2. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C17/V1/034.pdf>.

УДК 544.725.2

А.С. Вяткин¹, Е.В. Михлина¹, М.М. Симунин², И.И. Рыжков^{1,2}¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ТРАНСПОРТ ИОНОВ В ПРОВОДЯЩИХ НАНОПОРИСТЫХ МЕМБРАНАХ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ

Мембрана представляет собой барьер, разделяющий две фазы и обеспечивающий селективный перенос компонентов этих фаз под действием движущей силы (градиента концентрации, электрического потенциала или давления). Если поверхность пор мембраны является проводящей, а размер пор соотносится с длиной Дебая (порядка нескольких нанометров), то существует возможность управления селективным транспортом ионов путем приложения заданного потенциала к поверхности мембраны.

В работе [1] предложена методика синтеза нанопористых мембран из нановолокон оксида алюминия диаметром 10–15 нм (Nafen™). Электрическая проводимость поверхности пор достигается путем нанесения углеродного слоя (2–3 нм) посредством химического осаждения из газовой фазы (CVD) при 900 С. В качестве источника углерода используются пары спирта в смеси с инертным газом (аргоном).

Показателем селективности мембраны является мембранный потенциал, представляющий собой разность потенциалов между двумя резервуарами с различными концентрациями раствора соли, разделенными исследуемой мембраной. Положительные (отрицательные) значения мембранного потенциала свидетельствуют о селективности к катиону (аниону). Разность потенциалов возникает за счет скачков потенциала на границах мембрана/раствор, вызванных повышением концентрации противоионов внутри поры. Эксперименты по измерению мембранного потенциала проводятся с помощью ячейки, в которую зажата мембрана, и двух потенциостатов, один из которых (А) подаёт на поверхность мембраны заданный потенциал, а другой (Б) непосредственно измеряет мембранный потенциал (рисунок, а).

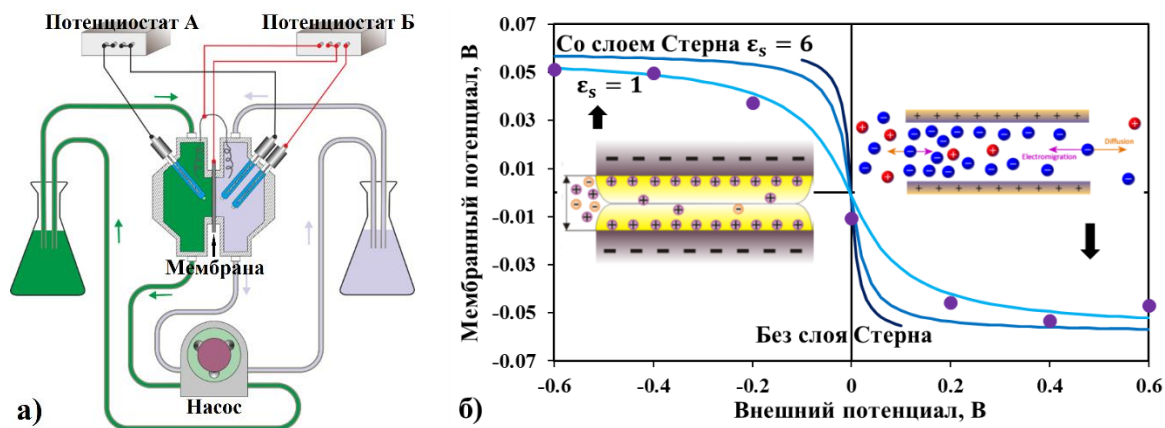


Рисунок. Схема установки для исследования транспортных свойств мембран (а); экспериментальные данные и расчетные кривые зависимости мембранного потенциала от внешнего потенциала (б)



Через ячейку прокачиваются растворы с помощью насоса по замкнутому циклу для обеспечения постоянной концентрации соли. На рис. 16 представлены расчётные кривые, которые были получены с помощью математической модели, основанных на двумерных уравнениях Навье – Стокса, Нернста – Планка и Пуассона [2]. Они показывают зависимость мембранного потенциала от прикладываемого к стенке нанопоры потенциала для следующих случаев: без слоя Стерна и со слоем Стерна с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_s = 6$. Концентрации ионов слева и справа относительно мембраны равны 10 мМ и 1 мМ соответственно. В расчетах радиус поры 10 нм, длина поры 400 мкм. На графике также представлены экспериментальные точки. На их основе была проведена подгонка по радиусу для модели со слоем Стерна с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_s = 1$. В результате подгонки был определен радиус нанопоры 12.9 нм и построена теоретическая кривая. Из полученных данных можно сделать вывод, что исследуемые мембраны являются селективными, причем селективность меняется с аниона на катион при изменении прикладываемого потенциала от положительных значений к отрицательным (рис. 16). Результаты расчетов с учетом слоя Стерна при $\varepsilon_s = 1$ достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-38-20046.

Список литературы

1. Adv. Eng. Mater / V.S. Solodovnichenko, D.V. Lebedev, V.V. Bykanova [et al.]. 2017. 19. 1700244.
2. Journal of Membrane Science / I.I. Ryzhkov, D.V. Lebedev, V.S. Solodovnichenko [et al.]. 2018. V. 549. P. 616–630.

УДК 546.26-022.532:54.057

М.М. Симунин¹, М.О. Мишнёв¹, А.В. Минаков¹, И.И. Рыжков^{1,2}¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПИРОЛИЗА ЭТАНОЛА ПРИ СИНТЕЗЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Современные углеродные наноструктуры (нанотрубки, графеновые слои) имеют большой потенциал в нанотехнологиях и композиционных материалах. Они могут расти на различных подложках в зависимости от их формы и физико-химических свойств. Как правило, материалы таких поверхностей являются наиболее распространенными металлами побочных подгрупп [1], в которых углерод растворяется после химического осаждения из газовой фазы. Затем в результате пересыщения раствора углерода в металле углерод выпадает на границе раздела металла и внешней среды в виде графитовых островков, которые объединяются в графен или нанотрубки. Кроме того, упорядоченные углеродные структуры могут быть получены не только путем растворения углерода в металлах, но также с помощью специальных поверхностей, где может происходить поверхностная диффузия углерода. Оксид алюминия является примером такого материала [2]. В процессе химического осаждения из газовой фазы важно понимать, по какой схеме будет протекать реакция пиролиза источника углерода. Это понимание приведет нас к возможности проектирования производственных процессов, прогнозирования выхода основного продукта и важности паразитарных и побочных процессов.

В работе исследуется процесс пиролиза этанола в среде аргона. В среде моделирования Ansys Fluent на основе механизма Маринова [3] была разработана двумерная модель пиролиза этанола в цилиндрической печи, включающая 57 компонентов, которые принимают участие в 383 реакциях, сопровождающих процесс пиролиза в интервале температур от 500 до 1 500 °С [4]. Было проанализировано поведение основных 13 компонентов, полученных в результате пиролиза этанола (рисунок). Обнаружено, что при низких температурах количество альдегидов возрастает, но после 800 °С их концентрация резко падает, и при высоких температурах они больше не наблюдаются в качестве продуктов пиролиза. При низких температурах окись углерода является наиболее представительным источником углерода, однако углеродные наноструктуры при температуре выше 650 °С образуются из углеводородов. Ключевую роль в этом процессе играет образование этилена [5] при пиролизе этанола, который сам активно участвует в образовании углеродных структур на поверхности. При температуре выше 900 °С выход метана начинает активно расти, превращаясь в источник углерода. Кроме того, обнаружено увеличение выхода водорода при увеличении температуры. При температурах выше 1 000 °С он играет роль среды, которая окисляет метан до фракции нестабильных углеродных фракций в продукте пиролиза.

Полученные данные позволяют оценить закономерности осаждения углерода [6] при создании композитных наноматериалов, определить причины и закономерности удаления низкоупорядоченных углеродных фаз, а также в целом моделировать процесс массопереноса во время пиролиза этанола.

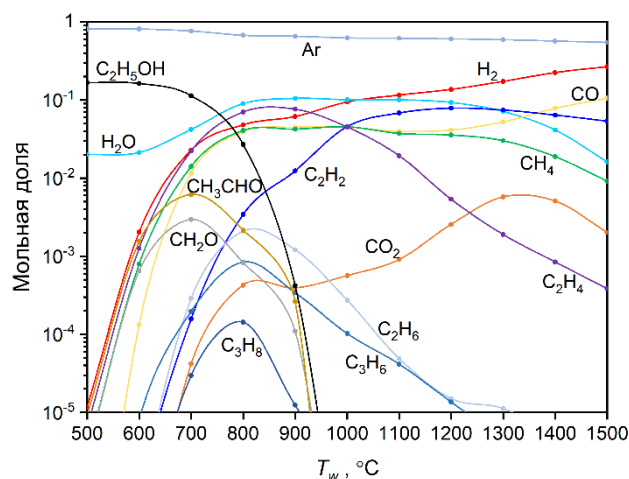


Рисунок. Зависимость мольных долей компонент пиролиза этанола в центре реактора (на подложке) от температуры. Расход этанола – 0,5 мл/мин, аргона – 2 000 мл/мин, давление – 50 кПа

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18–29–19078.

Список литературы

1. J. of Ind. & Eng. Chem. / N.M. Mubarak, E.C. Abdullah [et al.]. 2014. Vol. 20. P. 1186–1197.
2. J Mater Sci. / J. Pang, A. Bachmatiuk, I. Ibrahim [et al.]. 2016. Vol. 51. P. 640–667.
3. Int. J. Chem. Kinetics / N.M. Marinov. 1999. Vol. 31. P. 183–220.
4. Minakov A.V., Simunin M.M., Ryzhkov I.I. // Int. J. Heat Mass Trans., 2019. Accepted, in press.
5. Carbon I.V. Anoshkin, A.G. Nasibulin [et al.]. 2014. Vol. 78. P. 130–136.
6. // Thermochim. Acta / V.S. Solodovnichenko, M.M. Simunin [et al.]. 2019. Vol. 675. P. 164–171.



УДК 539.216.2:544.344.015.4

В.А. Зверев, С.М. Жарков, Л.И. Квеглис

Сибирский федеральный университет, Красноярск

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЕ AL–PT

Актуальность. Интерметаллические соединения Al–Pt применяются в микроэлектронных устройствах [1; 2], обладают эффектом памяти формы [3], могут использоваться в качестве огнеупорных сплавов [4; 5] и в конструкциях солнечных элементов [6].

Надежность микроэлектронных устройств определяется стабильностью физико-химических свойств тонкопленочных систем, входящих в состав электронных компонентов. В связи с этим актуально исследование процессов твердофазных реакций, протекающих на границе раздела нанослоев различного состава.

Цель работы – исследовать фазообразование в процессе твердофазных реакций в тонких пленках на основе Al/Pt методами *in situ* просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов, установить температуры начала твердофазных реакций и последовательность образования фаз в процессе термического нагрева образцов.

Образцы и методы их исследования. Тонкие двухслойные пленки Al/Pt, исследованные в настоящей работе, получены методом электронно-лучевого испарения на высоковакуумной установке MED–020 (Val-Tec). В качестве подложки использовали свежесколотый монокристалл NaCl, а также покровное стекло. Для проведения электронно-микроскопических исследований, пленки отделяли от подложки в дистиллированной воде и высаживали на поддерживающие электронно-микроскопические сеточки, изготовленные из молибдена. Микроструктура и элементный состав тонких пленок исследованы с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM–2100 (при ускоряющем напряжении 200 kV). Фазовый состав исследованных образцов определяли на основе анализа картин дифракции электронов.

Результаты и их обсуждение. Количественный анализ содержания фаз, формирующихся в процессе твердофазной реакции, проведен в температурном диапазоне от 310 до 500 °С. На (рис. 1) представлено изменение фазового состава в процессе твердофазной реакции в пленках Al/Pt, содержание индивидуальных фаз приведено в весовых процентах. Необходимо отметить, что количественный анализ становится возможным только после того, как дифракционные рефлексы формирующихся фаз достигнут достаточной интенсивности.

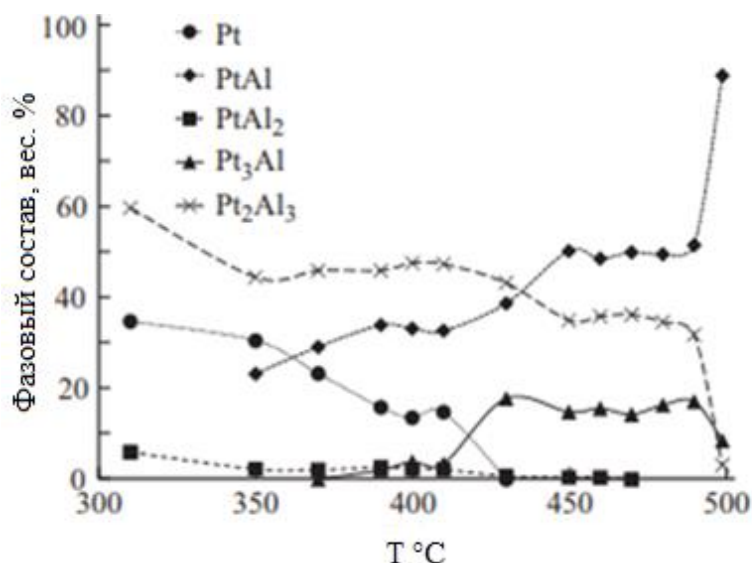


Рисунок. Изменение фазового состава при твердофазной реакции в пленках Al/Pt (вес. %)

Выводы

1. Тонкопленочная система Al/Pt в исходном состоянии содержит ГЦК фазы: Al (параметр решетки $a = 4,05 \text{ \AA}$) и Pt (параметр решетки $a = 3,91 \text{ \AA}$). Размер кристаллитов платины составлял 4–6 нм, алюминия – 5–20 нм.

2. Начало твердофазной реакции между нанослоями алюминия и платины зарегистрировали при температуре 270 °С.

3. В процессе твердофазной реакции интерметаллические соединения формируются в следующей последовательности: $\text{Pt} + \text{Al} \Rightarrow \text{PtAl}_2$ (аморф.) $\Rightarrow \text{PtAl}_2$ (кристалл.) $\Rightarrow \text{Pt}_2\text{Al}_3$ (кристалл.) $\Rightarrow \text{PtAl}$ (кристалл.) $\Rightarrow \text{Pt}_3\text{Al}$ (кристалл.)

Список литературы

1. Adams. D.P. Thin solid films. 2015. Т. 576. С. 98.
2. Journal of Applied Physics / В.К. Crone, I.H. Campbell, P.S. Davids [et al.]. 1999. Vol. 86. P. 5767.
3. Алтунин Р.Р., Моисеенко Е.Т., Жарков С.М. Физика твердого тела. 2018. Т. 60, вып. 7. С. 1402.
4. Met. Mater. Trans. A. / R. Volkl, Y. Yamabe-Mitarai, C. Huang, H. Harada. 2005. Vol. 36. P. 2881.
5. Walston W.S. Proc. X Int. Symp. Superalloys-2004. 2004. Vol. 579.
6. Noh Y., Song O. Korean J. Met. Mater. 2014. Vol. 52. P. 61.

УДК 544.273.4.05

П.П. Турчин^{1,2}, А.И. Зайцев^{1,2}, А.В. Черепяхин^{1,2}, А.Г. Нечепурышина¹¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КВАЗИКРИСТАЛЛОВ СОСТАВА $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$

Квазикристаллы характеризуются ориентационным дальним порядком и кристаллографически запрещенной симметрией. Интересны возможные применения их свойств, таких как высокое удельное электросопротивления [1], относительно высокая твердость и низкий коэффициент трения [2], электронные [3] и магнитные [4] свойства. В данной работе применяли три метода для получения объемных моноквазикристаллов $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$.

