

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Инженерная школа новых производственных технологий  
Российский фонд фундаментальных исследований

---

# **ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

## **ВТСНТ-2018**

Сборник научных трудов  
VII Международной научно-технической конференции  
молодых ученых, аспирантов и студентов

**26–30 ноября 2018 г.**

Томск 2018

УДК 62.001.5(063)

ББК 30+72л0

В32

**Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2018) :**  
В32 сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / под ред. А.Н. Яковлева ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 236 с.

ISBN 978-5-4387-0840-7

В сборнике представлены материалы по следующим направлениям исследований: химические технологии и биотехнологии; рациональное использование природного и техногенного минерального сырья и водных ресурсов; фотонные технологии и световая инженерия; проблемы надежности машиностроения и машиностроительные технологии. Целью конференции ВТСНТ-2018 является развитие кооперации российских и зарубежных молодых ученых и студентов в проведении научных исследований в области современных высоких технологий.

Сборник представляет интерес для молодых ученых – физиков и химиков, интересующихся проблемами материаловедения, новых материалов и рационального использования природного сырья.

**УДК 62.001.5(063)**

**ББК 30+72л0**

***Редакционная коллегия***

А.Н. Яковлев, кандидат физико-математических наук;

В.М. Лисицын, доктор физико-математических наук;

Т.А. Хабас, доктор технических наук;

Т.С. Петровская, доктор технических наук;

Е.А. Ефременков, кандидат технических наук.

*Редакционная коллегия предупреждает, что за содержание  
представленной информации  
ответственность несут авторы докладов*

***Мероприятие проведено при поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований, грант РФФИ № 18-38-10056 мол\_г***

ISBN 978-5-4387-0840-7

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## СЕКЦИЯ 1

### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ

<b>АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ РЕАКЦИОННОГО И ДИФФУЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ ПОРИСТОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА С ДОБАВКАМИ СО И NI</b> <i>Н.В. АРТЮХОВА, М.И. КАФТАРАНОВА, А.С. ГАРИН, С.Г. АНИКЕЕВ, В.Э. ГЮНТЕР</i> .....	13
<b>ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ ПОЛИЭФИРЫ</b> <i>Л.Х. АФАШАГОВА, Т.И. БИДОВ, Р.Ч. БАЖЕВА, А.М. ХАРАЕВ</i> .....	15
<b>СОПОЛИАРИЛЕНЭФИРКЕТОНЫ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ БИСФЕНОЛОВ</b> <i>К.С. БЕЖДУГОВА, Л.Х. АФАШАГОВА, Р.Ч. БАЖЕВА, З.И. ИНАРКИЕВА</i> .....	17
<b>СИНТЕЗ ИМИДАЗОЛИЛ-СОДЕРЖАЩИХ ИОДОНИЕВЫХ СОЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ В РЕАКЦИЯХ НУКЛЕОФИЛЬНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ</b> <i>Д.М. БЕЙСЕНОВ, Ю.А. ВЛАСЕНКО</i> .....	19
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРДАЗИЛЬНЫХ РАДИКАЛОВ В РЕАКЦИИ СТИЛЛЕ</b> <i>Д.Е. ВОТКИНА, П.В. ПЕТУНИН</i> .....	21
<b>ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ БИОГЕННОГО ФЕРРИГИДРИТА ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ РОСТОВЫХ ФУНКЦИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ХВОЙНЫХ КУЛЬТУР</b> <i>М.К. ГАРМАШОВА, Л. А. МИХАЙЛОВ</i> .....	22
<b>СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ГЕПТАСУЛЬФИДА РЕНИЯ ФОТОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ</b> <i>Н.Б. ЕГОРОВ, Д.В. ГУСЕВА</i> .....	24
<b>ФОТОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ Au-Au<sub>2</sub>S</b> <i>Н.Б. ЕГОРОВ, А.А. КУЗНЕЦОВА</i> .....	26
<b>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ SR-СОДЕРЖАЩИХ КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ</b> <i>А.А.КАЗАКБАЕВА, М.Б. СЕДЕЛЬНИКОВА</i> .....	28
<b>РАЗРАБОТКА ОБЩИХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К НОВЫМ РЕАГЕНТАМ ПОЛИВАЛЕНТНОГО ИОДА НА ОСНОВЕ ПОЛИИОДАРЕНОВ</b> <i>И.А. КАРТАШОВ, И.А. МИРОНОВА</i> .....	30
<b>ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА</b> <i>Н.Л. КИЛИН, В.В. КРЕВСУН, К.В. ЛАЗАРЕВ</i> .....	32
<b>РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА НОВЫХ МУЛЬТИТОПНЫХ ЛИГАНДОВ ПРОИЗВОДНЫХ ИМИДАЗОЛА</b> <i>М.А. КЛЮЧЕНКО, В.В. МАТВЕЕВСКАЯ, А.С. ПОТАПОВ</i> .....	34
<b>СИНТЕЗ НОВЫХ БИДЕНТАТНЫХ ЛИГАНДОВ НА ОСНОВЕ 4-МЕТИЛПИРАЗОЛА</b> <i>А.А. КУЗНЕЦОВ, В.В. МАТВЕЕВСКАЯ, А.С. ПОТАПОВ</i> .....	35

<b>РАЗРАБОТКА СКРЕТЧ МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ</b> <i>Ю.В. ЛЕДОВСКИХ, Е.В. ГУБАРЕВ, Д.О. БЕГЛЕЦОВ, В.К. БЕЛОВ</i> .....	36
<b>ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ В СИСТЕМЕ SI-C-N-O</b> <i>А.Р.НАСЫРБАЕВ, С.О.ПОГОРЕЛОВА</i> .....	38
<b>ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛ ПЛАВЛЕННОГО СВАРОЧНОГО ФЛЮСА ДЛЯ НАПЛАВКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ГРАНУЛИРОВАНИИ</b> <i>С.В. НАУМОВ, А.О. АРТЕМОВ, М.Н. ИГНАТОВ, К.И. БЕЛОУСОВ</i> .....	40
<b>СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ВВЕДЕНИИ ПЛАСТИФИКАТОРА</b> <i>С.В. ПАНИН, В.О. АЛЕКСЕНКО, Д.Г. БУСЛОВИЧ, Ю.В. ДОНЦОВ</i> .....	42
<b>ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ В СИСТЕМЕ Ti-B-N</b> <i>С.О. ПОГОРЕЛОВА, А.Р. НАСЫРБАЕВ</i> .....	44
<b>О НОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ 4-АРИЛАМИНО-1,2-НАФТОХИНОНОВ</b> <i>Т.А. РУКОВЕЦ, О.И. ФОМИНЫХ, Ю.Г. ХАЛЯВИНА, Л.М. ГОРНОСТАЕВ</i> .....	46
<b>ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ</b> <i>А.Е. СЕИЛКАНОВ, О.А.МИРЮК</i> .....	48
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ НА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ</b> <i>М.О. ШИЛЫКОВСКИЙ, Н.Г. ИБРАГИМОВ, Э.Н. ИБРАГИМОВ</i> .....	50
<b>СИНТЕЗ ДИАМИНОПРОИЗВОДНЫХ БИС(АЗОЛ-1-ИЛ)АЛКАНОВ</b> <i>Н.А. ШЕГАРОВА, В.В. МАТВЕЕВСКАЯ, А.С. ПОТАПОВ</i> .....	52

## СЕКЦИЯ 2

### РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

<b>ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НАНОВОЛОКОН ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СПЕКАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ КЕРАМКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ</b> <i>Т.Р. АЛИШИН, О.С. ТОЛКАЧЁВ, А.А. ЛЕОНОВ</i> .....	54
<b>ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА НА КАМНЕЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО И МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ</b> <i>А.О. АРТЕМОВ, С.В. НАУМОВ, М.Н. ИГНАТОВ, М.Ф. КАРТЫШЕВ</i> .....	56
<b>ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО КАК РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ</b> <i>Н.Д. АНДРИЙЧУК, Л.Ю. БОГАТЫРЁВА</i> .....	58
<b>МАГНЕЗИАЛЬНЫЙ ТАМПОНАЖНЫЙ МАТЕРИАЛ</b> <i>А.Е. БОЖЕНОК, Н.А. МИТИНА</i> .....	60

<b>ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШЛИКЕРА НА КАЧЕСТВО ОТЛИТОЙ ЛЕНТЫ</b> <i>О.В. БОРОДИЧ, А.А. ДИТЦ</i> .....	62
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РАДИУСА ДОСТАВКИ СЖИЖЕННОГО ГАЗА ПОТРЕБИТЕЛЯМ</b> <i>О.О. БРАЖНИК, О.Н. МЕДВЕДЕВА</i> .....	64
<b>ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНДИАМИНА</b> <i>Н.А. БЫКОВСКИЙ, Е.А. КАНТОР, В.С. ФАНАКОВ, Л.Н. ПУЧКОВА, Н.Н. ФАНАКОВА</i> .....	66
<b>О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТИЛЕНДИАМИНА</b> <i>Н.А. БЫКОВСКИЙ, Е.А. КАНТОР, В.С. ФАНАКОВ, Л.Н. ПУЧКОВА, Н.Н. ФАНАКОВА</i> .....	69
<b>ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛЫ УГОЛЬНЫХ ТЭС СОЛЯНОЙ КИСЛОТОЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПОЛИОКСИХЛОРИДА АЛЮМИНИЯ</b> <i>Д.В. ВАЛЕЕВ</i> .....	70
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b> <i>М.Д. ДАВЫДОВА, А.Н. ПОНИК, А.А. МАРТЫНОВА, О.И. САТОНИНА</i> .....	72
<b>МОНИТОРИНГ ФЛУОРЕСЦЕИНА В ПЛАСТОВЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ</b> <i>А.А.ДУДКИНА, М.А.ГАВРИЛЕНКО</i> .....	74
<b>ФИЛЬТРУЮЩАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ</b> <i>Е.В. ДЬЯКОНОВА, Н.А.РОМАНЕНКОВА, Т.А. ХАБАС</i> .....	76
<b>ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ОКИСЛЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ВАКУУМНОГО ГАЗОЙЛЯ</b> <i>Ю.А. ИОВИК, Е.Б. КРИВЦОВ</i> .....	78
<b>ПЕНОСТЕКОВЫЙ МАТЕРИАЛ С УЛУЧШЕННОЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ</b> <i>М. Р. КАЙМОНОВ, К.В. ДОРОЖКИН</i> .....	80
<b>СОСТАВ ПАСТЫ ДЛЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ФАРФОРА</b> <i>А.С. КУТИЦЕВ, А.А. ДИТЦ</i> .....	82
<b>РАЗРАБОТКА БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ</b> <i>Н.Д. МЕДВЕДЕВА, О.Н. МЕДВЕДЕВА</i> .....	84
<b>ТВЕРДЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО В ВОДЕ</b> <i>А.В. ОХЛОПКОВА, Н.А. МИТИНА</i> .....	86
<b>ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА КАУСТИЧЕСКОГО МАГНЕЗИАЛЬНОГО ПОРОШКА НА СВОЙСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МАГНЕЗИАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО</b> <i>В.О. ПИЛЬНИКОВА, Н.А. МИТИНА</i> .....	88
<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ</b> <i>А.А. СЕМКЕ, А.С. ПРИМАКОВ, О.В. КАЗЬМИНА</i> .....	90

<b>РАДИОЗАЩИТНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ С АРСЕНИДОМ ГАЛЛИЯ</b> <i>В.И. СТЕБЕНЕВА, К.В. ДОРОЖКИН, Ч. СЫБО, О.В. КАЗЬМИНА</i> .....	92
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ</b> <i>Р.В. ТАРНОВСКИЙ, А.А. ДИТЦ</i> .....	94
<b>ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ</b> <i>А.В. ХЫШОВ, А.Н. ПОНИК, А.А. МАРТЫНОВА, О.С. ПОНОМАРЁВА</i> .....	96
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ПРИМЕРЕ СОСНЫ СИБИРСКОЙ КЕДРОВОЙ</b> <i>ЦУЙ ЦЗЯН, Р.С. ЛАПТЕВ, Ю.С. БОРДУЛЕВ</i> .....	98
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФТОРИРОВАНИЯ СИЛИКАТА ЦИРКОНИЯ</b> <i>Ш.М. ШАРАФЕЕВ, В.М. ПОГРЕБЕНКОВ</i> .....	100

### **СЕКЦИЯ 3** **ФОТОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СВЕТОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ**

<b>PHOTO-INDUCED EFFECTS IN THE DOPED FERROELECTRIC</b> <i>У.О. PERKOV, У.М. KARPETS, V.I. IVANOV</i> .....	103
<b>РЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ МОДУЛЬНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ОРАНЖЕРЕЯ СО СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ</b> <i>Д.В. БЫЛКОВ, С.Б. ТУРАНОВ</i> .....	104
<b>ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ</b> <i>Д.В. БЫЛКОВ, С.Б. ТУРАНОВ</i> .....	106
<b>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ ИАГ АКТЕВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ТВ, ТВ/СЕ</b> <i>В.А. ВАГАНОВ, Р.Г. КАЛИНИН, Д.Т. ВАЛИЕВ</i> .....	108
<b>ДИЗАЙН ЭЛЕМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВОГО СВЕТИЛЬНИКА</b> <i>М.О. ВАСИЛЬЕВА</i> .....	110
<b>ИМИТАЦИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА НА ОСНОВЕ LED ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕРЬЕРЕ С КУПОЛЬНЫМ ПОТОЛКОМ</b> <i>М.О. ВАСИЛЬЕВА</i> .....	113
<b>ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ЛАНТОНОИДОСОДЕРЖАЩИХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ГАЛЛИЯ</b> <i>А. Ю. ВЯЗОВСКАЯ</i> .....	115
<b>СПАРК-ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА YSZ КЕРАМИКИ ДОПИРОВАННОЙ ЕВРОПИЕМ</b> <i>П.Д. ЖВАКИНА, А.М. ШРАЙБЕР</i> .....	117
<b>СЦЕНАРИИ ОСВЕЩЕНИЯ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЁТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ ДЛЯ КУЛЬТУРЫ САЛАТА И ОГУРЦА</b> <i>Е.В. ЖИДОЛОВИЧ, А.А. БАКТЫБАЕВ, А. УАХИ, Т.В. ГРЕЧКИНА</i> .....	119

<b>ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ</b> <i>В.И. ИВАНОВ, О.О. ОВСЕЙЧУК, А.В. МЯГОТИН</i> .....	121
<b>СВЕТОЛИНЗОВЫЙ ОТКЛИК В НАНОЖИДКОСТИ</b> <i>Г.Д. ИВАНОВА, В.И. ИВАНОВ</i> .....	123
<b>ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ В НАНОСУСПЕНЗИИ</b> <i>Г.Д. ИВАНОВА, В.К. ХЕ, В.И. ИВАНОВ</i> .....	125
<b>МЕХАНИЗМЫ КОЛЕБАНИЙ МИКРОЧАСТИЦЫ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ</b> <i>А.А. КАЧАЕВ, В.И. ИВАНОВ</i> .....	127
<b>V-СОДЕРЖАЩИЕ АНТИФЕРРОМАГНИТНЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ</b> <i>А.С. КУЗЬМИН, Е.К. ПЕТРОВ</i> .....	128
<b>ЯРКОСТЬ ЛЮМИНОФОРОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ПОЛЕ РАДИАЦИИ, СРАВНЕНИЕ С ПРОМЫШЛЕННЫМИ</b> <i>Д.А. МУСАХАНОВ, В.М. ЛИСИЦЫН, Ж.Т. КАРИПБАЕВ</i> .....	130
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОНТОГЕНЕЗА КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗОВ УРАЛЬСКОГО ТИПА МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ</b> <i>Ю.В. НЕФЕДОВ, В.С. НИКИФОРОВА</i> .....	132
<b>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ НА СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ ЛИСТЬЕВ БАЗИЛИКА</b> <i>С.А. РОМАНЕНКО, С.Б. ТУРАНОВ</i> .....	134
<b>ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА В АКТИВНОЙ СРЕДЕ НА ЛАЗЕРНУЮ ГЕНЕРАЦИЮ В РАСТВОРАХ РОДАМИНА 6Ж С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА</b> <i>Р.В. РЯМБОВ, А.В. ТРИФОНОВА</i> .....	136
<b>АНАЛИЗ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА БЕРЕЖНОЙ Г. ТОМСКА</b> <i>И.Ю. СУЛТАНОВА, К.П. ТОЛКАЧЕВА</i> .....	138
<b>ВЛИЯНИЕ ФАР ОБЛУЧЕННОСТИ НА ПРИРОСТ МИКРОВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛИА</b> <i>О.А. ТРОФИМЧУК, С.Б. ТУРАНОВ, П.В. ПЕТИКАРЬ, С.А. РОМАНЕНКО</i> .....	140
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ИАГ ЛЮМИНОФОРА</b> <i>А.Т. ТУЛЕГЕНОВА</i> .....	142
<b>ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА МОРФОГЕНЕЗ ПРОРОСТКОВ ОРХИДНЫХ В КУЛЬТУРЕ IN VITRO</b> <i>Л.В. ХОЦКОВА, Т.П. АСТАФУРОВА, М.С. ЯМБУРОВ, С.Б. ТУРАНОВ</i> .....	144
<b>ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИАГ ЛЮМИНОФОРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАГРЕВЕ</b> <i>ЦЗЮЙ ЯНЯН</i> .....	147
<b>УСКОРЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА МИКРОЧАСТИЦЫ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ</b> <i>С.А. ШВЕДОВ, А.А. КАЧАЕВ, В.И. ИВАНОВ</i> .....	148
<b>YAG:СЕВАF<sub>2</sub> КЕРАМИКА КОНСОЛИДИРОВАННАЯ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО СТАТИЧЕСКОГО ОДНООСНОГО ПРЕССОВАНИЯ</b> <i>А.М. ШПРАЙБЕР, П.Д. ЖВАКИНА</i> .....	149