На первом этапе для получения данного квазикристалла использовали твердофазный синтез. В связи с тем, что алюминий имеет свойство окисляться на поверхности, для экспериментов брали исходную смесь с избытком алюминия на 1, 2, 3, 4, 5, 10 и 15 %. В ходе рентгеноструктурных исследований было выявлено, что при избытке алюминия в 5 % в образце присутствует только икосаэдрическая квазикристаллическая фаза (рис. 1). Этот результат подтвердился при повторных исследованиях.

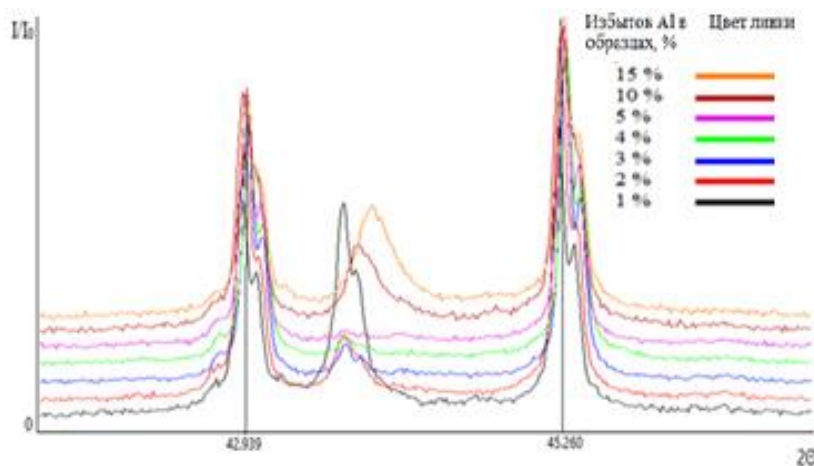


Рис. 1. Рентгенограмма образцов с избытком алюминия 1, 2, 3, 4, 5, 10 и 15 %

Использование квазикристаллов полученных твердофазным синтезом в качестве затравок для роста из раствора-расплава оказалось невозможным, так как расплав плохо смачивает поверхность предварительно полученного поликвазикристалла. В ходе экспериментов было установлено, что в качестве затравок могут быть применены медные стержни.

В процессе синтеза из раствора-расплава при варьировании температур были получены моноквазикристаллы размеров: ~50 мкм при $T = 675$ °C, ~100 мкм при $T = 740$ °C, ~600 мкм при $T = 800$ °C (рис. 2).

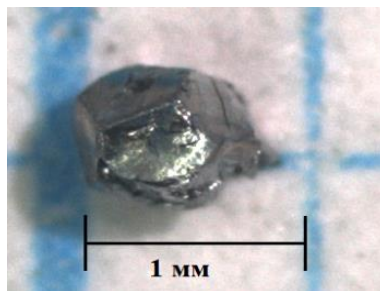


Рис. 2. Образец моноквазикристалла, синтезированного из раствора-расплава при 800 °С

Метод Бриджмена позволил получить образцы моноквазикристаллов достаточно больших размеров 1–3,5 мм.

Результаты измерения микротвердости полученных моноквазикристаллов (рис. 3) демонстрируют небольшое отклонение от известных значений [5].

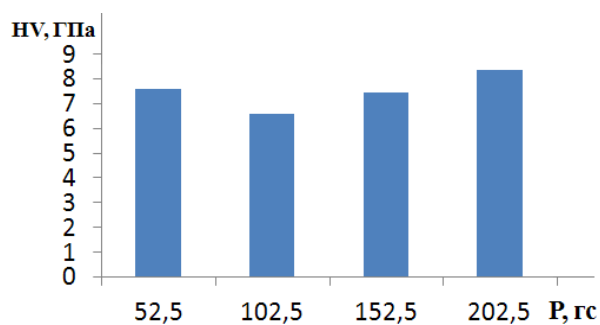


Рис. 3. Гистограмма изменения микротвердости от нагрузки

Список литературы

1. Dubost B., Lang J.-M., Tanaka M., Sainfort P., Audier M. // Nature. 1986. Vol. 324, № 6092. P. 48–50.
2. Калошкин С.Д., Чердынцев В.В., Данилов В.Д. // Кристаллография. 2007. Т. 52, № 6. С. 989–1001.
3. Назин М.Н., Михеева В.Г., Лев Л.Л., Рогалев В.А., Брызкало А.М. и др. // Кристаллография. 2007. Т. 52, № 6. С. 1051–1056.
4. Никонов А.А., Семеновский П.В., Теплов А.А., Шайтура Д.С. // Кристаллография. 2007. Т. 52, № 6. С. 1016–1019.
5. Петржик М.И., Левашов Е.А. // Кристаллография. 2007. Т. 52, № 6. С. 1002–1010.



УДК 546.73-022.532:54.057

Д.И. Чистяков, Е.В. Пикурова, С.В Сайкова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

СИНТЕЗ НАНОЧАТИЦ КОБАЛЬТА С УГЛЕРОДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Магнитные наноматериалы имеют значительный потенциал применения в различных детекторах, системах хранения данных, адсорбентов для ликвидации разливов нефти, в качестве селективных контрастирующих агентов магнитно-резонансной терапии.

Отдельного обсуждения заслуживает применение магнитных частиц в области биомедицины, в частности, магнитно-термической терапии раковых заболеваний [1]. Установлено, что многие наночастицы обладают высокой проникающей способностью: легко проникают через мембраны клеток, обнаруживаются в клеточном ядре, преодолевают гематоэнцефалический барьер. Благодаря магнитным свойствам, наночастицами можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, через ткани человека вводя магнитные жидкости в опухолевые клетки. Таким образом, можно диагностировать стадию развития рака. Наночастицы с магнитным ядром могут быть покрыты специальным слоем, ядовитым для раковых клеток, за которым следует второй слой из антител, которые оседают только на раковые клетки. Частицы, состоящие из двух и более слоев, еще называют гибридными. Помимо ядовитых оболочек можно нагревать магнитные ядра, находящиеся как раз в нужном месте, переменными электромагнитными полями.

Целью данной работы является разработка метода синтеза магнитных наночастиц кобальта, покрытых углеродной оболочкой.

Изучено влияние реакционных параметров на синтез наночастиц кобальта. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние, и выявлены оптимальные условия синтеза: прекурсор – $\alpha\text{-Ni}(\text{OH})_{2-x}\text{ДСН}_x$, полученный анионообменным осаждением, объем масла 30 мл, добавка инициатора свободнорадикального процесса $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, температура синтеза 370 °С, время 4 ч.

Список литературы

1. Akbarzadeh, A. Magnetic nanoparticles: preparation, physical properties, and applications in biomedicine // *Nanoscale Research Letters*. 2012. Vol. 7, № 1. P. 144–157.

УДК 621.036.2-023.885

**А.С. Воронин¹, Ю.В. Фадеев¹, М.М. Симунин^{1,2},
С.С. Добросмыслов^{1,2}, С.В. Хартов¹**¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

МИКРОСЕТЧАТЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗОВАННОГО ШАБЛОНА КАК ГИБКИЙ ПРОЗРАЧНЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Представлены результаты исследования серебряных микросетчатых покрытий, полученных при помощи самоорганизованного шаблона в качестве тонкопленочного резистивного нагревательного элемента. Изучена зависимость теплового отклика системы от материала и толщины подложки, а также от параметров микросетчатого покрытия.

Основа современного рынка прозрачных электрообогреваемых поверхностей – оксидные (ITO, FTO) модули на стекле, их применение сопряжено с монтажом готовых электрообогреваемых окон, что достаточно трудоёмко в контексте зданий уже имеющих остекление. С другой стороны, сетчатая структура на гибкой полимерной подложке может быть легко совмещена с готовыми стеклопакетами, что значительно расширяет сферу применения [1]. Получение эффективных прозрачных нагревательных элементов также является важной задачей для автомобилестроения, авиации и космонавтики. Предлагается использование явления дегидратационной самоорганизации для формирования прозрачных нагревательных элементов на подложках различного типа [1; 2].

Тепловизионный анализ проводился на тепловизоре марки FLIR ThermoCAM SC640. Были исследованы серебряные микросетчатые покрытия на PET (толщина 50 мкм и 500 мкм), а также на стеклянной подложке (толщина 1000 мкм). Самоорганизованные шаблоны были получены из яичного белка с концентрацией мицелярного агента 3 гр/л (рисунок, а), для которого ширина трещины равна $5,5 \pm 2,6$ мкм, а средний размер ячейки $72,7 \pm 33,2$ мкм. Толщина магнетронно напыленного серебра составляла 100 и 500 нм для выявления влияния плотности и толщины микросетчатого покрытия на однородность прогрева, время нагрева и охлаждения и величину теплового сопротивления.

На рисунке, б представлена термограмма для покрытий с различной плотностью микросетки. Увеличение плотности микросетки дает более однородную картину нагрева, о чем свидетельствуют более ровные профили, проведенные через центр микросетчатого покрытия.

Время отклика, т.е. выход нагреваемой пленки на плато, зависит от теплоёмкости подложки, которая, в свою очередь, зависит от удельной теплоёмкости вещества и массы подложки, так как вклад микросетки мал.

Тонкие подложки за счет малой теплоемкости характеризуются быстрым откликом на омический нагрев, выход на плато составляет 25 с при толщине подложки 50 мкм,

увеличение толщины подложки до 1 мм приводит к увеличению времени нагрева и охлаждения до 180 с (рисунок, в). Графическая зависимость показывает линейный рост временем отклика при увеличении толщины подложки.

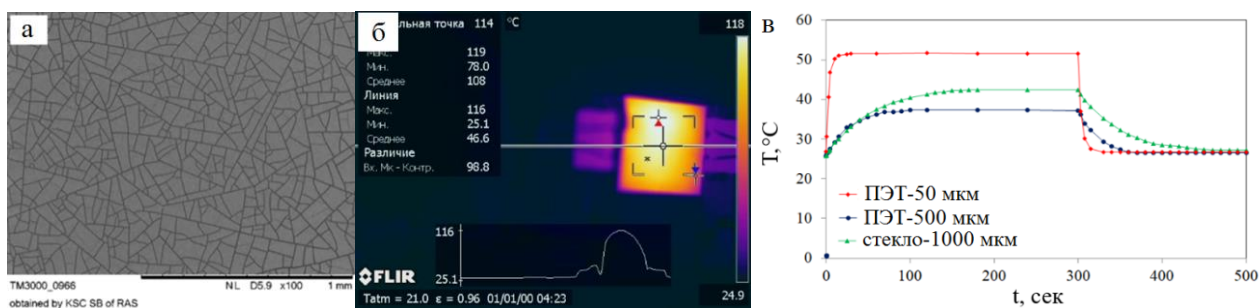


Рисунок. Изображение самоорганизованного шаблона (а); термограмма покрытия на стекле при напряжении 7 В (б) и температурные профили для Ag микросеток на различных подложках (в)

Было проведено исследование серебряных микросетчатых покрытий, на длительное циклирование с целью имитации реальной работы прозрачного нагревательного элемента. Микросетчатые покрытия могут воспроизводимо нагреваться до одной и той же температуры с разбросом менее 2,5 °С.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект «мол_а» № 18-38-00852).

Список литературы

1. Visibly transparent heaters / R. Gupta, K.D.M. Rao, S. Kiruthika, G.U. Kulkarni // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. № 8 (20). P 12559–12575.
2. Прозрачные нагревательные элементы на основе медной микросетки, пассивированной оксидом графена / Воронин А.С., Фадеев Ю.В., Иванченко Ф.С. [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4.



УДК 620.22-022.532:614.8.086.52:537.531

Ю.В. Фадеев¹, А.С. Воронин^{1*}, М.М. Симунин^{1,2}, И.В. Говорун³, С. В. Хартов¹

¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

Ni-Ag МИКРОСЕТКА СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ПРОЗРАЧНЫЙ РАДИОЭКРАНИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ

Предложены эффективные никелевые микросетчатые покрытия на основе самоорганизованного шаблона для задачи гибкой и прозрачной электромагнитной экранировки. Покрытия получены посредством гальванического осаждения никеля на тонкую серебряную микросетчатую затравку. Исследованы спектральные зависимости отражения и пропускания Ni-Ag микросеток в X диапазоне (8–12 ГГц). Получено Ni-Ag микросетчатое покрытие характеризующееся пропусканием 28,77 дБ на частоте 8 ГГц при оптической прозрачности 87,1 % и поверхностном сопротивлении 3,8 Ом/кв.

В современных системах связи применяются почти все известные каналы от КНЧ (3–30 Гц) до СВЧ (3–30 ГГц) диапазона. Таким образом, каждый человек и используемое им оборудование находится под постоянным воздействием слабых электромагнитных волн. Данный фон может мешать работе устройств, а также может служить каналом утечки информации.

В работе предлагаются композитные микросетчатые покрытия на основе самоорганизованного шаблона со структурой «ядро – оболочка», где в качестве ядра выступает тонкая серебряная микросетка, полученная магнетронным напылением, а в роли оболочки выступает гальванически осажденный никель. Покрытия, помимо высокого значения оптической прозрачности (более 85 %) и низкого значения поверхностного сопротивления (< 5 Ом/кв) характеризуется масштабируемостью и низкой себестоимостью за счет использования фундаментального природного процесса – дегидратационной самоорганизации на этапе формирования шаблона [1].

Для получения композитного микросетчатого покрытия использовались затравочные микросетки толщиной 200 нм, на которые затем гальванически осаждался никель в течение 90 и 300 секунд. На рисунке, а показана морфология Ni-Ag микросетчатого покрытия со временем осаждения 300 с.

Измерение эффективности экранирования радиоизлучения проводились по следующей методике: в разрыв волноводной линии передачи помещается исследуемый образец, для которого были измерены спектральные зависимости прохождения (S_{21}) и отражения (S_{11}) в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц (X диапазон).

На рисунке, б представлены спектральные зависимости пропускания для затравочной Ag микросетки и Ni-Ag микросеток. Пропускание для заравочной серебряной микросетки с по-

верхностным сопротивлением 10,9 Ом/кв составляет $-23,16$ дБ. Снижение поверхностного сопротивления до 3,8 Ом/кв уменьшает прошедший сигнал до $-28,77$ дБ. Дальнейшее снижение сопротивления до 0,7 Ом/кв снижает интенсивность прошедшего сигнала до $-41,39$ дБ на частоте 8 ГГц или блокирует более 99,99 % падающего излучения. Полученный результат превосходит используемые на практике решения в виде тонких пленок оксида индия-олова.

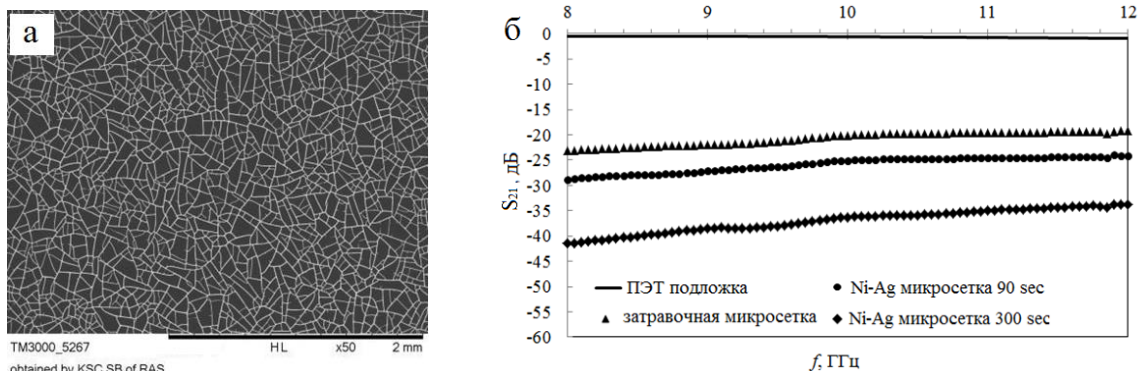


Рисунок. Ni-Ag микросетка со временем осаждения 300 с (а) спектральные зависимости коэффициента прохождения для трех рассматриваемых микросетчатых покрытий (б)

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект «мол_а» № 18-38-00852).