<b>ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ТОМАТА</b> <i>М.С ЯМБУРОВ, А.А. БУРЕНИНА, Т.П. АСТАФУРОВА, С.Б. ТУРАНОВ</i> .....	151
--	-----

<b>ВЛИЯНИЕ СВЕТА LED-СВЕТОДИОДОВ НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ САЛАТА</b> <i>М.С ЯМБУРОВ, А.А. БУРЕНИНА, Т.П. АСТАФУРОВА, С.Б. ТУРАНОВ</i> .....	153
--	-----

**СЕКЦИЯ 4**  
**ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ И**  
**МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<b>DEVELOPMENT OF A THEORETICAL FRAMEWORK FOR INVESTIGATION OF COMPENSATION POSSIBILITIES OF DEVIATIONS IN THE SHIP'S PIPING SYSTEM</b> <i>T. M. DO, K. N. SAKHNO</i> .....	156
--	-----

<b>KINEMATICAL AND POWER FLOW ANALYSIS OF THE NUTATION SPEED REDUCER</b> <i>M. A. JASEM</i> .....	159
--	-----

<b>THE MORPHOLOGY OF TITANIUM ALLOY AT DIFFERENT CREEP-FEED GRINDING SPEEDS</b> <i>S.V. NOSENKO, V.A. NOSENKO, L.L. KREMENETSKII</i> .....	161
---	-----

<b>RESEARCH STEEL TO DIELECTRIC JUNCTIONS BY USING SUBMINIATURE EDDY-CURRENT TRANSDUCERS</b> <i>V.N. MALIKOV, S.F. DMITRIEV, L.M. DMITRIEVA, A.V. ISHKOV</i> .....	163
---	-----

<b>ВЛИЯНИЕ МЕХАКТИВАЦИИ НА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ НАВОДОРАЖИВАНИЕ ПОРОШКА НИКЕЛИДА ТИТАНА</b> <i>Е.В. АБДУЛЬМЕНОВА, О.Ю. ВАУЛИНА, С.Н. КУЛЬКОВ</i> .....	165
--	-----

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ ПРИ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ</b> <i>Т.Р. АБЛЯЗ, К.Р. МУРАТОВ</i> .....	167
---	-----

<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ В ПОРОУПРУГОМ СОСТАВНОМ ТЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАГОВОЙ ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СХЕМЫ НА УЗЛАХ МЕТОДА ЛОБАТТО</b> <i>С.М. АЙЗИКОВИЧ, А.Н. ПЕТРОВ</i> .....	169
--	-----

<b>ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА</b> <i>А.Н. АНОШКИН, П.В. ПИСАРЕВ, Ю.С. КИРОВА</i> .....	171
--	-----

<b>ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОАКТИВНОГО СТРУКТУРНОГО ЭЛЕМЕНТА В ДИАПАЗОНЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР</b> <i>А.Н. АНОШКИН, П.В. ПИСАРЕВ, Ю.С. КИРОВА</i> .....	173
--	-----

<b>ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ ТОКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УПРОЧНЕННОЙ ЗОНЫ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ</b> <i>Д.С. БЕЛИНИН, Ю.Д. ШИЦЫН, С.Д. НЕУЛЬБИН, Е.А. КРИВОНОСОВА</i> .....	175
--	-----

<b>ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ</b> <i>А.С.БИНЧУРОВ, Н.С. ИНДАКОВ, Ю.И.ГОРДЕЕВ, В.Б.ЯСИНСКИЙ</i> .....	177
<b>ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ</b> <i>В.И. БОГДАНОВИЧ, М.Г. ГИОРБЕЛИДЗЕ</i> .....	179
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ КАПЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ СПЛОШНОЙ ПРОВОЛОКОЙ</b> <i>С.В. ВАРУШКИН, Д.Н. ТРУШНИКОВ, Д.С. ШАМОВ</i> .....	181
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ</b> <i>А.О.ГРИШАРИН, Н.Д.ОГЛЕЗНЕВ, К.Р.МУРАТОВ, Т.Р.АБЛЯЗ</i> .....	183
<b>КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХМИНИАТЮРНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ</b> <i>С.Ф. ДМИТРИЕВ, А.М. САГАЛАКОВ, В.Н. МАЛИКОВ, А.А. ГРИГОРЬЕВ</i> .....	185
<b>ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК</b> <i>Д.О. ДОЛМАТОВ, Д. А. СЕДНЕВ</i> .....	187
<b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ</b> <i>Ю.А. ЖИЛЬЦОВА, Е.А. ЕФРЕМЕНКОВ</i> .....	189
<b>ОБЛАЧНЫЕ СЕРВИСЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0</b> <i>Д.А. ЗАКОЛДАЕВ, А.В. ГУРЬЯНОВ, А.В. ШУКАЛОВ, И.О. ЖАРИНОВ</i> .....	191
<b>СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ В ПЕЧИ ДСП-70</b> <i>В.С. ЗАХАРОВ, А.В. КАЗАНЦЕВ</i> .....	193
<b>СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ДУРБИНА И МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ТРЕХМЕРНОЙ ПОРОВАЗКОУПРУГОЙ ДИНАМИКИ</b> <i>А.А. ИПАТОВ, Л.А. ИГУМНОВ</i> .....	195
<b>ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В МЕТАЛЛЕ ШВА ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ</b> <i>А.С.КУЛЕШ, В.П. ХРОМЦОВ, А.С.ВОРОБЬЕВ</i> .....	197
<b>МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА, АРМИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МИКРОВОЛОКНАМИ</b> <i>ЛЕ ТХИ МИ ХИЕП, С. В.ПАНИН, Л. А. КОРНИЕНКО, В. О. АЛЕКСЕНКО, Л. Р. ИВАНОВА</i> .....	199