Список литературы

1. Пат. РФ № 2574249. Сетчатая микро- и наноструктура, в частности для оптически прозрачных проводящих покрытий, и способ ее получения / Хартов С.В., Симунин М.М., Воронин А.С., Шиверский А.В., Фадеев Ю.В., Карпова Д.В. Опубликовано 10.02.2016.



УДК 669-426:539.213.2

М.С. Дмитриев, С.В. Комогорцев

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

АТОМНЫЙ СВОБОДНЫЙ ОБЪЕМ И КОНСТАНТА ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРОВОЛОКАХ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Накопление новых знаний о структуре и свойствах аморфных сплавов важны как для теоретического материаловедения, так и для разработки новых сплавов с требуемыми свойствами. Эти сплавы, получаемые сверхбыстрой закалкой, характеризуются отсутствием дальнего порядка. Традиционные методы исследования структуры сплавов (такие как рентгеновская дифракция) для аморфных сплавов неинформативны, поэтому здесь важно применение косвенных методов, таких как магнитоструктурный и магнитофазный анализ.

Аморфные металлические сплавы характеризуются так называемой плотной случайной атомной упаковкой. Случайность в расположении атомов приводит к пониженной, в сравнении с кристаллическими сплавами, плотности. Это понижение можно описать, используя такую характеристику дефектности структуры, как свободный объем. Величина свободного объема в аморфном сплаве определяет уровень топологического беспорядка. В ферромагнитном аморфном сплаве это может влиять на величину константы обменного взаимодействия.

В настоящем докладе мы сравниваем результаты измерения свободного объема и величины обменной константы для двух проволок аморфного сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$.

Аморфные микропроволоки $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ на основе кобальта получены быстрой закалкой из расплавов ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. Л.П. Бардина. Измерения температурных и полевых зависимостей намагниченности выполнялись на вибрационном магнитометре.

Определение плотности проводили взвешиванием и последующим делением массы проволоки на ее объем. Оказалось, что если воспользоваться величинами средних диаметров проволоки 0,165 мм и 0,115 мм, измеренных с помощью микрометра, для оценки их объема это приводит к значительной переоценке последнего. Микроскопическое исследование измеренных образцов показывает, что сечение проволоки плавно меняется вдоль ее длины в пределах нескольких процентов. Вычисленный с помощью такого исследования объем взвешенного образца проволоки позволил корректно определить ее плотность. В результате измененная плотность для обоих образцов проволоки составила $8,3 \pm 0,1$ г/см³.

Для оценки свободного объема мы рассчитали теоретическую плотность кристаллического сплава того же химического состава, что исследованные проволоки. В качестве структуры, характеризующейся плотнейшей упаковкой, выбрали ГЦК решетку.



Этот гипотетический кристаллический сплав представлял собой неупорядоченный твердый раствор состоящий из тех же атомов, что и аморфный аналог.

Оказалось, что расчетная плотность сплавов выше экспериментальной (таблица). Это позволяет нам оценить свободный объем аморфных сплавов как $\Delta V = \frac{\rho_{\text{теор}} - \rho_{\text{эксп}}}{\rho_{\text{теор}}}$.

Таблица

Свободный объем проволок

Образец	Экспериментальная плотность ρ , г/см ³	Модель плотной упаковки атомов ρ , г/см ³	Свободный объем ΔV , %
Co ₆₆ Fe ₄ Si _{12.5} Ta _{2.5} B ₁₅	8,3	9,0	8
Co ₆₆ Fe ₄ Si _{12.5} Nb _{2.5} B ₁₅	8,3	8,7	5

Оказалось, что для обеих проволок температурная зависимость намагниченности насыщения в низких температурах хорошо описывается выражениями теории Блоха для спиновых волн. Такое описание позволяет количественно оценить величину A . Константа обменного взаимодействия для проволоки с меньшим свободным объемом оказалась выше. Для проволоки Co₆₆Fe₄Si_{12.5}Ta_{2.5}B₁₅ $A = (1,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$ эрг/см и $A = (1,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$ эрг/см. Качественно этот результат ожидаем, однако количественная оценка такого изменения дает новые знания о влиянии топологического атомного беспорядка на величину обменного взаимодействия, которые могут быть получены только экспериментально.

УДК 66.095.57:542.61

**В.И. Елесина, Я.Н. Чеботаева, Н.Г. Внукова, И.В. Осипова,
А.И. Дудник, Г.Н. Чурилов****ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВЫХ СМЕСЕЙ
С Gd РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ**

Наиболее популярный метод выделения фуллеренов – метод экстракции Сокслета [1]. Эффективная экстракция фуллеренов из фуллеренсодержащей сажи (сажа) предполагает достижение требуемого результата в возможно короткие сроки. По этому параметру отмечается малая эффективность существующих методов экстракции. Следовательно, разработка новых и усовершенствование имеющихся методов актуальна. В данной работе нами проведено сравнение метода экстракции Сокслета и разработанного нами метода экстракции с применением механо-активационного воздействия [2]. Метод основан на том, что сажа вращающимися лопастями экстрактора механически перемешивается и наносится тонким слоем на внутреннюю поверхность фильтровальной гильзы. Поток растворителя под действием центробежной силы в тонком слое сажи растворяет фуллерены и выносит их через стенку фильтровальной гильзы. Это сокращает время экстракции и исключает повторную сорбцию [2].

Электродуговым методом нами получена сажа. В электродах (ТУ 3497-001-51046676-2008, диаметр 6 мм, длина 100 мм) высверливалось осевое отверстие диаметром 3 мм и заполнялось смесью порошка графита и Gd_2O_3 по 50 вес. % каждого.

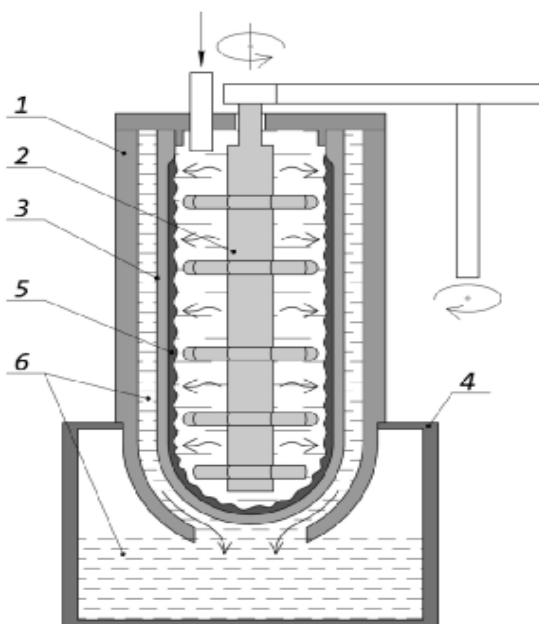


Рисунок. Изображение экстрактора [2]: 1 – корпус; 2 – вал с лопастями; 3 – фильтровальная гильза; 4 – приемный сосуд; 5 – твердая компонента суспензии; 6 – раствор фуллеренов



Вся сажа делилась на две равные части, из которых проводилось выделение фуллеренов с CS_2 как аппаратом Сокслета, так и экстрактором [2]. Выделение методом Сокслета производилось по стандартной технологии. Для выделения фуллеренов с использованием экстрактора готовилась суспензия из сажи и CS_2 (из расчета 100 мл на 1 г), которая подавалась в зазор между валом с лопастями и стенкой фильтровальной гильзы. Полученные растворы фуллеренов фильтровались и высушивались. В результате были получены фуллереновые смеси с Gd, которые разделялись методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Agilent 1200 Series с колонкой Buckyprep-M (10 мм × 250 мм). В качестве элюента использовался толуол.

Экспериментальные и аналитические работы проводились три раза. По результатам обобщения полученных данных проведен анализ зависимости процесса экстракции от времени механического воздействия на сажу. Результаты показали, что общее количество выделенных из сажи фуллеренов двумя методами практически не отличалось ($\approx 2,4\%$).

Принимая во внимание, что время, затраченное на процесс выделения продукта (фуллереновой смеси), это расходуемый ресурс, а эффективность выделения, при расходе растворителя и фильтровальных элементов, для обоих методов одинакова, по данному параметру можно оценить эффективность обоих методов жидкостной экстракции.

Проведенные исследования показали, что для выделения одного и того же количества фуллереновой смеси требуется 18 ч, в случае применения метода Сокслета и 15 мин – в случае применения механического экстрактора. Таким образом, эффективность разработанного нами метода в 72 раза выше. Полученные результаты могут быть использованы исследователями при решении задач экстракции фуллеренов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-19080.

Список литературы

1. Экстракция фуллереновой смеси из фуллереновой сажи органическими растворителями / Л.В. Цветкова, В.А. Кескинов, Н.А. Чарыков [и др.] // Журнал общей химии. 2011. № 81 (5). С. 832–839.
2. Ultrafast method of fullerenes extraction from carbon condensate / G.N. Churilov, V.I. Elesina, A.I. Dudnik [et al.] // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2019. № 27 (3). P. 225–232.



УДК 539.216.2-022.532:577.114.5:537.622

Л.А. Чеканова¹, Е.А. Денисова^{1,2}, Р.С. Исхаков¹, И.В. Немцев³

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

СИНТЕЗ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА 3D МЕТАЛЛ-СОДЕРЖАЩИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ

Развитие современного материаловедения в значительной степени связано с созданием перспективных материалов с особым составом, структурой и свойствами различного функционального назначения. Наноконпозиты, включающие в свой состав наночастицы ферромагнитных металлов, перспективны для использования в различных областях техники: магнитных системах записи, высокочастотных устройствах, системах защиты от излучения, СВЧ электронике и других [1–3]. В последние годы возрос интерес исследователей к металл-содержащим наноконпозитам на основе высокомолекулярных соединений (полипиррол, хитозан, карбоксиметилцеллюлоза, арабиногалактан и др.) [4]. Такие соединения сочетают свойства полимерной составляющей (биосовместимость, высокая координирующая способность) со свойствами металлических наночастиц, что позволяет расширить практическое применение этих материалов. Среди разнообразных методов получения наноконпозитов с полимерными матрицами наибольшее распространение получили химические методы. Однако классические химические и физико-химические методы синтеза наночастиц и наноструктурированных материалов, как правило, требуют использования токсичных реагентов. Особняком стоят биологические «зеленые» методы синтеза, которые отличаются простотой, экологичностью, управляемостью.

Химические методы изготовления наночастиц и наноструктурированных материалов основаны на восстановлении катионов солей металлов Me^{n+} до нейтральных атомов Me^0 :

$Me^{n+} \xrightarrow{nH^+} Me^0$ с последующим их объединением в сложные наноразмерные образования и одновременно окисление биовосстановителей. Биовосстановители являются нетоксичными, биологически разлагаемыми, сравнительно легко извлекаются из биологических материалов. Использование в качестве восстановителя и стабилизатора частиц природных полисахаридов может стать простым и технологичным методом создания уникальных наноразмерных материалов широкого спектра действия. Особенности надмолекулярной структуры, обилие гидроксильных групп, стабилизирующий эффект полимерной молекулы обеспечивают полисахаридам значительный потенциал в процессах формирования наноструктур. В нашей работе представлены результаты исследования магнитных свойств наноструктурированных пленок сплавов FeCo/C, синтезированных методом химического осаждения с использованием в качестве восстановителей природных полисахаридов. Сплавы FeCo обладают наибольшим



значением намагниченности насыщения и высокой температурой Кюри, что позволяет получить новые материалы на основе нанокompозитов FeCo/C, перспективные для защиты от электромагнитных излучений.

Методом химического осаждения синтезированы три серии наноструктурированных пленок Fe_xCo_{100-x}/C ($0 < X < 100$) в качестве восстановителей использованы крахмал, арабиногалактан, сахар. Для сравнения синтезированы пленки FeCo(P) с использованием классического восстановителя – гипофосфита натрия. Полученные образцы исследовались методами электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. Интегральные (коэрцитивная сила) и основные (намагниченность насыщения, константа обменного взаимодействия, величина поля локальной анизотропии) магнитные характеристики синтезированных материалов исследованы как функции содержания Fe, Co или C в сплаве.

По результатам исследований проведен сравнительный анализ магнитных свойств пленок FeCo сплава, синтезированных с использованием восстановителей различного типа. Определено влияние соотношения атомов Fe и Co в сплаве на микроструктуру и магнитные характеристики синтезированных образцов. Установлено, что наибольшее значение намагниченности насыщения для пленок FeCo/C достигается при 40 % Co. Величина поля локальной анизотропии увеличивается с уменьшением содержания Fe для всех серий FeCo пленок. Магнитные свойства обсуждаются в рамках модели случайной магнитной анизотропии.

Список литературы

1. Hasegawa D., Yang H., Ogawa T., Takahashi M. J. M. M. M. 2009. Vol. 321, 746.
2. Yang Y., Xu C., Xia X., Wang T., Li F. Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 493. P. 549–552.
3. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Успехи химии. 2009. № 78 (9). С. 867–888.
4. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Химия. М., 2000. 672 с.

УДК 669.15-194: 537.322

Р.М. Соболев¹, Т.В. Фадеев², Ю.М. Кузнецов², Л.И. Квеглис¹¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Национальный исследовательский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СТАЛИ ГАДФИЛЬДА**

Актуальность. Список веществ, имеющих термоэлектрические свойства, достаточно велик, но лишь немногие из них могут использоваться для преобразования тепловой энергии в электрическую. В данной работе исследуются возможности использования сплава $Fe_{86}Mn_{13}C$ (сталь Гадфильда) в качестве альтернативного материала с термоэлектрическими свойствами полупроводника [1]. Зависимости термо-ЭДС от температуры при нагреве и охлаждении могут менять знак при определенных значениях температуры. Было установлено, что электрическое сопротивление образца не зависит от температуры, что характерно для инвара. Мы наблюдали аномальное поведение магнитосопротивления в магнитном поле (удельное сопротивление в магнитном поле). Отрицательное магнитосопротивление наблюдается, когда образец был повернут на 180° в магнитном поле $H = 100$ Э.

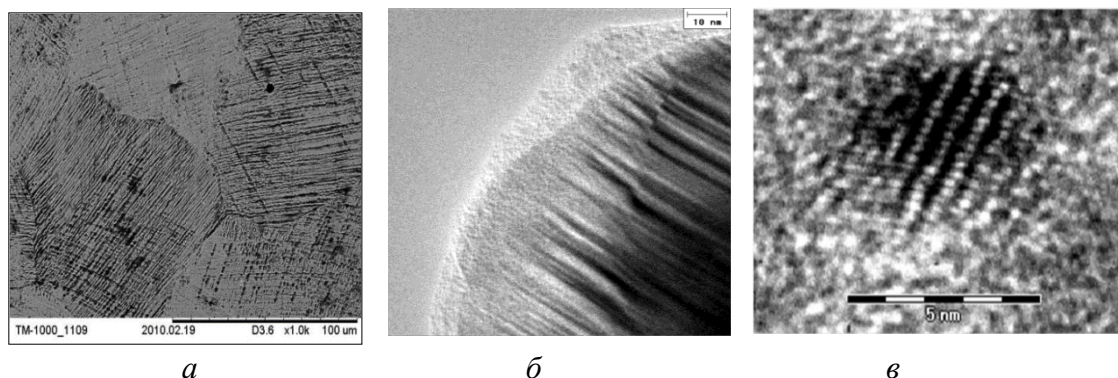


Рис. 1. Изображение структуры образцов стали Гадфильда: *a* – поверхности массивного образца в сканирующем микроскопе; *б* – утоненной фольги образца в просвечивающем электронном микроскопе; *в* – полосчатая наноструктура высокого разрешения от тонкопленочного образца стали Гадфильда

Поведение термо-ЭДС может быть объяснено тем, что сплав представляет собой антиферромагнитный инвар, в котором наблюдали появление локализованной намагниченности в образцах при ударной нагрузке. Структурные особенности $Fe_{86}Mn_{13}C$ сплава вызывают существование различных типов магнитного упорядочения в том же образце. На рис. 1 можно наблюдать изображение поверхности объемного образца $Fe_{86}Mn_{13}C$ после ударной нагрузки, полученное методом сканирующей электронной микроскопии. Видны отдельные зерна аустенита с линиями сдвиговой деформации в виде темных полос параллельных друг другу. Темные полосы в одних зернах переходят в темные полосы соседних зерен. Рентгеновская дифракция свидетельствует о появлении мартенсита деформации [3]. Эта фаза лока-

лизуется в полосах сдвига деформации внутри аустенитных зерен [4]. Поперечный эффект Нернста – Эттингсгаузена – термомагнитный эффект, наблюдаемый при помещении полупроводника, в котором имеется градиент температуры, в магнитное поле. Величину напряжённости электрического поля можно выразить формулой

$$E_y = \frac{u}{d} = q_{\perp} B_z \frac{dT}{dx},$$

где q_{\perp} – постоянная Нернста – Эттингсгаузена, которая зависит от свойств полупроводника и может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Величина постоянной q_{\perp} , а следовательно, и E_y , сильно зависят от температуры образца и от магнитного поля и при изменении этих величин могут даже изменять знак.