<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ ОДНОРОДНОГО АНИЗОТРОПНОГО УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b> <i>И.П. МАРКОВ, Л.А. ИГУМНОВ</i> .....	201
<b>ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ</b> <i>К.С. МИЩЕНКО, А.В. КОРОЛЕВ, А.А. КОРОЛЕВ, А.Ф. БАЛАЕВ</i> .....	202
<b>ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С КОЛЬЦЕВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ</b> <i>К.Р. МУРАТОВ, Э. И. АБДРАХМАНОВ, С.А. ПОПОВА, О.В. ГАЛЬЦЕВА</i> .....	204
<b>ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЬЕЗОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ СТАЛИ 30Х13</b> <i>К.Р. МУРАТОВ, Р.А. СОКОЛОВ, А.Н. ВЕНЕДИКТОВ, В.В. ПРОБОТЮК</i> .....	206
<b>МЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ НАПЛАВКЕ СЛОЕВ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т</b> <i>С.Д. НЕУЛЫБИН, Д.С. БЕЛИНИН, Ю.Д. ЩИЦЫН</i> .....	208
<b>ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОПТОВОЛОКОННОГО ПЬЕЗОДАТЧИКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> <i>А.А. ПАНЬКОВ, П.В. ПИСАРЕВ</i> .....	210
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОХЛАЖДЕННОЙ ЗАКЛЕПКИ ПРИ СОЗДАНИИ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ</b> <i>Д.А. ПОТЯНИХИН, Е.М. ДУБЕНКО</i> .....	212
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДАЧИ КОНЦОВ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ</b> <i>Д.А. ПОТЯНИХИН, Б.Н. МАРЬИН</i> .....	214
<b>СРАВНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ</b> <i>А.С. СМИРНОВА, И.В. ВЛАСОВ, Р.В. СТАНКЕВИЧ, А.В. ЯКОВЛЕВ, Ю.И. ПОЧИВАЛОВ, Д.В. ВАЛУЕВ, С.В. ПАНИН</i> .....	216
<b>ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 30Х13 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И МАЛОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ</b> <i>В.В. ПРОБОТЮК, В.Ф. НОВИКОВ, К.Р. МУРАТОВ, Р.А. СОКОЛОВ</i> .....	218
<b>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НАПЛАВКИ МЕТОДОМ ПЛАЗМА-МИГ НА ГЕОМЕТРИЮ ВАЛИКА</b> <i>С.А. ТЕРЕНТЬЕВ, Т.Э. ЕФРЕМОВ, Ю.Д. ЩИЦЫН</i> .....	220
<b>МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ОПОРНОГО КОЛЬЦА ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ ПОЛОСЫ</b> <i>А.П. ТУРЕНКО, А.В. КОРОЛЕВ, А.А. КОРОЛЕВ, А.Ф. БАЛАЕВ</i> .....	222
<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ И МЕТОДА Н.Н. ДАВИДЕНКОВА</b> <i>А.А. ШИРЯЕВ, В.Н. ТРОФИМОВ, В.В. КАРМАНОВ, А.С. ГОРБУНОВ</i> .....	224

<b>ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ И ОПАСНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ</b> <i>А.С. КУЛЕШ, Д.М. ШМИТОВ, В.П. ХРОМЦОВ</i> .....	226
<b>ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ПАРОПРОВОДНЫХ ТРУБ</b> <i>А.С. КУЛЕШ, А.С. ВОРОБЬЕВ, Д.М. ШМИТОВ</i> .....	228
<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКЕТНЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОЧНОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ</b> <i>В.В. ШИЛЕР, А.В. ШИЛЕР, И.И. ГАЛИЕВ, Е.Н. ПАШКОВ</i> .....	230
<b>МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОЙ СТАЛИ 17Г1С, ПОДВЕРГНУТОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ</b> <i>А.В. ЯКОВЛЕВ, И.В. ВЛАСОВ, А.С. СМЕРНОВА, Р.В. СТАНКЕВИЧ, Ю.И. ПОЧИВАЛОВ, Д.В. ВАЛУЕВ, С.В. ПАНИН</i> .....	232
<b>БЕЗБОЙКОВЫЙ ГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ МЕХАНИЗМ И ЕГО ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ</b> <i>А. К. УДОВИК</i> .....	234

## ***СЕКЦИЯ 1***

### ***ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ***

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ РЕАКЦИОННОГО И ДИФФУЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ ПОРИСТОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА С ДОБАВКАМИ СО И NI

*Н.В. АРТЮХОВА, М.И. КАФТАРАНОВА, А.С. ГАРИН, С.Г. АНИКЕЕВ, В.Э. ГЮНТЕР*

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: artukhova\_nad@mail.ru

Пористые сплавы на основе никелида титана (TiNi) успешно решают широкий круг задач в челюстно-лицевой хирургии, онкологии, стоматологии [1,2]. Новый класс имплантатов на основе пористо-монокристаллических конструкций из никелида титана призван решать двойственные задачи в процессе функционирования имплантата в организме человека. Монокристаллическая часть, находящаяся под постоянной знакопеременной нагрузкой, должна быть высокопрочной, в то время как пористая часть, интегрированная в живую костную ткань, наряду с прочностью должна обладать высокой эластичностью. В дополнении к этому необходимо решить основную проблему качественного припекания пористой части к монокристаллической, а именно не допустить расслоения между ними.

Используемая на данный момент методика спекания пористо-монокристаллических имплантатов с набором необходимых функциональных свойств, предлагающая варьировать содержание порошков титана, никеля и никелида титана не позволяет справиться с этими трудностями и требует оптимизации [3]. Таким образом, эффективной методики создания комбинированных имплантатов до сих пор в мире не создано. Для решения данной проблемы необходимо провести анализ влияния механизмов реакционного и диффузионного взаимодействия на структуру пористого сплава на основе никелида титана с добавками Co и Ni, что является актуальной научной задачей.

В работе исследованы пористые материалы на основе никелида титана, полученные методом диффузионного спекания порошка TiNi с добавками Co и Ni в количестве 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 ат. %. Использованы порошки никелида титана марки ПВ-Н55Т45 (фракция  $d=100-140$  мкм), кобальта – ПК-1У ( $d=30-70$  мкм), никеля – ПНК-ОТ4 ( $d=10-15$  мкм). Спекание образцов с начальной пористостью насыпки 65–70 % с легирующими добавками и без них проводили в электровакуумной печи марки СНВЭ – 1.31/15-И4 при температуре 1260 °С и времени выдержки 15 мин в кварцевых трубках диаметром 12–13 мм и длиной 65–70 мм.

Металлографические образцы подготовлены по стандартной методике с использованием наждачной бумаги в интервале зернистости (P493–P5000). После каждого этапа шлифовки контролировали качество поверхности на оптическом микроскопе. Для выявления структурных особенностей исследуемых образцов поверхность металлографических шлифов обрабатывали в водном растворе азотной и плавиковой кислот при температуре раствора 55–60 °С в течение 2–3 с. Микроструктуру пористого сплава исследовали методами оптической (Axiovert-40 MAT) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) Quanta 200 3D. Концентрационный состав фаз определяли с помощью энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) EDAX ECON IV.

При создании пористых имплантатов на основе TiNi используется диффузионный метод спекания, в основе которого лежит диффузионный механизм взаимодействия в однокомпонентной системе порошка никелида титана. Для создания пористо-монокристаллических устройств целесообразно применение активирующих добавок Co и Ni вследствие необходимости снижения температур спекания во избежание разупрочнения монокристаллической части и компенсации тепловых потерь. Таким образом, необходимо учитывать помимо диффузионного механизма в порошковой системе при спекании, еще и реакционный между разными компонентами шихты.

При диффузионном спекании имеются элементы реакционного взаимодействия из-за неоднородного по фазово-химическому составу порошка TiNi вследствие наличия наиболее легкоплавкой фазы  $Ti_2Ni$  [4]. Это приводит к формированию межчастичных шеек на основе TiNi в местах контакта смежных порошинок, что имеет общие черты с реакционным

спеканием порошка Ti и Ni, при котором формируется продукт реакции в виде прослойки TiNi. Введение добавок Co и Ni от 1,5 до 2 ат. % приводит к видимой активации спекания за счет экзотермической реакции добавки с фазой Ti<sub>2</sub>Ni в процессе высокотемпературной выдержки согласно уравнениям 1 и 2. При этом получаемые интерметаллические соединения обладают эффектом памяти формы, что может положительно сказаться на физико-механических свойствах получаемых пористо-монокристаллических конструкций на основе никелида титана.



Анализ микроструктуры полученных образцов выявил разнообразие вторичных фаз (Ti<sub>2</sub>Ni, Ti<sub>4</sub>Ni<sub>2</sub>(O, N, C), TiNi<sub>3</sub>), которые находятся по границам и в теле зерен TiNi, а также наблюдается отличающееся структурно-фазовое состояние фазы TiNi при введении добавок Co и Ni. Добавка Co в меньшей степени изменяет фазовый состав пористого сплава по сравнению с Ni, но меняется локализация примесей в объеме металлической матрицы TiNi. Добавка Ni приводит к появлению мартенситных кристаллов B19' во всем объеме матрицы TiNi, что связано с ее обогащением по Ni. При добавках Co также обнаружены области с мартенситными кристаллами B19' вокруг локализации примесей, обогащенных по Ti, в которых имеются следы Co.

Пористость (П) и объемная усадка ( $\Delta V$ ) для образцов с Co (2 ат. %) составляет 54% и 8%, соответственно, а с добавками Ni (2 ат. %) – П=25% и  $\Delta V$ =17%. Для пористого сплава TiNi добавки Co и Ni свыше 1,0 ат. % приводят к избыточному появлению жидкой фазы в процессе спекания. Обнаруженные особенности позволяют сделать вывод, что добавки в 1 ат. % Co и Ni являются оптимальными и позволяют разработать технологический режим получения пористо-монокристаллических конструкций на основе никелида титана.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00745.*

#### **Список литературы**

1. Е. Л. Чойнзонов, В. Э. Гюнтер, М. Р. Мухамедов и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в онкологии. Т. 13 – Томск: Изд-во «НПП «МИЦ», 2013. – 336 с.
2. В. Э. Гюнтер, В. Н. Ходоренко, Т. Л. Чекалкин и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Т.1 – Томск: Изд-во «МИЦ», 2011. – 534 с.
3. Пат. № 2578888 Российская Федерация. МПК С22С1/08. Шихта для напекания пористой части на монокристаллическую часть имплантата из никелида титана / Гюнтер В.Э. [и др.]; - опубл. 29.03.2016, Бюл. № 9. – 8 с.
4. С. Г. Аникеев, А. С. Гарин, Н. В. Артюхова и др. Структурные и морфологические особенности порошка никелида титана, полученного методом гидридно-кальциевого восстановления // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 4. – С. 131-137.

## ГАЛОГЕНСОДЕРЖАЩИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ ПОЛИЭФИРЫ

Д.Х. АФАЩАГОВА, Т.И. БИДОВ, Р.Ч. БАЖЕВА, А.М. ХАРАЕВ

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

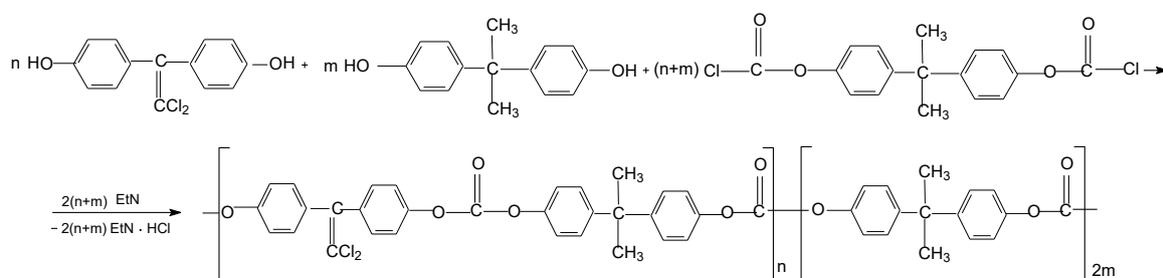
E-mail: r.bazheva@mail.ru

Известно, что наиболее эффективным способом повышения огнестойкости как полиэфиров, как и других классов полимеров, является модификация реакционноспособными соединениями, осуществляемая, в частности, путем получения полиэфира в присутствии химического модификатора, выполняющего функции мономера, придающего негорючесть или способствующего снижению горючести. Чаще всего это соединения, содержащие в своей молекуле галоген, фосфор, серу, азот, бор. Известно, что присутствие атомов хлора и, особенно, брома в полимере эффективно содействует уменьшению горючести. Пониженная горючесть полимеров со связями С–Br, С–Cl обусловлена процессами, ингибирующими в поверхностной и предпламенной зонах воспламенение и развитие горения из-за выделения большого объема негорючих газообразных продуктов. При этом, как правило, достигаются лучшие физико-механические показатели.

Широкое применение при синтезе ароматических полиэфиров получили хлорсодержащий мономер 1,1-дихлор-2,2-ди(4-оксифенил)этилен, перспективность использования которого при синтезе полиарилатов, полиэфиркетонов и полисульфонов доказана многочисленными исследованиями [1-10].

В данной работе рассмотрены способ синтеза и некоторые свойства сополикарбонатов (со-ПК) на основе бисфенолов 4,4'-диоксидифенилпропана и 1,1-дихлор-2,2-ди(4-оксифенил)этилена. В качестве кислотного компонента использован бисхлорформиат 4,4'-диоксидифенилпропана.

Синтез со-ПК на основе смеси бисфенолов 4,4'-диоксидифенилпропана и 1,1-дихлор-2,2-ди(4-оксифенил)этилена проводили методом акцепторно-каталитической поликонденсации в среде 1,2-дихлорэтана, в присутствии триэтиламина в качестве катализатора реакции по схеме:



Благодаря высокой реакционной способности исходных веществ поликонденсация в присутствии триэтиламина осуществляется при низких температурах. В интервале температур от 10<sup>0</sup>С до 40<sup>0</sup>С получают полимеры с высокой  $\eta_{\text{пр}}$ . Причем, максимальные значения приведенной вязкости достигаются при температуре 23-25<sup>0</sup>С. Реакция протекает с высокой скоростью и максимальные значения  $\eta_{\text{пр}}$  достигаются через 40-45 минут. Дальнейшее увеличение времени реакции практически не приводит к изменению приведенной вязкости полимера. Сополикарбонаты, полученные по данному методу обладают хорошей воспроизводимостью по молекулярной массе. Варьируя соотношения исходных бисфенолов получены сополимеры различного состава.

На ИК спектрах сополикарбонатов имеются полосы С=О валентные колебания, соответствующие Ar-O-C(O)-O-Ar группам, что свидетельствует об образовании карбонатных групп, полосы поглощения, соответствующие изопропилиденовой группе в

остатке 4,4-диоксифенилпропана (1290-1365, 1385, 1415-1465, 2930-2980  $\text{cm}^{-1}$ ), группе  $\text{C}=\text{CCl}_2$  (980  $\text{cm}^{-1}$ ).

Дифференциальные кривые турбидиметрического титрования свидетельствуют о том, что полученные сополикарбонаты характеризуются низкой полидисперсностью и различаются растворимостью в хлорированных органических растворителях. Нахождение порога коагуляции для сополикарбонатов, содержащих большее количество фрагментов на основе 4,4'-диоксифенилпропана по сравнению с фрагментами на основе мономера 1,1-дихлор-2,2-ди(4-оксифенил)этилена в области больших объемов осадителя свидетельствует о лучшей растворимости первых. Унимодальный характер кривых подтверждает образование сополимеров, а не смеси полимеров.

Полученные полимеры хорошо растворимы во многих органических растворителях, таких как хлороформ, дихлорэтан, тетрачлорэтан, тетрагидрофуран и др. В качестве осадителей рекомендуется использовать пропанол-2, петролейный эфир, гептан, ацетон.

Значения кислородного индекса (КИ) повышается с увеличением содержания мономера 1,1-дихлор-2,2-ди(4-оксифенил)этилена в сополимере (рис.).

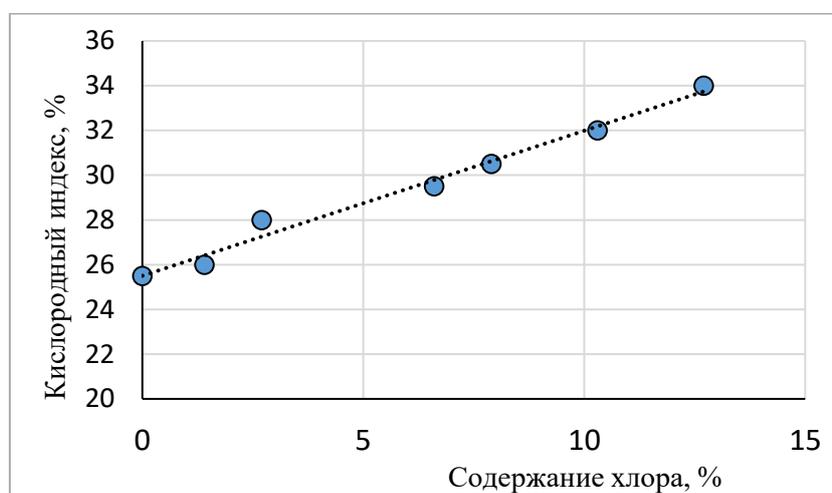


Рисунок 1 – Зависимость КИ от содержания атомов хлора в полиэфирах

Анализ полученных результатов свидетельствуют, что характеристики воспламеняемости и горючести полимерных материалов тесным образом связаны с присутствием в цепи макромолекулы галогенов. Введение в цепь макромолекулы  $\text{>C}=\text{CCl}_2$ -группировок и увеличение их процентного содержания в полимерах способствует линейному повышению кислородного индекса.