Поперечный эффект Нернста – Эттингсгаузена возникает в результате отклонения потока заряженных частиц силой Лоренца (рис. 2).

Измерение плёнок стали Гадфильда. Экспериментально обнаружено, что магнитные моменты исследуемых плёнок зависят от величины магнитного поля. Ось лёгкого намагничивания лежит в плоскости плёнки.

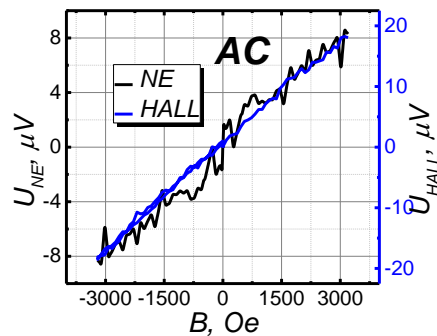


Рис. 2. График измерений напряжения Н – Э от магнитного поля в геометрии (т.е. перпендикулярно оси лёгкого намагничивания)

Зависимость ЭДС Холла (синяя) и напряжения Нернста – Эттингсгаузена (чёрная) для плёнки стали Гадфильда (АС). Видно, что магнитнополевые зависимости как ЭДС Холла, так и напряжения Н – Э линейные, а величина напряжения Н – Э очень небольшая. ЭДС Холла пропорциональна намагниченности. В наших полях намагниченность плёнки далека от намагниченности насыщения, т.е. мы находимся на начальном участке кривой намагничивания, что и обуславливает линейный характер зависимости эффекта Н – Э.

Список литературы

1. Kveglis L.I., Noskov F.M. Local electron structure and magnetization in $\text{Inb-Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ // Superlattices and
2. Причина знакопеременного термоэлектрического эффекта в сплаве $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ / Л.И. Квеглис, Р.Б. Абылкалыкова, А.В. Джес [и др.] / Изв. Рос. Акад. наук. Серия физическая. 2014. Т. 78, № 4. С. 504–507.
4. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов // Металлургия. 1977.



УДК 620.22-022.532:532.528.1

В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, В.Д. Минаков

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМЫ СО СПЛОШНОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Известно и многократно доказано, что воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями (УЗ воздействие) на системы со сплошной жидкой фазой реализует кавитационные и другие нелинейные эффекты, которые позволяют получать новые конструкционные и функциональные материалы, модифицированные наночастицами.

На сегодняшний день режимы (интенсивность и принцип формирования УЗ колебаний) и условия (геометрия технологического объёма) воздействия, позволяющие достичь как можно большей эффективности процессов в системе со сплошной жидкой фазой (например, деполимеризация несущей жидкой фазы, содержащей наночастицы, диспергирование частиц вплоть до наноразмеров) в основном подбираются экспериментальным путём индивидуально на конкретных средах. Однако такой подход обладает рядом принципиальных недостатков, а именно:

- не обеспечивает максимум КПД ультразвукового воздействия с помощью подобранных режимов и условий, поскольку не определяется фактическое отношение затрат энергии на преобразование структуры и свойств системы с жидкой фазой (энергии на разрыв межатомных связей жидкой фазы, разрушение дисперсных частиц) к введённой акустической энергии;
- не гарантирует, что подобранные режимы и условия обеспечат максимальную энергетическую эффективность процесса на протяжении всего времени его протекания. Это связано с тем, что под действием ультразвука с течением времени меняются свойства и характеристики обрабатываемой среды;
- не позволяет прогнозировать оптимальные режимы и условия воздействия для новых, ранее не известных процессов или озвучиваемых сред. Это обусловлено тем, что такой подход не даёт возможность установить единые закономерности формирования структуры и свойств систем с жидкой фазой в зависимости от режимов и условий воздействия.

Одно из следствий указанных недостатков – в существующих промышленных образцах ультразвуковых технологических аппаратов, которые реализуют экспериментально подобранные режимы и условия, более 90 % энергии теряется в виде нагрева озвучиваемой среды.

Для повышения энергоэффективности ультразвукового воздействия и снижения себестоимости производства материалов, модифицированных наночастицами, необходимо оптимизировать режимы и условия ультразвукового воздействия.



Для оптимизации ультразвукового воздействия на системы со сплошной жидкой фазой создана комплексная взаимосвязанная модели преобразования энергии ультразвуковых колебаний в целевое изменение структуры и свойств обрабатываемой среды, которая позволит выявить режимы и условия, обеспечивающие повышение КПД воздействия.

При помощи созданной модели выявлены оптимальные режимы и условия ультразвуковой деполимеризации сплошной жидкой фазы и диспергирования частиц, которые обеспечивают максимальное отношение энергии, затрачиваемое на целевое изменение структуры и свойств среды, к суммарной введённой энергии ультразвуковых колебаний. Созданная модель подтверждена экспериментально и послужит основой для создания промышленных ультразвуковых технологических аппаратов.

Теоретические исследования (разработка общего подхода к моделированию, создание модели диспергирования) выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00094).

Теоретические исследования процесса деполимеризации и экспериментальные исследования выполнены при поддержке Гранта Президента РФ №МК-2813.2018.8.

Список литературы

1. Golykh R.N. Model of ultrasonic cavitation depolymerization of oil for evaluation of optimum modes and conditions providing reducing viscosity at low temperatures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 193. Conf. 1. 7 p.
2. Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой: монография / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. 276 с.

УДК 544.344.015.4

**А.С. Воронин¹, М.М. Симуни^{1,2}, Е.Н. Вершинникова², Ю.И. Мухаметшина²,
А.В. Достовалов², А. Банзаракцаев², А. Марьяшин, Е. Щука²**¹ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ РЕАКЦИИ ВНУТРИ ГРАФЕНОПОДОБНОЙ КАПСУЛЫ

Цель работы – исследовать фазообразование в процессе твердофазных реакций при спекании порошков на основе $Al_2O_3 + MgO$ методами *in situ* просвечивающей электронной микроскопии и дифракции электронов.

Метод спекания порошков. Синтез шпинели осуществляется за счет диффузии катионов магния (Mg^{2+}) через графеноподобную капсулу и его встраивания в решетку оксида алюминия. Данная методика позволяет проводить синтез сложносоставных оксидов с тонким контролем морфологии продуктов реакции. Синтез графеноподобной капсулы на нановолокнах оксида алюминия осуществлялся методом CVD посредством пиролиза этанола при температуре 900 °С. Подробно методика описана в работе [1]. Для формирования плотной капсулы было выбрано время синтеза 120 с. Реакция проводилась в атмосфере аргона осуществлялся в течение 8 ч при температуре 1 400 °С. Скорость нагрева составляла 10 °С/мин. В качестве источника ионов магния выступала кокс, которым были засыпаны брикеты покрытых графеноподобным углеродом нановолокон оксида алюминия (табл. 1, 2).

На рисунке приведена картина дифракции электронов, полученная от спеченных порошков $Al_2O_3 + MgO$ в углеродной матрице.

Таблица 1

Наиболее интенсивные рефлексы шпинели $MgAl_2O_4$

№	d, Å	hkl	I
1	2,436	222	100
2	2,021	400	65
3	1,429	440	55
4	1,555	511	45
5	2,858	220	40

Таблица 2

Сравнение экспериментальных результатов с табличными данными

Экспериментальные результаты			Al_2O_3	Шпинель $MgAl_2O_4$
№	d(Å)	I(отн.)	d-I-hkl	d-I-hkl
1	3,4797	45	3,479-45-012	–
2	2,858	40	–	2,858-40-220

Окончание табл. 2

Экспериментальные результаты			Al ₂ O ₃	Шпинель MgAl ₂ O ₄
№	d(Å)	I(отн.)	d-I-hkl	d-I-hkl
3	2,5508	100	2,552-100-104	–
4	2,437	100	–	2,436-100-222
5	2,08553	66	2,085-66-113	–
6	2,02	65	–	2,021-65-400
7	1,7401	34	1,740-34-024	–
8	1,6016	89	1,601-89-116	–
9	1,5554	45	–	1,555-45-511
10	1,4289	55	–	1,429-55-440

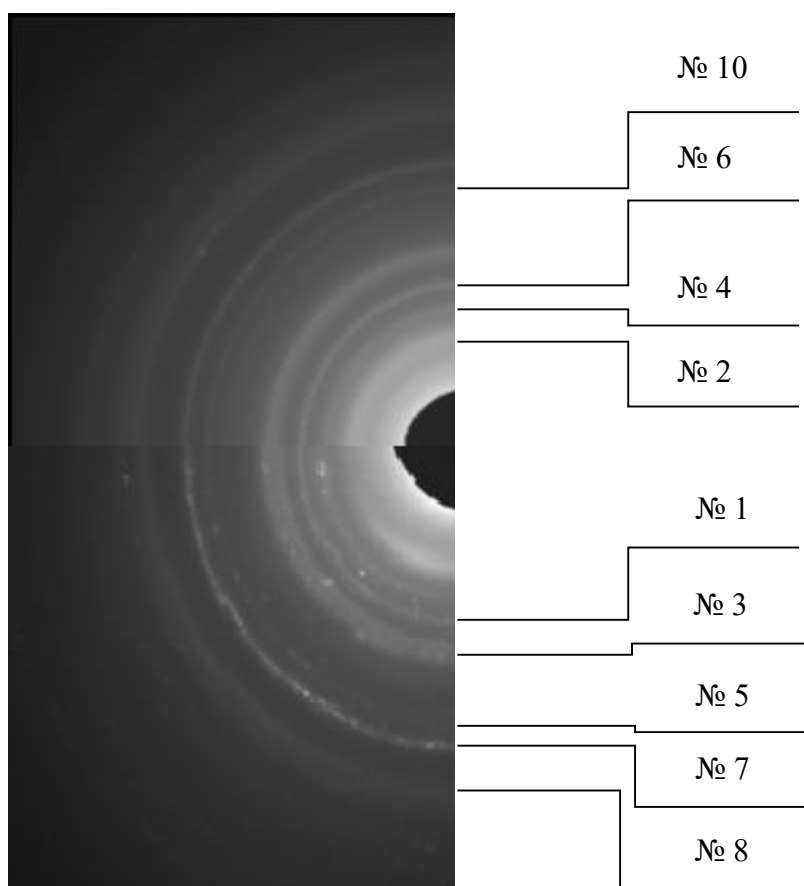


Рисунок. Картина дифракции электронов, полученная от образца после спекания порошков Al₂O₃ + MgO

Вывод: из расшифровки картин дифракции электронов, полученных от спеченного композита следует, что в процессе спекания Al₂O₃ + MgO в углеродной матрице образуется нормальная шпинель MgAl₂O₄.

Авторы благодарят М.Н. Волочаева (КНЦ СО РАН) за помощь в проведении эксперимента.

УДК 621.762.2:539.215.4

А.Г. Мейлах, Ю.В. Концевой, А.Б. Шубин

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

ДИСПЕРСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ МЕДИ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

Создание функциональных материалов на основе меди часто подразумевает повышение механических свойств этой основы. С целью получения порошковой дисперсно-упрочнённой (ДУ) меди наиболее экономичным методом однократного холодного прессования и спекания в работе были исследованы процессы активированной консолидации и структурообразования композитов (КМ) из Cu–Al₂O₃ нано-порошков. Эффективность этого способа оценивалась по плотности и твёрдости полученных КМ. Порошки Cu–1%Al₂O₃ готовили осаждением гидроксидов меди и алюминия из смеси растворов нитратов. Полученный осадок нагревали на воздухе при 500 °С, после чего – в водороде при температурах 400, 500 и 650 °С. Эти порошки меди по данным микрорентгеноспектрального анализа содержали 1 масс. % Al₂O₃ и имели определённую методом БЭТ площадь поверхности 15,1; 12,5 и 9,2 м²/г, или средний размер частиц – 44, 53 и 72 нм. Образцы прессовали при давлении 400–700 МПа, спекали в водороде при температурах 800 и 1 000 °С с выдержкой 1ч. Добавкой, активирующей спекание, служила смесь порошков оксалатов: 0,5 масс. % CoC₂O₄ + + 2–2,5 масс. % CuC₂O₄ [1]. Смешивание порошков проводили всухую, в течение 4 ч в шаровой мельнице с соотношением массы мелющих тел и порошков 10:1.

Установлено, что нагревание до 800 °С образцов из всех порошков сопровождается их уплотнением. В процессе последующего не активированного спекания при 1000 °С плотность 7,0 г/см³ является граничной: при плотности ≤ 7,0 г/см³ образцы продолжают уплотняться, а при большей плотности растут, что, очевидно, связано с образованием на их поверхности плотной оболочки, препятствующей выходу газов из центральной части. Для подтверждения этого предположения определяли изменение относительной плотности и уменьшения массы (Δm) в процессе спекания образцов. На рисунке, *a* видно, что без добавки оксалатов основное снижение массы образцов (Δm) происходит во время нагревания до 800 °С, а при 1 000 °С Δm , связанное, по-видимому, с дегидратацией Al₂O₃·2H₂O [2], составляет 0,26–0,29 %. Это обусловило образование при 1 000 °С больших полостей и трещин в предварительно спечённых при 800 °С до плотности 7,9 и 7,5 г/см³ образцах (кривые 3, 4) из порошков, полученных при 500 и 650 °С, и уменьшения их плотности до 6,35 и 7,1 г/см³.