#### Список литературы

1. Хараев А.М., Бажева Р.Ч., Лукожев Р.В., Инаркиева З.И., Барокова Е.Б. Синтез и свойства полиариленэфиркетонов на основе некоторых производных хлораля// Пластические массы. – 2014. - № 5-6. – С. 24-28.
2. Ozden S., Charayev A.M., Bazheva R.C. Synthesis and modification of aromatic polyesters with chloroacetyl 3,5-dibromo-p-hydroxybenzoic acid //Journal of Applied Polymer Science. 2009. Т. 111. № 4. - С. 1755-1762.
3. Kharaev A.M., Shaov A.Kh., Bazheva R.Ch. The synthesis and stabilization of polymers. Saarbrücken, 2013. - 300 с.
4. Бажева Р.Ч., Хараев А.М., Бажев А.З., Инаркиева З.И., Бесланеева З.Л. Огнестойкие сополикарбонаты //Пластические массы. - 2016. - № 5-6. - С. 26-30.
5. Бажева Р.Ч., Хараев А.М., Инаркиева З.И., Бесланеева З.Л. Сополикарбонаты, содержащие дихлорэтиленовые группы в основной цепи //Пластические массы. - 2017. № 3-4. - С. 32-35.

## СОПОЛИАРИЛЕНЭФИРКЕТОНЫ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ БИСФЕНОЛОВ

К.С. БЕЖДУГОВА, Л.Х. АФАШАГОВА, Р.Ч. БАЖЕВА, З.И. ИНАРКИЕВА

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

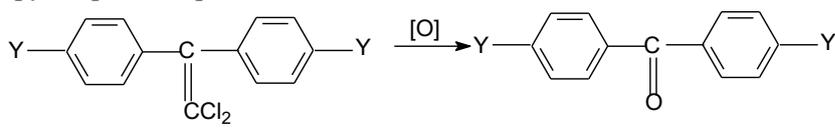
ФГБОУ ВО «Ингушский государственный университет»

E-mail: r.bazheva@mail.ru

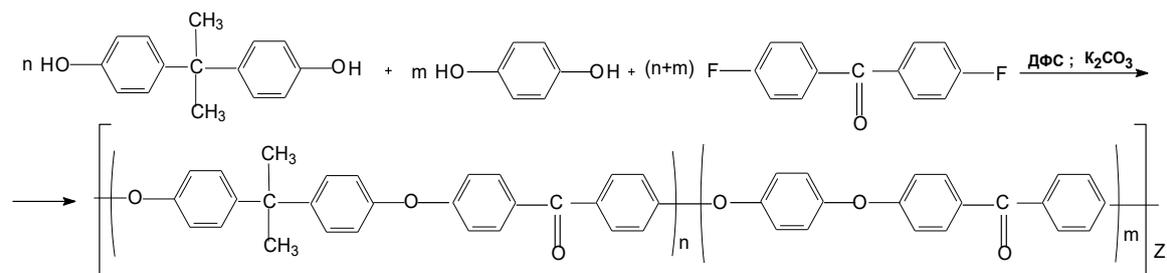
В ряду многочисленных реакций взаимодействия хлораля с ароматическими углеводородами и их производными, наибольший интерес с точки зрения синтеза конденсационных мономеров представляют реакции хлораля с бензолом, толуолом, фенолом, анизолом и галогенбензолами - особенно хлорбензолом и фторбензолом. Замещенные бензолы вступают во взаимодействие с хлоралем с различной легкостью, обусловленной, в первую очередь, электронным влиянием заместителей. Превращения полученных 1,1,1-трихлор-2,2-диарилэтанов осуществляются следующими путями: превращением центральных 1,1,1-трихлорэтановых групп; замещением атомов водорода в ароматических ядрах диарилхлорэтанов и их производных по центральным группам; превращением функциональных групп, введенных в ароматические ядра диарилтрихлорэтанов и их производных по центральным группам.

В свою очередь, центральные трихлорэтановые группы могут подвергаться различным превращениям, приводящим к их трансформации в такие группы, как 1,1-дихлорэтиленовая, 1,1-дихлорэтановая, 1-хлорэтановая, этиленовая, карбонильная, метиленовая, карбоксильная, гидроксильная, трихлорэтанольная, 1,1,1,2-тетрахлорэтановая, 1,1,2,2-тетрахлорэтановая, ацетиленовая,  $\alpha$ -дикарбонильная и т.д.

Среди таких возможных превращений 1,1-дихлорэтиленовых групп наиболее изученными и распространенными процессами являются их окисление в кетонные группировки, протекающие по схеме:

, где Y = H, Cl, F, NO<sub>2</sub>.

Полученные таким образом дигалогенпроизводные бензофенона, в частности 4,4'-дифтордифенилкетон мы использовали для получения различных сополиэфиркетонов, согласно схеме:



Изменяя мольные соотношения n и m от 0 до 1 получены сополиэфиркетоны с различным содержанием исходных фрагментов. Согласно данному уравнению реакции сомономерные единицы статистически распределены вдоль основной цепи. Изменение соотношения карбонильных и эфирных групп позволяет целенаправленно изменять их технологические и эксплуатационные характеристики.

Процесс получения сополиэфиркетонов осуществляли одностадийно, т.е. при одновременной загрузке всех компонентов и ступенчатом подъеме температуры до температуры синтеза, осуществляли выдержку до достижения требуемого значения вязкости и выделяли полимер. Температура реакции 280-320<sup>0</sup>С.

Строение полученных сополимеров подтверждены методами элементного анализа и ИК-спектроскопии. Одним из свидетельств образования сополимеров нужного строения на

основе 4,4'-диоксидифенилпропана и п-дигидроксибензола служит тот факт что по мере увеличения содержания бисфенола А полосы поглощения, соответствующие изопрониленовой группе (симметричные валентные колебания СН<sub>3</sub>-групп) в области - 2960-2980 см<sup>-1</sup> усиливаются.

Свидетельством образования сополимеров, а не смеси гомополимеров служат данные турбидиметрического титрования. На дифференциальные кривые титрования имеются только по одному максимуму. Строение полученных сополимеров также подтверждены методами элементного анализа, ИК-спектроскопии, рентгеноструктурным анализом, а также высокими выходами целевых продуктов и высокими значениями приведенной вязкости.

Полученный продукт представляет собой смесь полимера, растворителя и побочных продуктов реакции. Для отделения со-ПЭК от побочных продуктов и растворителя применяли двухстадийный способ промывки. Поскольку побочные продукты и растворитель находятся не только вокруг полимера, но и в твердом полимере, в зависимости от температуры, гранулометрического состава материала, выгруженного из реактора, типа растворителя и т.д. они требуют очень много времени и больших количеств растворителя для промывки. После измельчения застывшей реакционной смеси, на первой стадии промывки (экстракции), например, ацетоном, дифенилсульфон удаляли из реакционной смеси, а на второй стадии многократной промывкой дистиллированной водой вместе с водой вымывали солеподобные побочные продукты. На первой стадии промывки в качестве органического растворителя также можно использовать метилэтилкетон, метилизобутилкетон, метанол, этанол, изопропанол, н-бутанол или изо-бутанол, 2-метоксиэтанол, 1,2-диметоксиэтан, тетрагидрофуран, этилацетат, бензол, толуол, ксилол, а также их смеси.

Содержание основных групп в синтезированных полимерах (расчетные данные) и их соотношения приведены в таблице.