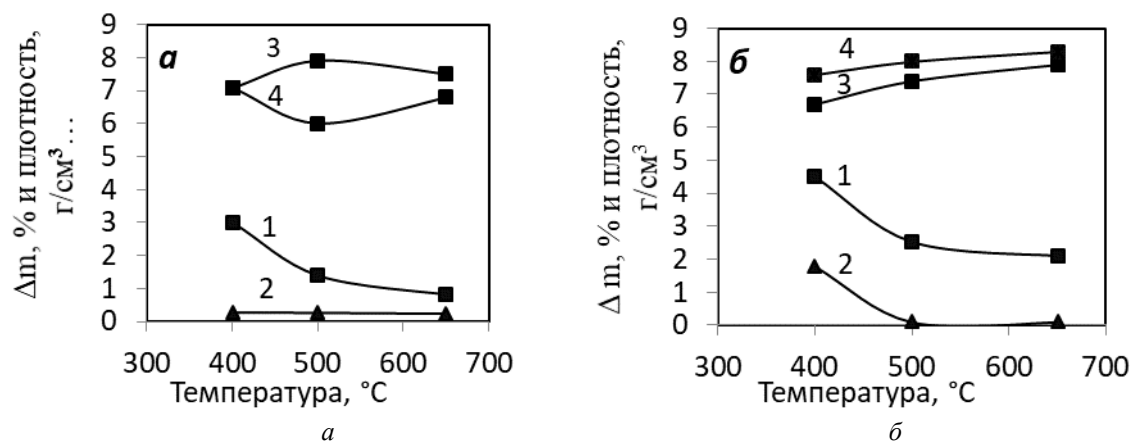


Рисунок. Зависимость уменьшения массы (1, 2) и плотности (3, 4) образцов от температуры получения порошков и спекания (а – не активированного, б – активированного): 1, 3 – 800 °С; 2, 4 – 800 + 1 000 °С

В условиях активированного спекания образцы из всех порошков после нагревания при 800 °С продолжают уплотняться при 1 000 °С (рисунок, б). Это обеспечено высокой пористостью (30,1 %) образца из порошка, полученного при 400 °С (кривая 2), и достаточно малым изменением массы ($\Delta m < 0,1$ %) образцов на основе порошков, полученных при 500 и 650 °С. Механизм активированного спекания заключается в том, что применяемая добавка при нагревании в водороде синхронизирует активированное восстановление оксидов меди образующимися нано-частицами кобальта и выделение газообразных продуктов разложения всех оксалатов, поддерживающих проницаемость КМ.

Итак, однократное прессование и активированное спекание обеспечило получение Cu-1% Al₂O₃ КМ с мелкозернистой (2–3 мкм) и небольшим количеством малых (1 – 3 мкм) пор, плотностью 8,4 г/см³ и твёрдостью (НВ) 780 МПа, что в 2 раза выше твёрдости чистой меди. В то же время при не активированном спекании в структуре КМ наблюдаются зёрна размером до 20 мкм, поры – до 10 мкм, а твёрдость – 600–650 МПа.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

Список литературы

1. Мейлах А.Г., Рябова Р.Ф. Влияние добавок оксалатов железа, кобальта и никеля на уплотнение при спекании и свойства порошковой меди // ФХОМ, 1998. № 1. С. 77–80.
2. Rajan N.R.D., Pillai R.M., Pai B.C. Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites // J. Mater. Sci. 1998. Vol. 33, № 14. P. 3491–3503.



УДК 544.034.2

В.Н. Хмелев, Г.А. Боброва, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ НА МАССОПЕРЕНОС В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

На сегодняшний день большое распространение получают наножидкости, которые представляют собой двухфазные системы газа и жидкости с включениями в виде наночастиц. Они уже с успехом используются в создании лекарственных, косметических, а также в различных технических процессах [1].

В большинстве аппаратов, реализующих данные процессы, происходит взаимодействие газовой и жидкой фазы движущихся в каналах технологического аппарата параллельно друг другу. В результате взаимодействия происходит массоперенос целевого компонента (процесс диффузии) от одной фазы к другой. При этом скорость массопереноса целевого компонента определяет производительность этих процессов, таких как абсорбция, сушка. Одним из эффективных способов повышения эффективности данных процессов является воздействие высокоинтенсивными ультразвуковыми (УЗ) колебаниями.

Предложенная модель позволяет определить объемный коэффициент диффузии (коэффициент пропорциональности вектора плотности потока целевого компонента градиенту концентрации) в газовой и жидкой фазах. Модель основана на уравнениях диффузии молекул газа в жидкости с учетом макроскопических характеристик процессов, таких как: 1) площадь поверхности взаимодействия; 2) градиент концентрации целевого компонента вблизи промежуточного слоя; 3) объемный коэффициент массопереноса; 4) коэффициент концентрационного взаимодействия.

Для нахождения объемного коэффициента диффузии необходимо решить усредненное уравнения диффузии по характерному объёму акустического микропотока, возникающего вблизи поверхностей раздела или вблизи стенок технологического объёма.

При наложении УЗ колебаний происходит ускорение протекающих процессов за счет следующих факторов: возникновение микрокапиллярных волн на границе «газ – жидкость»; появление полимолекулярной плёнки при переходе из жидкой в газовую фазу; наличие конечного градиента концентрации целевого компонента вблизи границы раздела, как на стороне жидкой, так и на стороне газовой фазы.

Исследования процесса абсорбции позволили определить оптимальную частоты взаимодействия равную 33 кГц, при которой происходит увеличение объемного коэффициента массопереноса, что в свою очередь влияет на увеличение скорости массопереноса [2].

Однако это недостаточно, так как в некоторых процессах, в которых в котором жидкая фаза связана неразрывно с твёрдым веществом, поэтому необходимо проводить исследования влияния УЗ колебаний на массоперенос поглощаемого газа через поверхность раздела



«газ – жидкость» [3]. Было предложено использовать волноводы с расширенной поверхностью излучения. Так как данные волноводы обладают рядом преимуществ по сравнению с цилиндрическими, такими как большая площадь поверхности озвучивания, равномерное излучение вдоль всей поверхности рабочего инструмента [4]. Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии оптимальной рабочей частоты, которая составляет 22 кГц и позволяет обеспечивать повышение эффективности протекания процессов.

Список литературы

1. Рудяк В.Я., Белкин А.А. Моделирование коэффициентов переноса наножидкостей // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. Т. 1, № 1. С. 156–177.
2. Determination of optimum construction of the ultrasonic radiator for cavitation-acoustic intensification of the absorption processes by mathematical and computer modeling methods / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov [et al.] // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2017: Conference Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2017. P. 227–232.
3. Математическое моделирование механизма акустической сушки пористых / А.А. Жилин, А.В. Федоров, Ю.Г. Коробейников, В.М. Фомин // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, № 5. С. 102–117.
4. Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Лебедев А.Н. Исследование и разработка полуволновых пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем // Техническая акустика. 2005. Т. 5. С. 318–330.



УДК 662.642:622.822.225

В.А. Кузнецов, П.А. Необъявляющий, О.Л. Магдеева, А.А. Дектерев

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМОВОЗГОРАНИЯ БУРОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ

Известно, что все виды угля подвержены самовозгоранию, однако наиболее пожароопасными являются такие угли, как торф, бурый уголь и лигнит [1; 2]. Они характеризуются более высоким содержанием влаги, летучих веществ, высокой пористостью и низким содержанием твердого углерода. Рыхлая природа низкосортных углей не только увеличивает адсорбционную способность (имеет высокую площадь поверхности для окисления), а также обеспечивает превосходные изолирующие свойства, которые предотвращают рассеивание тепла во время окисления (нагрева). Эти факторы создают идеальную среду для самовозгорания, поэтому пожарная опасность объектов теплоэнергетики обусловлена в первую очередь обращением бурого угля и угольной пыли. Иногда даже бурый уголь, независимо от его происхождения, доставляется на электростанцию с частично загоревшимся вагоном или баржей.

В связи с этим возрастает актуальность разработки расчетно-экспериментальной методики прогнозирования самовозгорания бурых углей при их переработке, хранении и транспортировке, основанной на экспериментальном изучении реакционных свойств угольного топлива и трехмерном моделировании процессов тепломассопереноса.

В данной работе для исследования параметров и критических условий процессов самовозгорания использовалась специальная экспериментальная установка [3]. Основу установки составляют суховоздушный термостат особой конструкции, позволяющий поддерживать температуру в диапазоне от 50 до 300 °С с точностью 0,5 °С, и реакционный сосуд (навеска) цилиндрической формы (высотой 4 см и диаметром 3 см), в который засыпается исследуемый образец твердого топлива, выполненный в виде цилиндра, из тонкой латунной сетки. В ходе опытов регистрируется температура исследуемого образца. Отслеживается температура в термостате для соблюдения постоянных условий. На основе полученных экспериментальных данных определяли кинетические параметры процесса самовозгорания.

Для моделирования процесса самовозгорания угольного топлива используется пространственное уравнение теплопроводности, в котором тепловыделение при окислении угля учитывается посредством задания источника тепла, основанного на полученных экспериментально кинетических параметрах этого процесса – эффективных энергии активации и предэкспоненциальном множителе. На границах задается коэффициент теплоотдачи, соответствующий постановке задачи.

Были проведены расчетные исследования процесса самовозгорания угольного топлива на основе расчетно-экспериментальной методики. Результаты исследований свидетельствуют о том, что с использованием предлагаемой методики можно исследовать факторы, влия-



ющие на увеличение рисков самовозгорания угля, при его перевозке, а также при хранении на складах, обосновать и разработать, например, конструкции специализированных контейнеров, удовлетворяющие требованиям по самовозгоранию угля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ в рамках научного проекта № 18-48-243013.

Список литературы

1. Kremcheev E.A., Gromyka D.S., Nagornov D.O. Techniques to determine spontaneous ignition of brown coal // Journal of Physics: Conf. Series 2018. 1118. 012021.
2. Theoretical and Experimental Study on Spontaneous Ignition of Lignite during the Drying Process in a Packed Bed / Xuezhong Gao, Chengbo Man, Shangjian Hu, Xueyuan Xu, and Defu Che // Energy Fuels 2012. 26. 6876–6887.
3. Захаренко Д.М. Особенности развития теплофизических процессов самовозгорания и взрыва пыли бурых углей: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2001. С. 69–82.



УДК 678.074-419.8:539.612

**Т.А. Шалыгина^{1,2}, С.Ю. Воронина^{1,2}, А.Ю. Власов¹,
К.А. Пасечник^{1,2}, И.В. Обверткин^{1,2}**

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

² ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

МЕХАНИЗМ ДИФфуЗИОННОЙ АДГЕЗИИ В ПОЛИУРЕТАНОВОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ, ПРИВОДЯЩИЙ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ТРОЙНОЙ ФОРМЫ

Полимеры, обладающие эффектом памяти тройной формы (ЭПТФ), являются интеллектуальными материалами, активно исследуемыми в настоящее время. ЭПТФ позволит осуществлять многоуровневые трансформации, соответствующие различным значениям температурного воздействия, и решать сложные задачи различных областей науки и техники [1]. Например, полимер с ЭПТФ может быть применен в качестве материала для изготовления различных элементов трансформируемых конструкции в том числе и космического назначения, с возможностью компактной упаковки во временную (транспортировочную) форму на Земле и восстановления исходной (рабочей) формы в космическом пространстве при нагревании [2].

Одним из перспективных материалов с ЭПФ является полиуретан, представляющий собой своеобразный «раствор» уретановых (жестких) в полиэфирных (гибких) сегментах. Однако, преобладание гибких сегментов в структуре полиуретана накладывает ограничение на возникновение ЭПТФ. Задачей настоящего исследования является поиск физических способов увеличения доли жестких блоков в структуре полиуретана, так как именно они отвечают за реализацию и фиксацию промежуточной формы. За основу был принят тот факт, что при производстве углеродных волокон, их поверхность покрывают полимерным аппретом. На границе раздела полимерного аппрета и полиуретанового связующего может протекать процесс диффузионной адгезии, способствующий образованию переходного слоя с повышенной плотностью упаковки, в результате чего соотношение гибких и жестких блоков сместится в сторону последних, способствуя реализации и фиксации промежуточной формы — появлению ЭПТФ.

С помощью дифференциального сканирующего калориметра (DSC25) были исследованы образцы исходного полиуретана и полиуретана, армированного тремя слоями биаксиальной ткани на основе углеродных волокон, аппретированных эпоксидным аппретом. На кривых обратимого теплового потока наблюдается изменение структуры полиуретана в случае армирования, описываемое уменьшением интенсивности температурного перехода гибких сегментов, при этом значение температуры стеклования (T_g) оставалось неизменным, как и в случае исходного полиуретана оно составило 44,5 °С. Переход жестких сегментов стал более интенсивным, а значение T_g сместилось в низкотемпературную область на 8 °С и составило 70 °С. С помощью трехточечного изгибающего зажима термомеханического анализатора TMAQ400EM



были получены сравнительные характеристики ЭПТФ образцов полиуретанового композита и исходного полиуретана. Показано, что полиуретановый композит обладал коэффициентом фиксации промежуточной формы (R_{f1}) равным 59,8 %, R_{f2} конечной формы 95 %. Значение коэффициента восстановления промежуточной формы (R_{r1}) составило 98,8 %, восстановление исходной формы произошло с $R_{r2} = 97$ %. Рассчитанные значения R_{f1} , R_{f2} и R_{r2} для неармированного образца составили 61, 99 и 98 % соответственно. Кроме этого, наблюдалось плавное восстановление исходной формы уже на первой стадии нагрева. Значение восстановившейся изгибной деформации на 52 % превышает значение, соответствующее промежуточной форме.

Таким образом, показано, что процесс диффузионной адгезии, протекающий на границе раздела полимерного аппарата углеволокна и полиуретановой матрицы мог вызвать образование переходного слоя с повышенной плотностью упаковки. Увеличение жесткости сегментов, вовлеченных в диффузионный процесс, поспособствовало возникновению ЭПТФ полиуретанового композита с высокими показателями R_f и R_r .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90166.

Список литературы

1. Multilayered assembly of poly (vinylidene fluoride) and poly (methyl methacrylate) for achieving multi-shape memory effects / Xiaoying Ji, Dayong Chen, Yu Zheng [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2019. № 362. P. 190–198.
2. Thanh Duc Dao, NamSeo Goo, Woong Ryeol Yu Blocking force measurement of shape memory polymer composite hinges for space deployable structures // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2018. P. 1–12.



УДК 669.017.12:539.121.4

Я.А. Живая¹, Г.С. Патрин^{1,2}, А.В. Кобяков^{1,2}, В.И. Юшков^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

СТРУКТУРЫ CoNi/Si/FeNi/Si С ЭФФЕКТОМ СПИНОВОЙ ПРУЖИНЫ

Пленочные системы, состоящие из чередующихся слоев магнитомягкого и магнито жесткого материалов, являются подходящими объектами для использования в устройствах спиновой электроники. Ответственным за формирование магнитного состояния является межслоевое взаимодействие. На сегодняшний день проблема формирования магнитного состояния в многослойной системе ферромагнитный металл/полупроводник является актуальной.

Одним из интересных в плане практического применения является эффект обменного смещения [1]. Выяснение фундаментальной роли эффекта обменного смещения в спиновом клапане и туннельных устройствах привело к исследованию бинарных систем ферромагнетик – антиферромагнетик и вызвало бурный рост в данном направлении [2].

Считается, что обменное смещение возникает в слоистых и наноструктурных магнитных материалах, содержащих магнитомягкую ферромагнитную и высокоанизотропную антиферромагнитную фазу [1; 2]. Однако эффекты положительного и отрицательного обменного смещения обнаружены и в структурах с ферримагнитными слоями FeGd_{ferri}/FeSn_{ferro} или FeGd_{ferri}/FeTb_{ferri} [3], а также при замене антиферромагнитного слоя на магнитотвердый ферромагнитный слой. Многие свойства такой системы будут похожи на свойства ферромагнетик – антиферромагнетик системы.

В случае сопряжения магнитомягких и магнито жестких ферромагнитных слоев может возникнуть новое состояние, подобное магнитной пружине. Тогда процесс намагничивания включает в себя определенные стадии, а петля гистерезиса имеет характерную форму.

Ранее нами была получена трехслойная структура CoNi/Si/FeNi. Обнаружен эффект положительного обменного смещения. Межслоевое взаимодействие ферромагнетиков зависит от толщины полупроводникового слоя [4]. Исследования были продолжены с целью определения влияния полупроводникового слоя на влияние положительного обменного смещения и определения парциальных вкладов от сильномагнитных и магнитомягких слоев.