Таблица – Содержание основных групп в сополиэфиркетонах

ПЭК и со-ПЭК на основе:	Содержание, %				ММ элементарного звена
	-O-	C=O	C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	C=O/ -O-	
Гидрохинон	11,6	10,1	-	0,870	276,3
Со-ПЭК-25	10,4	9,1	3,4	0,875	308,9
Со-ПЭК-50	9,4	8,2	6,2	0,872	341,1
Со-ПЭК-75	8,6	7,5	8,4	0,870	374,0
Бисфенол А	7,9	6,9	10,3	0,873	406,5

#### Список литературы

1. Хараев А.М., Бажева Р.Ч., Полиэфиркетоны: синтез, структура, свойства, применение (обзор). // Пластические массы. 2013. № 8. С. 13-19.
2. Ozden S., Kharayev A.M., Shaov A.Kh., Bazheva R.Ch. The synthesis of block copolyetherketones on 4,4'-dichlorodiphenylketone, phenolphthaleine and bisphenol A and investigation of their properties. // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 107. № 4. P. 2459-2465.
3. Хараев А.М., Бажева Р.Ч., Лукожев Р.В. и др. Синтез и свойства полиариленэфиркетонов на основе некоторых производных хлораля // Пластические массы. 2014. № 5-6. - С. 24-28.
4. Kharayev A.M., Mikitaev A.K., Bazheva R.C., Zaikov G.E. The synthesis and properties of unsaturated halogen-containing poly (arylene ether ketone)s. // Monomers, Oligomers, Polymers, Composites and Nanocomposites Research synthesis Properties and Applications. USA, 2009. С. 103-114.

## СИНТЕЗ ИМИДАЗОЛИЛ-СОДЕРЖАЩИХ ИОДОНИЕВЫХ СОЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ В РЕАКЦИЯХ НУКЛЕОФИЛЬНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ

*Д.М. БЕЙСЕНОВ, Ю.А. ВЛАСЕНКО*

*Научный руководитель - к.х.н., доцент, П.С. ПОСТНИКОВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: dmb10@tpu.ru

В последние десятилетия внимание химиков-синтетиков обращено на такой класс соединений, как соединения поливалентного иода, так как они могут являться эффективной и нетоксичной альтернативой оксидам тяжелых металлов и дорогостоящим металлоорганическим катализаторам [1-3].

Особое внимание стоит обратить на такой класс соединений, как диарилиодониевые соли, которые находят применение в различных областях применения, например, в качестве агентов для электрофильного арилирования широкого ряда нуклеофилов [4-6], как фотоинициаторы для катионной фотополимеризации [7-9] и т.д.

На сегодняшний день разработано большое количество методов арилирования с использованием диарилиодониевых солей, однако, ученые продолжают проводить работы в направлении учения селективности данных превращений [10]. Например, научным коллективом под руководством Stuart был разработан метод получения несимметричных диарилиодониевых солей, содержащих 1,3,5 - триметоксибензол, и показана возможность их применения в реакциях арилирования нуклеофилов [11]. Причем наличие электронодефицитного арена в структуре иодониевой соли позволяет добиться высокой селективности в данных превращениях. Мы предлагаем использование имидазолил-содержащих иодониевых солей, как удобную альтернативу иодониевым солям, содержащим 1,3,5 - триметоксибензол, в реакциях арилирования нуклеофилов, в силу ряда достоинств, например, более мягких условий получения, растворимости в воде и т.д.

На первом этапе работы нами был получен ряд имидазолил-содержащих иодониевых солей взаимодействием имидазола с соответствующими арилиоддиацетатами (схема 1) [12].

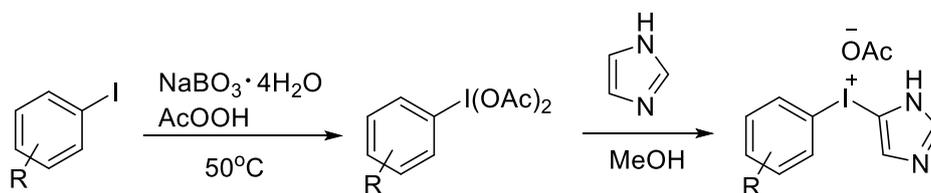


Схема 1 – получение имидазолил-содержащих иодониевых солей

Дальнейшим этапом нашей работы было исследование реакционной способности полученных имидазолил-содержащих иодониевых солей в реакциях арилирования нуклеофилов (схема 2).

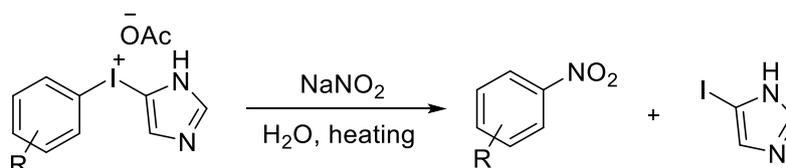


Схема 2 – Взаимодействие имидазолил-содержащих иодониевых солей с нуклеофилом

Таким образом, нами была показана возможность арилирования нуклеофилов, на примере нитрита натрия, имидазол-содержащими иодониевыми солями, а также исследуется влияние имидазольного фрагмента в структуре иодониевых солей на селективность реакций данного превращения.

**Список литературы**

1. Zhdankin V.V., Stang P.J. Chemistry of polyvalent iodine // *Chemical Review*. – 2008. – № 108. – С. 5299–5358.
2. Zhdankin V.V., Stang P.J. Recent developments in the chemistry of polyvalent iodine compounds // *Chemical Review*. – 2002. – № 102. – С. 2523–2584.
3. Yoshimura A., Zhdankin V.V. Advances in Synthetic Applications of Hypervalent Iodine Compounds // *Chemical Review*. – 2016. – № 116. – С. 3328–3435.
4. Aradi K. et al. Diaryliodonium Salts in Organic Syntheses: A Useful Compound Class for Novel Arylation Strategies // *Synlett*. – 2016. – № 10. – С. 1456–1485.
5. Yusubov M. S., Maskaev A. V., Zhdankin V. V. Iodonium salts in organic synthesis // *ARKIVOC: Online Journal of Organic Chemistry*. – 2011. – № 1. – С. 370–409.
6. Olofsson B. Arylation with Diaryliodonium Salts // *Hypervalent Iodine Chemistry*. – Springer International Publishing, 2015. – № 373. – С. 135–166.
7. Crivello J.V., Aldersley M.F. Supramolecular diaryliodonium salt-crown ether complexes as cationic photoinitiators // *Journal of Polymer Science*. – 2013. – № 51. – С. 801–814.
8. Bulut U., Kolay M., Tarkuc S., Toppare L. Dibenzophenazine derivatives as visible photosensitizers for diaryliodonium salts // *Journal of Polymer Science*. – 2011. – № 49. – С. 3299–3303.
9. Crivello J.V., Lam J.H.W. Diaryliodonium Salts. A New Class of Photoinitiators for Cationic Polymerization // *Macromolecules*. – 1977. – № 10. – С. 1307–1315.
10. Merrit E.A., Olofsson B. Diaryliodonium Salts: A Journey from Obscurity to Fame // *Angewandte Chemie International Edition* – 2009. – № 48. – С. 9052–9070.
11. Seidl T.L., Sundalam S.K., McCullough B., Stuart D.R. Unsymmetrical Aryl(2,4,6-trimethoxyphenyl)iodonium Salts: One-Pot Synthesis, Scope, Stability, and Synthetic Studies // *Journal of Organic Chemistry*. – 2016. – № 81. – С. 1998–2009.
12. Wu, Y., Izquierdo, S., Vidossich, P., Lledós, A., Shafir, A. NH-Heterocyclic Aryliodonium Salts and their Selective Conversion into N1-Aryl-5-iodoimidazoles // *Angewandte Chemie International Edition* – 2016. – № 55. – С. 7152-7156.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРДАЗИЛЬНЫХ РАДИКАЛОВ В РЕАКЦИИ СТИЛЛЕ