Методом ионно-плазменного распыления синтезированы пленки композиции CoNi/Si/FeNi/Si на стеклянную подложку при базовом давлении ~10⁻⁸ Торр. Содержание никеля в слое CoNi составляло 19,5 ат. %, а в слое FeNi было 84 ат. %. Толщина магнитотвердого слоя (CoNi) составляла $t_h \sim 25$ нм, а магнитомягкого слоя (FeNi) была $t_s \sim 25$ нм. Толщина промежуточного немагнитного полупроводникового слоя (Si) была переменной и менялась в диапазоне $t_{si} \sim 3-9$ нм. Толщины слоев контролировалась на электронном микроскопе JEOL JEM-2100 (при подготовке образца на установке Gatan PIPS). Измерения намагниченности проводились на установке MPMS-XL в диапазоне температур от гелиевой до комнатной.



Магнито жесткий и магнитомягкий слои сопрягаются через немагнитную прослойку кремния. Все исследованные пленки имеют двухступенчатую петлю гистерезиса. Также отмечалось увеличение коэрцитивной силы магнито жесткого и магнитомягкого слоев и увеличение площади под кривой в отрицательной области при уменьшении температуры.

Для пленок с той же толщиной кремния CoNi (53 nm) / Si (2 nm) / FeNi (72 nm) при больших толщинах магнитомягкого и магнито жесткого слоев прослеживается положительное смещение петель при температуре менее 100 К [4]. Теперь, эффект «положительного смещения» при меньших толщинах магнито жесткого и магнитомягкого слоев проявляется наоборот при T более 75 К. Здесь межслойное обменное взаимодействие через слой кремния играет важную роль. Осцилляции обменного смещения связаны с конкурирующим характером механизмов, определяющих эффект обменного смещения, либо с активационным механизмом, ответственным за формирование магнитного состояния.

Знак константы обменного взаимодействия будет определять направление смещения кривой намагничивания. Там, где оно отрицательное, в контуре намагничивания наблюдается положительное смещение. Там, где оно положительное, в контуре намагничивания наблюдается отрицательное смещение.

В заключение отметим основные результаты исследования.

- В системе магнито жесткий – магнитомягкий материал с полупроводниковой прослойкой создана структура с управляемым межслойным взаимодействием.
- Межслойное взаимодействие зависит от толщины полупроводниковой прослойки и соотношением доли магнитомягких и магнито жестких слоев.
- Обнаружен эффект положительного обменного смещения и отрицательного смещения.

Исследования проводятся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00161-а).

Список литературы

1. Meiklejohn W.H., Bean C.P. Phys. Rev. 1956. № 102. P. 1413.
2. Phys. Rep. / J. Nogués, J. Sort, V. Langlais [et al.]. 2005. № 422. P. 65.
3. J. Appl. Phys. / Canet F., Mangin S., Bellour C. [et al.]. 2001. № 89. P. 6916.
4. JETP Letters / G.S. Patrin, I.A. Turpanov, V.I. Yushkov [et al.]. 2019. Vol. 109, № 5. P. 324–329.

УДК 621.762.55-022.532

Г.М. Зеер, Е.Г. Зеленкова, Л.А. Скоробогатова

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ СПЕКАНИИ
НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ ЦИНКА И ОЛОВА**

Оксиды цинка и олова применяются в качестве дугогасящей и дисперсноупрочняющей добавки в электроконтактах на основе серебра и меди. В процессе спекания контактов происходит твердофазное взаимодействие, поэтому исследование фазообразования при спекании нанопорошков ZnO и SnO₂ является актуальной задачей.

Образцы получали методом порошковой металлургии по стандартной технологии: смешивание порошков, прессование в пресс-форме на гидравлическом прессе при давлении 200 МПа, спекание на воздухе в муфельной печи при температурах 860 и 1 200 °С. Смешивание нанопорошков проводили двумя способами: механическим и в вибромельнице Retch 400 с целью механоактивации шихты. Микроструктуру и элементный состав фаз исследовали методами ПЭМ и СЭМ, фазовый состав – методом РФА. Общий вид порошков и шихты после механического смешивания представлен на рис. 1.

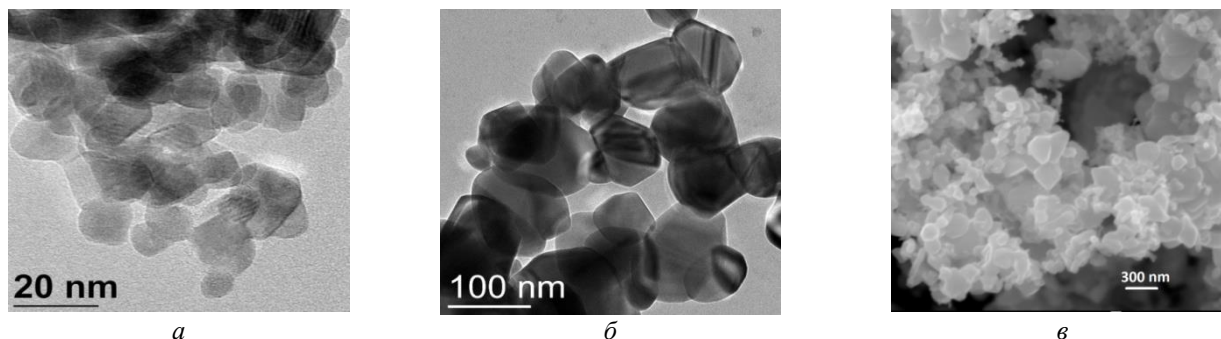


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения (ПЭМ) исходных порошков: *а* – ZnO (ПЭМ); *б* – SnO₂ (ПЭМ); *в* – шихта после механического смешивания (СЭМ)

В элементном составе точечных спектров обнаружены цинк, олово и кислород, что с в соответствии с диаграммой состояния свидетельствует об образовании ортостанната цинка Zn₂SnO₄. Результаты исследования микроструктуры спеченных образцов, элементного состава фаз, определенного микрорентгеноспектральным и рентгенофазовым методами анализа, показали, что образование ортостанната цинка происходит уже при температуре 860 °С как при механическом смешивании шихты (рис. 2, *а*), так и при смешивании с механоактивацией (рис. 2, *б*). Образование новой фазы в двух типах образцов происходит неравномерно. В компакте, шихта которого получена механическим смешиванием, спекание и образование ортостанната цинка прошло в большем объеме, чем в образце, спеченном из шихты, полученной механическим смешиванием с механоактивацией.

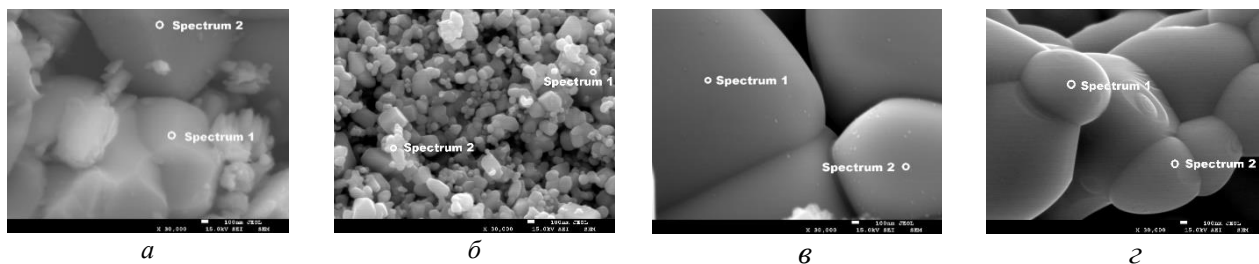


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения спеченных образцов (СЭМ, $\times 30\,000$) при:
a – механическое смешивание (860 °С); *б* – механическое смешивание с механоактивацией (860 °С);
в – механическое смешивание (1 200 °С); *г* – механическое смешивание с механоактивацией (1 200 °С)

Анализ элементного состава фаз образцов, спеченных при 1 200 °С, показал наличие ортостанната цинка в обоих типах образцов. Размер зерен образцов, полученных из шихты после механического смешивания, достигает $d_{\text{макс}} = 3$ мкм (рис. 2, *в*). Образцы, полученные из шихты с механоактивацией в процессе смешивания, после спекания имеют зерна меньших размеров – $d_{\text{макс}} = 1$ мкм (рис. 2, *г*). У образцов, спеченных при 1 200 °С, наблюдается спекание в полной форме.

В результате спекания керамики на основе оксидов цинка и олова получена новая фаза – ортостаннат цинка. Появление данной фазы зафиксировано при температуре 860 °С, что соответствует температуре спекания контактов на основе меди. Как исходные фазы, так и новообразованная при твердофазном спекании фаза Zn_2SnO_4 , являются дисперсноупрочняющими и дугогасящими компонентами, применяемыми в электроконтактных материалах.

УДК 539.422.001.24

А.С. Лобасов^{1,2}, А.А. Шебелева^{1,2}, А.В. Шебелев^{1,2}¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Москва, Россия

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Использование численных методов для разрешения мелких масштабов в процессе диспергирования жидкостей является крайне актуальной задачей. Верификация расчетов по экспериментам позволит отладить численную технологию и получать новые данные, недоступные в опытах. Важной задачей численного моделирования является определение морфологии капли, реагирующей на изменение распределения давления по поверхности при перестройке поля обтекания тела с изменяющейся формой. Для разрешения межфазной границы использовалась численная методика основанная на VOF-методе [1]. Для моделирования поверхностного натяжения в рамках VOF-метода используется CSF [2] алгоритм. Для моделирования турбулентности применялась LES модель [3], согласно которой для описания турбулентных течений необходимо решение отфильтрованных уравнений Навье – Стокса и технологии адаптированных динамических сеток. Методика расчета и основные особенности численных исследований описаны в [4].

С помощью описанной методики проведено моделирование разрушения капли воды в потоке за ударной волной для числа Вебера $We = 2\ 260$. Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами $3 \times 3 \times 5$ см. На одной из граней параллелепипеда задавалось условие входа с фиксированным значением скорости, на остальных гранях ставились условия свободного выхода. В начальный момент времени на расстоянии 5 мм от входа в расчетную область помещалась сферическая капля воды, на которую воздействует проходящая УВ, генерирующая воздушный поток. Коэффициент поверхностного натяжения принимался равным $\sigma = 0,073$ Н/м.

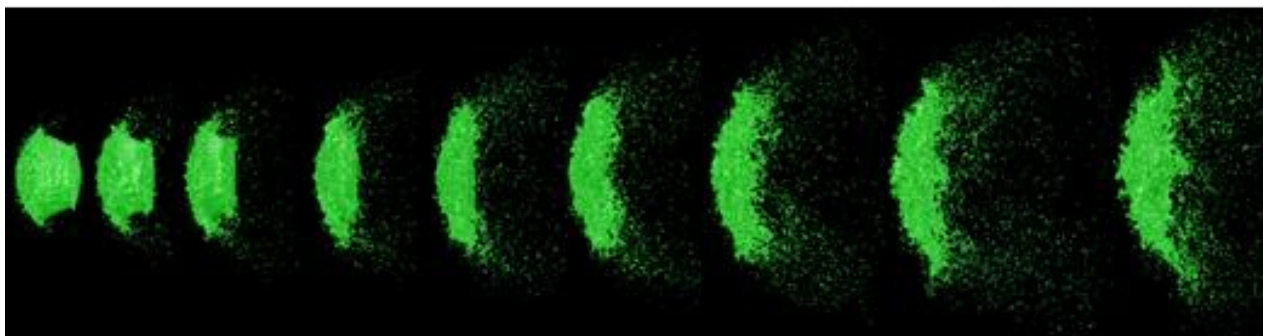


Рисунок. Динамика развития разрушения капли воды при взаимодействии УВ для $We = 2260$



На рисунке представлена динамика разрушения капли воды $d = 2,79$ мм при взаимодействии на нее УВ. Скорость газового потока за фронтом ударной волной 170 м/с, при числе Маха ударной волны $Ms = 1,34$. Начало массоуноса приходится на интервал между кадрами 5 и 6, т.е. период индукции равен 135 мкс.

Выполнено численное моделирование взаимодействия капли воды с потоком за проходящей ударной волной при числе Маха ударной волны 1,34. Получены данные по динамике ее деформации и времени индукции массоуноса. Исследована структура потока вблизи и в следе капли на различных этапах ее деформации, установлены особенности обтекания определяющие характерный тип эволюции формы капли.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00565.

Список литературы

1. Hirt C.W, Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of computational physics. 1981. № 39. P. 201–226.
2. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. Continuum method for modeling surface tension // J. Comput. Phys. 1992. Vol. 100. P. 335– 54.
3. Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment // Month. Wea. Rev. 1963. Vol. 91. P. 99–164.
4. Deformation of a Droplet of an Organic Water-Coal Fuel in a Gas Flow / A.V. Minakov, A.A. Shebeleva, M.Yu. Chernetskii, P.A. Strizhak // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. July 2018. Vol. 59, is. 4. P. 653–661.

УДК 621.311.21:62-135

Д.В. Платонов^{1,2}, Д.А. Дектерев^{1,2}, А.С. Лобасов²¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РОТОРОВ ДЛЯ СВОБОДОПОТОЧНЫХ МИНИ-ГЭС

Малая гидроэнергетика является перспективным направлением для электрификации отдельно расположенных населённых пунктов, мест добычи полезных ископаемых, экспедиционных лагерей и т.д.

Использование мини-ГЭС является широко развивающимся направлением энергетики за рубежом, однако в нашей стране спрос на мини-ГЭС не так велик, и в первую очередь это связано с невысокими КПД микро-гидравлических турбин. Наиболее часто в реализации свободопоточных мини-ГЭС используются ортогональные лопастные роторы, частично погружаемые в реку. Угол атаки лопастей ортогональных роторов фиксирован, и это в значительной мере ограничивает их эффективность. Схожую геометрию имеют крыльчатые винты судов и циклоидальные пропеллеры летательных аппаратов (цикложиров), использующие механизмы поворота лопастей, для создания управляемого вектора тяги. Подобные механизмы были опробованы группой южнокорейских ученых в ветровой энергогенерирующей установке, по результатам исследований КПД установки повысилось на 70 %.

Другим сравнительно новым направлением в малой энергетике является использование винтов Архимеда (шнека) в роли ротора гидротурбины. За рубежом микро-ГЭС на их принципе устанавливаются на обводных каналах и небольших реках, русло которых частично или полностью пропускается через шнек. Возможность использования шнековых роторов в свободопоточных наплавных микро-ГЭС описывается в единичных статьях и остается практически неизученной.

В данной работе представлено расчётно-экспериментальное исследование шнековых роторов. При помощи PIV-методики проведено экспериментальное исследование роторов различной геометрии и различных режимов их работы. Исследуемые роторы и экспериментальный стенд приведен на рис. 1.

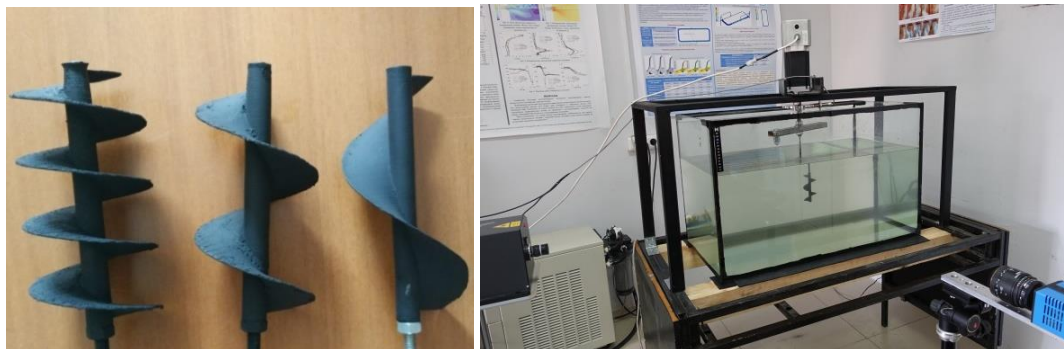


Рис. 1. Исследуемые варианты роторов и экспериментального стенда

Также для исследуемых образцов проведено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent. Выполнено сравнение полученных результатов (рис. 2).

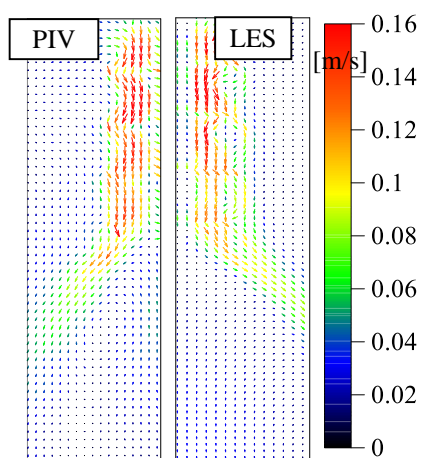


Рис. 2. Сравнение полученного векторного поля скорости в центральном продольном сечении (частота вращения 5 Гц)

При помощи численного моделирование проведено исследование зависимости энергетических характеристик роторов от геометрии и режимов их работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 18-48-242007 р_мк.



УДК 622.272.6:553.3'3/(571.52)

В.А. Жигарев¹, А.В. Минаков^{1,2}, А.Л. Неверов¹, А.В. Матвеев¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СООРУЖЕНИЯ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КЫЗЫЛ-ТАШТЫГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Отечественный и зарубежный опыт [1; 2] свидетельствует, что наиболее эффективными техническими средствами для бурения геологоразведочных и параметрических скважин предельно малого диаметра (не более 96 мм) являются комплексы со съёмными керноприёмными трубами (СКК), применение которых позволяет получать керн и снижать металлоёмкость скважин.

В нашей стране и за рубежом комплексы СКК разрабатывались для реализации технологии бурения алмазным породоразрушающим инструментом [3–6], поэтому большое внимание уделялось качеству бурильных труб и алмазных коронок. Наружный диаметр бурильных труб у КССК-76 равен 70 мм, а наружный диаметр коронки – 76 мм, следовательно, кольцевой зазор составляет 3 мм. При таких соотношениях диаметров труб и коронок реализованы высокоскоростные технологии бурения скважин. В качестве промывочных жидкостей для бурения СКК используют низковязкие жидкости или техническую воду со смазывающими добавками. Бурение скважин в сложных горно-геологических условиях комплексами СКК и КССК невозможно без применения высоковязких структурированных промывочных жидкостей

К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных повышению качества буровых растворов. Однако проблемы нарушения устойчивости стенок скважины в результате наступления предельного состояния в породах приствольной зоны не преодолены. Особенно остро проблема устойчивости ощущается на Кызыл-Таштыгском месторождении.

В данной работе представлены результаты исследования взаимодействия бурового раствора с образцами кернового материала. Проведены исследования реологических параметров разработанных буровых растворов. Получены зависимости реологических параметров от концентрации компонентов бурового раствора. Приведены результаты исследования взаимодействия воды и кернового материала, показано что при взаимодействии воды и кернового материала происходит нарушении целостности образца. При взаимодействии образца керна с разработанными буровыми растворами разрушение не происходит. В дальнейшем планируется провести исследования по прокачиванию разработанных буровых растворов в кольцевых каналах с различным соотношением диаметров труб и эксцентриситета. Полученные результаты будут использованы для тестирования расчетной методики течения буровых растворов в кольцевых каналах.



Список литературы

1. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спирин В.И. Алмазный породоразрушающий инструмент. Тула: ИПП «Гриф и К», 2005. 288 с.
2. Будюков Ю.Е. Создание и производство специального алмазного бурового инструмента: обзор. М.: МГП «Геоинформмарк», 1993. 40 с.
3. Григорьев В.В. Бурение со съемными керноприемниками. М.: Недра, 1986. 195 с.
4. Исаев М.Л., Онищенко В.П. Бурение скважин со съемными керноприемниками. Л.: Недра, 1975. 128 с.
5. Афанасьев И.С., Горбушин А.П., Лебедев В.И. Опыт скоростного геологоразведочного бурения. Л.: Недра, 1986. 96 с.
6. Кравцов Б.Ф. Исследование, разработка и внедрение технологии алмазного бурения скважин на твердые полезные ископаемые. М.: ВПО «Союзгеотехника», 1984. 116 с.

УДК 547.216-043.93.001.573

А.А. Шебелева^{1,2}, А.В. Шебелев^{1,2}, А.В. Минаков^{1,2}¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПАДА ОТДЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬ ГЕКСАНА В ГРАДИЕНТНЫХ ПОТОКАХ

В настоящее время отсутствуют теоретические модели, позволяющие адекватно описать процессы деформации и дробления капель. Практически все имеющиеся представления о параметрах, определяющих процесс дробления капель, получены экспериментальным путем. Использование численных методов для разрешения мелких масштабов в процессе диспергирования жидкостей позволит получить новые данные о времени индукции разрушения, а также изучить морфологию капли. Для разрешения межфазной границы использовалась численная методика, основанная на VOF-методе [1]. Для моделирования поверхностного натяжения используется CSF [2] алгоритм. Для моделирования турбулентности использовалась LES модель [3]. Методика расчета и основные особенности численных исследований описаны в [4].

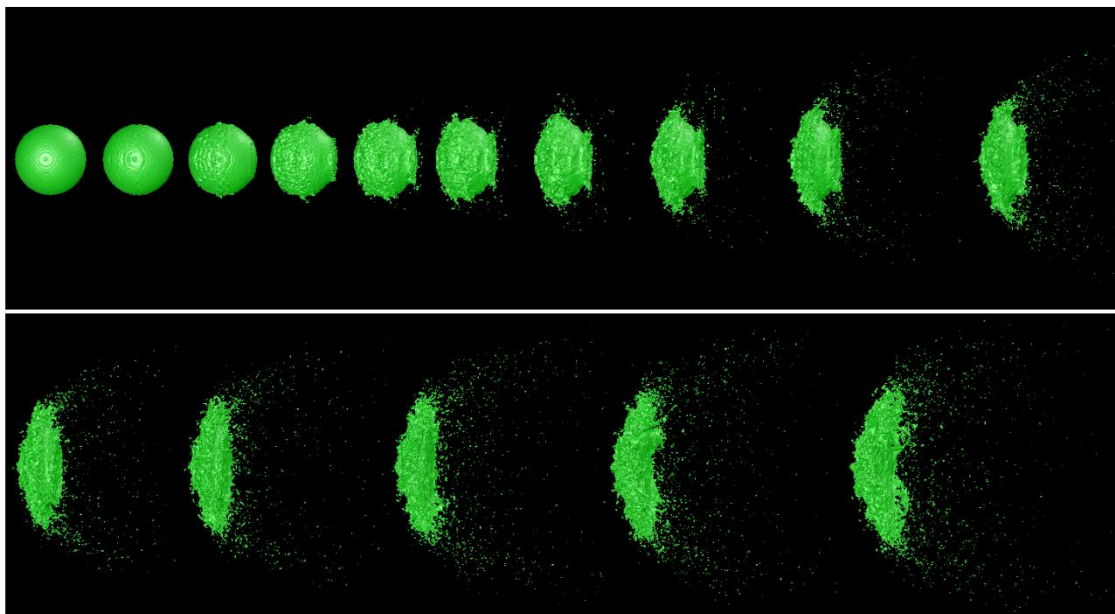


Рис. 1. Динамика развития разрушения капли гексана при взаимодействии УВ для $We = 3000$

В настоящей работе проведено исследование динамики распада капли гексана в потоке за ударной волной при числе Вебера $We = 3000$. Для этого была построена расчетная область размерами $3 \times 3 \times 5$ см. На одной из граней задавалось условие входа с фиксированным значе-



нием скорости, на остальных гранях задавались условия свободного выхода. В начальный момент времени на расстоянии 5 мм от входа в расчетную область помещалась сферическая капля гексана, на которую воздействует проходящая УВ, генерирующая воздушный поток. На рисунке 1 представлена динамика разрушения капли гексана $d = 2,32$ мм при взаимодействии на нее УВ. Скорость газового потока за фронтом ударной волной 110,5 м/с, при числе Маха ударной волны $Ms = 1,208$. Разрушение капли начинается через 120 мкс (5 кадр), и максимальная деформация к моменту начала разрушения достигает величины $d_{\max} / d_0 = 1,4$. Разрушение происходит за счет срыва жидкости с поверхности капли по различным механизмам. Имеет место срыв микрокапель с гребней волн, образующихся на наветренной поверхности, капли в результате развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца.

Выполнено численное моделирование взаимодействия капли гексана с потоком за проходящей ударной волной. Получены данные по динамике ее деформации и времени индукции массоуноса. Исследована структура потока вблизи и в следе капли на различных этапах ее деформации, установлены особенности обтекания определяющие характерный тип эволюции формы капли.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00565.

Список литературы

1. Hirt C.W, Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of computational physics. 1981. № 39. P. 201–226.
2. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. Continuum method for modeling surface tension // J. Comput. Phys. 1992. Vol. 100. P. 335– 54.
3. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The Basic Experiment // Month. Wea. Rev. 1963. Vol. 91. P. 99–164.
4. Deformation of a Droplet of an Organic Water-Coal Fuel in a Gas Flow / A.V. Minakov, A.A. Shebeleva, M.Yu. Chernetskii, P.A. Strizhak // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. July 2018. Vol. 59, is. 4. P. 653–661.



УДК 622.243.14.001.24

**В.А. Жигарев¹, А.В. Минаков^{1,2},
А.Л. Неверов¹, М.И. Пряжников¹, А.В. Матвеев¹**

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСА ШЛАМА

Важнейшее условие повышения технико-экономических показателей бурения – совершенствование буровых растворов. В современных условиях задача управления качеством буровых растворов состоит в том, чтобы в сочетании с горно-геологическими условиями и гидравлической программой бурения поддерживать их требуемые структурно-реологические и фильтрационные свойства при минимальном содержании твердой фазы и заданном уровне ингибирования.

Реологические свойства буровых растворов оказывают значительное влияние на вынос выбуренной породы на поверхность, создание перепада давления в скважине. Перепад давления, в свою очередь, определяет возможность возникновения осложнений в процессе строительства скважин: проявление или поглощение бурового раствора, гидроразрыв горных пород, а также загрязнение нефтегазосодержащего пласта, поэтому возникает задача управления реологическими характеристиками буровых растворов в скважине. Эта задача решается путем химической обработки буровых растворов различными полимерами. Одной из задач исследования было изучения влияния примесей шлама на перепад давления в стволе скважины и прогнозирование влияния различного содержания шлама на параметры течения.

Для эффективного выполнения своих функций в конкретных геолого-технических условиях бурения скважин буровой раствор должен иметь строго определенные значения показателей свойств или, иными словами, удовлетворять соответствующему данным условиям регламенту на показатели свойств. Одной из таких функций является эффективный вынос частиц выбуренной породы (шлама) из ствола скважины [1].

Выбуренные частицы, образующие в результате работы долота, должны удаляться из скважины. Для этого буровой раствор прокачивают по буровой колонне, через долото; при этом выбуренная порода улавливается и выносится вверх по кольцевому пространству на поверхность. Эффективность выноса выбуренного шлама (очистки ствола) зависит от размера, формы и плотности твердых частиц, скорости проходки, вращения бурильной колонны, а также от вязкости, плотности и скорости восходящего потока бурового раствора в кольцевом пространстве.

Анализ исследовательских работ и практический опыт авторов показывает, что наиболее полно требованиям бурения удовлетворяют полимерные растворы [2]. Такие растворы эффективно очищают скважину и охлаждают буровой инструмент, снижают гидравлические сопротивления, не диспергируют горные породы.



Целью данной работы было расчетное исследование транспорта частиц выбуренной породы (шлама) буровыми растворами в горизонтально направленных скважинах. Для реализации данной цели был решен ряд задач, таких как численное моделирование течения данных растворов в кольцевых каналах на основе геометрии реальной скважины.

Проведено численное моделирование транспорта шлам в горизонтально направленной скважине. Проведено исследование зависимости выноса шлама от расхода бурового раствора. Показано что влияние расхода бурового раствора оказывает сильное влияние на распределение шлама по длине канала. Показано что при малых расходах бурового раствора эффективность выноса частиц шлама низкая. В дальнейшем планируется провести исследование для оценки влияния эффективности выноса шлама в зависимости от скорости вращения буровой трубы и от реологических показателей бурового раствора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «18-41-240001 Расчетно-экспериментальное исследование транспорта шлама в кольцевых каналах».

Список литературы

1. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей) М.: Недра, 1985. 509 с.
2. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / И.С. Афанасьев, Г.А. Блинов, Н.Н. Бухарев [и др.]. СПб.: Недра, 2000. 712 с.

УДК 532.529.2.001.573

В.В. Бутько¹, А.В. Шебелев^{1,2}, А.А. Шебелева^{1,2}¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Москва, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА С О-ОБРАЗНЫМ РАЗВЕТВЛЕНИЕМ

Проведено расчетное исследование эффективности смешения жидкостей в микромиксерах сложной геометрической формы с различным количеством базовых элементов (БЭ): 2 БЭ, 4 БЭ, 6 БЭ. Геометрия микромиксера с 2 БЭ состоит из входных каналов сечением $200 \times 200 \times 3$ 400 мкм и канала смешения $200 \times 400 \times 5$ 100 мкм. В качестве жидкости используется вода, которая подается с одинаковым расходом через верхний и нижний входные каналы навстречу друг другу. Расчет проводился в широком диапазоне чисел Рейнольдса $1 \leq Re \leq 300$.

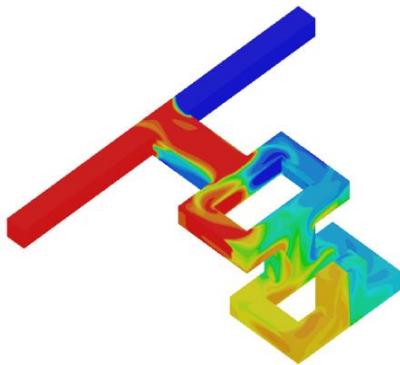


Рис. 1. Распределение концентрации по каналу при $Re = 160$ для микромиксера с 2 БЭ

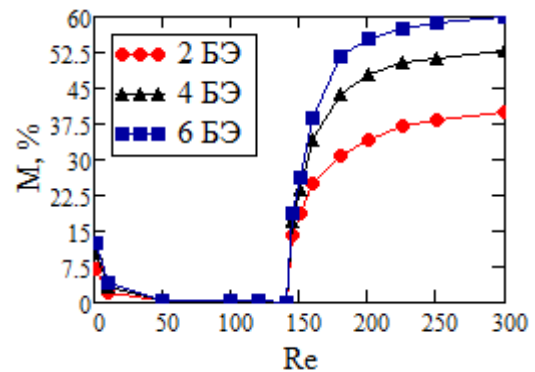


Рис. 2. Зависимость эффективности смешения от числа Re

Выявлено, что при $Re = 50$ эффективность смешения для 6 БЭ в 1,26 раз больше, чем для 4 БЭ, и в 1,74 раз больше, чем для 2 БЭ; для $Re = 180$ эффективность смешения для 6 БЭ в 1,18 раз больше, чем для 4 БЭ, и в 1,68 раз больше, чем для 2 БЭ. В результате проведенных расчетов было установлено, что использование любого количества БЭ приводит к увеличению эффективности смешения и перепаду давлений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-48-243011: «Расчетное исследование способов повышения эффективности микрофлюидных реакторов».



УДК 53.072.4-022.532:532.529.2

Д.В. Гузей

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НАНОСУСПЕНЗИЙ

В работе представлены результаты экспериментального исследования вынужденной конвекции наножидкостей в ламинарном и турбулентном режимах течения, при постоянной плотности теплового потока на стенке канала. Экспериментальная установка подробно описана в [1].

В экспериментах средний размер частиц варьировался от 10 до 150 нм; объёмная концентрация наночастиц в экспериментах – в диапазоне от 0,5 до 6 %. Число Рейнольдса имело значения от 400 до 8 000. В результате экспериментов измерены средние и локальные величины коэффициента теплоотдачи на стенках канала и величина перепада давления на входе и выходе из канала. В качестве базовых жидкостей были использованы дистиллированная вода и этиленгликоль.

Установлено, что коэффициент теплоотдачи наножидкости в ламинарном режиме возрастает при увеличении концентрации частиц. С уменьшением концентрации наночастиц величина коэффициента теплоотдачи монотонно стремится к значению, соответствующему чистой базовой жидкости.

Показана зависимость коэффициента теплоотдачи наножидкости в ламинарном режиме от размера частиц. С ростом размера частиц происходит увеличение коэффициента теплоотдачи. Такое поведение объясняется тем, что коэффициент теплоотдачи при ламинарной вынужденной конвекции пропорционален коэффициенту теплопроводности теплоносителя. В наножидкости с ростом размера частиц происходит увеличение коэффициента теплопроводности.

Установлена зависимость наблюдаемой интенсификации теплообмена от свойств базовой жидкости, для одних и тех же наночастиц и при одинаковых объёмных концентрациях интенсификация теплообмена для наножидкостей, приготовленных на основе базовой жидкости с меньшим коэффициентом теплопроводности, интенсификация теплообмена будет больше, чем для базовой жидкости с большим коэффициентом теплопроводности.

В результате работы было показано, что добавление наночастиц в теплоноситель оказывает существенное влияние на величину коэффициента теплоотдачи в турбулентном режиме течения. Принципиальное отличие поведения коэффициента теплоотдачи наножидкостей в ламинарном и турбулентном режимах течения заключается в том, что с увеличением концентрации наночастиц локальный и средний коэффициенты теплоотдачи при фиксированном значении числа Рейнольдса возрастают, а при фиксированном значении расхода теплоносителя в турбулентном режиме течения может иметь место снижение коэффициента теплоотдачи с ростом концентрации частиц. В ламинар-



ном режиме течение интенсификация наблюдается как при фиксированном расходе, так и при фиксированном числе Рейнольдса.

Систематически исследована зависимость коэффициент теплоотдачи и перепад давления от размера наночастиц в турбулентном режиме течения. Установлено, что при фиксированном расходе с увеличением размера наночастиц коэффициент теплоотдачи повышается. При фиксированном числе Рейнольдса показано, что зависимость коэффициента теплоотдачи от размера частиц имеет экстремум. Величина перепада давления снижается с увеличением размера частиц.

Установлено, что начальная температура наножидкости является ещё одним фактором, имеющим существенное влияние на турбулентный теплообмен наножидкостей. С практической точки зрения выгодно иметь максимально высокую входную температуру.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Разработка технологии интенсификации теплообмена с помощью наносuspензий в теплообменных аппаратах».

Список литературы

1. Guzei D.V., Minakov A.V., Rudyak V.Ya. On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 139. P. 180–192.



УДК 53.08:534.614

Б.Б. Дамдинов^{1,2}, М.Д. Богоманшин²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова, Улан-Удэ, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Физическая акустика, бурно развивающаяся в последние годы, является мощным инструментом для исследования различных сред: газообразных, жидких и твердых. Она позволила изучить и применить ряд акустических возможностей для такого типа технических применений, как дефектоскопия различных материалов и изделий, медицинская диагностика, получение информации о микро или макроструктуре различных тел, изготовление акустических электронных приборов для накопления и переработки информации. Скорость звука, соответственно модуль упругости, являются важной структурной характеристикой материала, поэтому попытка понять аспекты структуры жидкости – фундаментальная задача. Целью настоящей работы явилась разработка и создание экспериментальной установки по измерению скорости звука в ряде жидкостей. Показано, что измеренные скорости звука близки к табличным значениям. Была измерена скорость звука в воздухе, дистиллированной воде и N-метилпиралидоне. Показано, что скорость звука увеличивается с ростом частоты. Также обнаружена зависимость скорости звука от электрического напряжения. Выбор данной жидкости обусловлен перспективами проведения исследований растворов известного сегнетоэлектрика ПВДФ в данном растворителе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант 18-02-00523а.



УДК 622.276.5.001.24

А.В. Минаков^{1,2}, М.И. Пряжников¹, А.С. Лобасов¹, В.Я. Рудяк¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ НАНОЖИДКОСТЬЮ

Эффективность извлечения нефти из нефтеносных пластов современными промышленно освоенными методами разработки во всех нефтедобывающих странах на сегодняшний день считается неудовлетворительной, при том что потребление нефтепродуктов во всем мире растет из года в год. Средняя конечная нефтеотдача пластов по различным странам и регионам составляет от 25 до 40 % [1]. Остаточные или неизвлекаемые промышленно освоенными методами разработки запасы нефти достигают в среднем 55–75 % от первоначальных геологических запасов нефти в недрах. Традиционно для повышения коэффициента нефтеотдачи (КИН) используют водные растворы разнообразных ПАВ. В последние годы, появились работы, в которых показано, что использование наносuspензий позволяет существенно повысить коэффициент извлечения нефти из пласта [2]. С точки зрения снижения межфазного натяжения на границе с нефтью и уменьшения контактного угла смачивания наносuspензии обладают примерно одинаковыми характеристиками.

В данной работе проведено расчетное исследование процесса вытеснения нефти из пористой породы с помощью наножидкости. Для описания этого процесса использовалась модель течения двух несмешивающихся жидкостей с учетом сил поверхностного натяжения и краевого угла смачивания. Для моделирования процесса вытеснения нефти наножидкостью использовалась численная методика, основанная на методе жидкости в ячейках, которая хорошо зарекомендовала себя для расчета макроскопических течений со свободной поверхностью (Brackbill, Kothe & Zemach, 1992; Hirt C.W., 1981).

В качестве наножидкости бралась наносuspензия с частицами оксида алюминия размером 43 нм. Концентрация наночастиц варьировалась от 0 до 1 мас. %. Для моделирования использованы экспериментальные данные по вязкости, межфазному натяжению на границе нефть/наножидкость и краевому углу смачивания на границе нефть/наножидкость/горная порода.

Сначала проведено исследование влияния концентрации наножидкости на эффективность вытеснения нефти. Анализ результатов моделирования показал, что добавка наночастиц в вытесняющую жидкость значительно влияет на процесс вытеснения нефти из пористой породы. В случае чистой воды или наножидкости с малой концентрацией наночастиц вытесняющая жидкость продвигается по насыщенной нефтью породе в виде отдельных ручейков или струек (рисунок). При этом большая часть объема пористой среды остается заполненной нефтью. Так, для рассматриваемого случая вода вытеснила примерно около 30 % нефти из возможной. Дальнейшая промывка такой породы не приносит результата. Суще-

ственно по другому происходит процесс вытеснения нефти наножидкостью. Движение наножидкости при высоких концентрациях наночастиц происходит не отдельными струйками, а фактически однородным фронтом по всему объему расчетной области, в результате чего гораздо больший объем пористой среды оказывается охваченным движением вытесняющей жидкости. И, соответственно, существенно большее количество нефти вымывается из породы. Так, в результате моделирования было показано, что 1 мас. % концентрация наночастиц оксида алюминия размером 43 нм позволяет повысить КИН примерно в 2,15 раза по сравнению с водой.

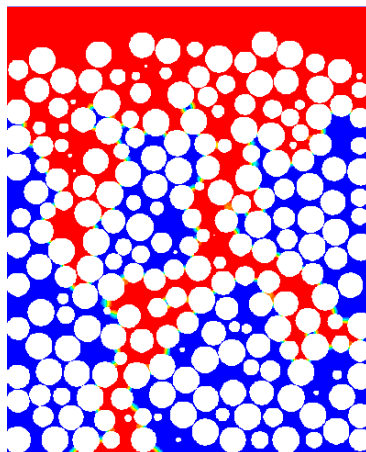


Рисунок. Вытеснение нефти из пористой среды

В результате анализа всех полученных данных было установлено, что основной причиной увеличения КИН при вытеснении нефти наножидкостью является улучшение смачивания горной породы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-79-20218.

Список литературы

1. Шелепов В.В. Состояние сырьевой базы нефтяной промышленности России // Повышение нефтеотдачи пластов. 2008. № 4. С. 43–67.
2. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner with injection of a superheated steam jet / S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, M.S. Vigrayanov [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2016. № 52 (3). P. 286–293.



УДК 622.24:536.24

А.В. Минаков^{1,2}, М.И. Пряжников¹, Д.В. Гузей¹, Е.И. Михиенкова¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ММП

Главным фактором, который определяет условия бурения нефтяных и газовых скважин в северных широтах, считается наличие в этих широтах многолетнемерзлых горных пород (ММП). Многолетнемерзлые горные породы – это породы, которые постоянно находятся в условиях отрицательных температур. Огромное количество проблем возникает при освоении нефтегазоконденсатных месторождений в зоне вечной мерзлоты. Строительство и эксплуатация нефтегазоносных объектов в условиях вечной мерзлоты осложняется проблемой частичного или полного оттаивания грунтов вблизи объектов, являющихся источником тепла. При строительстве и эксплуатации скважин происходит активное оттаивание окружающих пород, в результате чего образуются просадки, обвалы, пустоты, которые могут способствовать ряду негативных факторов и даже аварий в процессе бурения и эксплуатации скважин. Это приводит к долгосрочным ремонтам, простаиванию скважины и значимым потерям буровых жидкостей.

В данной работе разработана математическая модель сопряженного теплообмена скважины с учетом фазовых переходов и циркуляции бурового раствора в процессе бурения. Математическая модель учитывает реальные свойства бурового раствора (вязкость, теплопроводность, реология), фактические параметры процесса бурения (расход раствора и скорость вращения бурильной трубы) и легко адаптируется геометрии скважины.

С помощью разработанной математической модели проведено исследование применения полимерных растворов на основе смеси «этиленгликоль – вода» для бурения ММП. В расчетах были использованы данные лабораторных исследований свойств буровых растворов с этиленгликолем. Массовая концентрация этиленгликоля варьировалась от 0 до 80 %. Были измерены реологические и теплофизические характеристики рассмотренных растворов. Показано, что введение этиленгликоля приводит к значительному снижению коэффициента теплопроводности и теплоемкости раствора без существенного ухудшения реологических характеристик.

В результате численного моделирования установлено, что добавление этиленгликоля при заданном расходе бурового раствора приводит к уширению (выполаживанию) формы профиля скорости, что благоприятно сказывается на эффективности выноса шлама при бурении. При этом было показано, что добавка этиленгликоля слабо влияет на величину перепада давления в скважине. При концентрации этиленгликоля 80 масс. % перепад давления повышается примерно на 30 % по сравнению с базовым раствором.



Было установлено, что при увеличении содержания этиленгликоля в буровом растворе коэффициент теплоотдачи от раствора к стенке скважины существенно снижается. При концентрации этиленгликоля 80 масс. % снижение составило практически в два раза по сравнению с базовым раствором. При этом с увеличением содержания этиленгликоля происходит существенное снижение количества поступающего в скважину тепла.

Снижение коэффициента теплоотдачи и количества тепла, поступающего в скважину при добавлении в буровой раствор этиленгликоля, совокупно приводит к значительному замедлению скорости процесса растепления ММП. Анализ результатов моделирования показал, что при увеличении содержания этиленгликоля происходит монотонное снижение объема и среднего радиуса области растепленной вокруг скважины породы. При этом наиболее сильное снижение наблюдается в первые сутки с начала циркуляции. Было установлено, что добавка 80 масс. % этиленгликоля приводит к снижению объема растепленной породы примерно в 3 раза, а радиуса растепления в 1,7 раза при условии, что бурение участка с ММП проводилось в течение суток. Если циркуляция бурового раствора осуществлялась дольше, то эффект от добавки этиленгликоля снижается, но все равно остается довольно существенным.

Таким образом, с помощью численного моделирования была обоснована возможность существенно уменьшить тепловое воздействие на ММП при их бурении с помощью растворов с добавкой этиленгликоля. Установлены основные закономерности сопряженных теплогидравлических процессов при бурении ММП с учетом циркуляции раствора и расщепления. Получены в работе данные будут полезны при разработке буровых растворов для бурения в условия ММП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и предприятия Красноярского края в рамках научного проекта № 18-48-242009.

Список литературы

1. Зверев Г.В., Тарасов А.Ю. Расчет и анализ воздействия многолетнемерзлых пород на крепление скважины № 338 Ванкорского месторождения в период эксплуатации // Вестн. ПНИПУ. 2013. № 8. С. 41–51
2. Горелик Я.Б., Солдатов П.В. О нарушении продольной устойчивости крепи эксплуатационных скважин при сохранении боковой опоры на оттаивающие мерзлые породы // Криосфера Земли. 2016. № 4. С. 93–104.



УДК 622.24.06:620.22-022.532

Е.И. Михиенкова¹, А.В. Минаков^{1,2}, С.В. Лысаков¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ НАНОЧАСТИЦ НА СВОЙСТВА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Работа содержит комплексное и систематическое исследование влияния добавок наночастиц различного размера, концентрации и материала на свойства буровых растворов на водной основе. Наночастицы в силу своих малых размеров имеют ряд необычных свойств, которые отсутствуют у макроскопических дисперсных частиц. Необычные свойства наночастиц делают нестандартными и свойства наножидкостей, в которых они являются составной частью. Современные буровые растворы имеют много различных свойств, на которые в той или иной степени могут влиять добавки наночастиц. Наножидкости стали использоваться для управления реологическими свойствами и контроля процесса фильтрации бурового раствора, для снижения коэффициента трения буровой трубы и стенок скважины и предотвращения таких явлений, как прихват бурильной колонны. При этом, несмотря на некоторые имеющиеся разногласия, большинство исследователей сходятся во мнении, что наночастицы оказывают гораздо более сильное влияние на свойства буровых растворов, чем микроскопические частицы. Это влияние проявляется при очень низких концентрациях и зависит от размера и материала наночастиц. Это дает возможность управлять свойствами буровых растворов. Поэтому изучение свойств буровых растворов с наночастицами является очень перспективным с практической точки зрения. Тема научно-квалификационного исследования представляется очень интересной и актуальной.

В работе проведено исследование влияния добавок наночастиц различного размера и состава на реологию, фильтрацию, смазывающую способность и эффективность выноса шлама буровых растворов на водной основе. Получены результаты экспериментальных исследований реологических свойств суспензий глинистых частиц с добавками наночастиц оксидов кремния, алюминия и титана. Установлены зависимости эффективной вязкости и реологических параметров этих растворов от концентрации, размера и материала наночастиц. Важной особенностью влияния добавок наночастиц на эффективную вязкость является то, что это влияние начинается с очень малых концентраций.

Исследование влияния фильтрационных потерь буровых растворов на водной основе показало, что добавление наночастиц в буровой раствор значительно снижает фильтрационные потери даже при малых концентрациях. Показано, что фильтрационные потери уменьшаются с увеличением концентрации наночастиц и уменьшением их размера.

Исследования смазывающей способности бурового раствора с наночастицами не выявило существенного влияния добавки наночастиц на смазывающую способность. Максимальное снижение момента сил трения составило около 13 %. Измерения показали, что значительное



влияние наночастицы оказывают на коэффициент трения фильтрационных корок буровых растворов и их прихватывающую способность.

Проведено исследование влияние добавок наночастиц различного состава и размера на реологию, потери давления и эффективность выноса шлама из вертикальной скважины при ламинарном режиме.

Поскольку, в отличие от суспензий с макро- и микроскопическими размерами частиц, реологические параметры наносуспензий, величина фильтрационных потерь, смазывающая и прихватывающая способность, перепад давления и эффективность выноса шлама зависят от размеров и материала наночастиц и изменяются значительно уже при небольших их концентрациях, это открывает широкую перспективу применения наночастиц для управления характеристиками буровых растворов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-79-20218.