Д.Е. ВОТКИНА, П.В. ПЕТУНИН

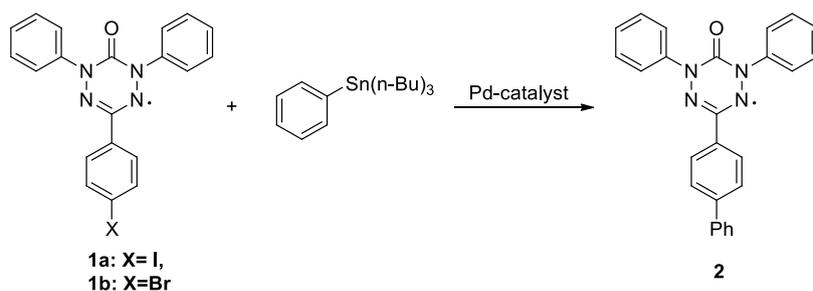
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: dvotkina@mail.ru

В настоящее время существует проблема создания сопряженных бирадикальных систем, обладающих контролируемыми величинами спин-спинового взаимодействия. Проведение палладий-катализируемых реакций кросс-сочетания между готовыми радикальными блоками позволяет решить данную проблему [1]. Известны примеры реализации данного подхода для получения нитронил-нитроксильных бирадикальных систем [2,3]. Однако синтез бирадикалов на основе вердазильных радикалов в литературе описан мало. Существенными преимуществами вердазилов является их устойчивость к воздействию воздуха и влаги, а так же они могут быть выделены в твердом виде [4].

Ранее были показаны возможности протекания реакции Соногашира и Сузуки для вердазильных радикалов [5,6]. Однако примеров модификации вердазилов с помощью реакции Стилле в литературе нет.

На первом этапе мы поставили перед собой задачу проведения модельной реакции Стилле с вердазильными радикалами и изучения влияния природы галогена на образование целевого продукта. В качестве исходных реагентов были выбраны йод- и бром-замещенные 3-оксовердазилы и фенилтрибутилолово.



В результате работы было получено соединение **2**, образование которого подтверждено с помощью масс-спектрометрии высокого разрешения. Также было установлено, что йод-содержащие радикалы активнее вступают в данную реакцию.

Дальнейшее исследование реакции Стилле с вердазильными радикалами позволит не только проводить функционализацию радикальных систем, но и получать новые магнитные и редокс-активные материалы.

## Список литературы

1. Chinchilla R., Nájera C. The Sonogashira reaction: a booming methodology in synthetic organic chemistry //Chemical reviews. – 2007. – Т. 107. – №. 3. – С. 874-922.
2. Kolanji K. et al. Mixed Phenyl and Thiophene Oligomers for Bridging Nitronyl Nitroxides //The Journal of organic chemistry. – 2017. – Т. 82. – №. 15. – С. 7764-7773.
3. Shinomiya M., Higashiguchi K., Matsuda K. Evaluation of the  $\beta$  value of the phenylene ethynylene unit by probing the exchange interaction between two nitronyl nitroxides //The Journal of organic chemistry. – 2013. – Т. 78. – №. 18. – С. 9282-9290.
4. Hicks R. (ed.). Stable radicals: fundamentals and applied aspects of odd-electron compounds. – John Wiley & Sons, 2011, 245 с.
5. Petunin P. V. et al. Verdazyl Radical Building Blocks: Synthesis, Structure, and Sonogashira Cross-Coupling Reactions //European Journal of Organic Chemistry.
6. Le T. N. et al. Suzuki–Miyaura Coupling of Verdazyl Radicals //European Journal of Organic Chemistry. – 2017. – Т. 2017. – №. 7. – С. 1125-1131.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ БИОГЕННОГО  
ФЕРРИГИДРИТА ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ РОСТОВЫХ ФУНКЦИЙ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ХВОЙНЫХ КУЛЬТУР**

*М. К. ГАРМАШОВА, Л. А. МИХАЙЛОВ*  
Сибирский федеральный университет  
Институт экологии и географии  
E-mail: rulezzadidas@yandex.ru

Распространение нанотехнологий и наноматериалов во многих сферах деятельности привело к необходимости изучения действия наночастиц на различные компоненты экосистем, включая среды жизни и составляющие биоты. Наночастицы техногенного происхождения в окружающую среду могут попадать на любой стадии производства продукта. Накопление их в среде приводит к различным эффектам [1].

Природные наночастицы имеют абиогенное и биогенное происхождение и являются естественными экологическими факторами окружающей среды [5].

Значительный интерес представляет изучение действия биогенных наночастиц, продуцируемых бактериями, обитающими в горных породах и почвенном субстрате. В качестве примера могут быть наночастицы ферригидрита получаемые при культивировании бактерий в лабораторных условиях [2; 3]. Цель наших исследований оценить действие биогенных наночастиц ферригидрита на развитие проростков кресс-салата и сосны обыкновенной в экспериментальных условиях.

В лабораторном эксперименте выявлено стимулирующее влияние биогенного ферригидрита на развитие проростков кресс-салата, что отражается в величине коэффициента редукции ростовых функций рассчитанного по Ступко В. Ю., таблица 1.

Данный коэффициент учитывает соотношение четырех показателей проростков (длина надземной части; длина корневой системы; масса надземной части; масса корневой системы) в вариантах различных добавлений золя наночастиц и в контроле. Стимулирующий эффект зарегистрирован при всех исследуемых концентрациях.

Таблица 1 – Коэффициент редукции ростовых функций проростков кресс-салата при воздействии наночастиц ферригидрита

Тип наночастиц	Содержание золя, %										
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Fe	1,3	1,1	1,0	1,4	1,2	1,6	1,3	1,7	1,4	1,5	1,4

Результаты экспериментальных работ выявили стимулирующее действие наночастиц на скорость роста надземной и подземной части проростков кресс-салата, таблица 2.

Таблица 2 – Оценка влияния биогенных наночастиц ферригидрита на длину и массу проростков по критерию Фишера

Показатели	Кресс-салат
Длина надземной части	p<0,01
Длина корня	p<0,001
Масса надземной части	p<0,001
Масса корня	p<0,001

Изучение процесса прорастания семян и развития проростков сосны обыкновенной в присутствии биогенных наночастиц ферригидрита также показало положительный эффект их воздействия.

Возрастание энергии прорастания семян имело статистически значимые различия в опытных вариантах по сравнению с контрольным ( $p < 0,001$ ). Увеличение длины проростков в присутствии биогенного ферригидрита было выше на статистически значимом уровне ( $p < 0,001$ ). Наибольший прирост зарегистрирован при концентрации наночастиц 0,3 %; 0,5-0,8 % золя.

Таким образом в экспериментальных условиях выявлен эффект стимулирования ростовых функций проростков кресс-салата и сосны при действии биогенных наночастиц ферригидрита при концентрации золя в пределах 0,05-1,0 %.

#### Список литературы

1. Асанова, А. А. Оценка токсичности техногенных наночастиц с использованием водоросли *Chlorella vulgaris* / А. А. Асанова, В. И. Полонский, Ю. С. Григорьев // КрасГАУ, 2005. – 240 с.
2. Гуревич, Ю. Л. Сб. Ультрадисперсные порошки, наноструктуры / Ю. Л. Гуревич, С. В. Марков, Ю. И. Маньков и др. // Материалы VII Ставеровские чтения, труды научно-технической конф. с международным участием. – Красноярск, 2015. – С. 98-101.
3. Ладыгина, В. П. Получение, структура и магнитные свойства железосодержащих наночастиц, синтезируемых бактериями : Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Красноярск, 2011. – 22 с.
4. Ступко, В. Ю. Культура растительных тканей INVITRO как метод повышения стрессоустойчивости яровой мягкой пшеницы сибирской селекции: Автореф. дис. канд. с/х. наук. – Красноярск, 2009. – 18 с.
5. Юрин, В. М. Наноматериалы и растения: взгляд на проблему / В. М. Юрин, О. В. Молчан // Белорусский государственный университет. – Минск, 2015. – Т. 10. – С. 9-21.

## СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ГЕПТАСУЛЬФИДА РЕНИЯ ФОТОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Н.Б. ЕГОРОВ, Д.В. ГУСЕВА*

Томский политехнический университет

E-mail: egorov@tpu.ru

Получение гептасульфида рения ( $\text{Re}_2\text{S}_7$ ) представляет интерес из-за его применения в промышленности в качестве катализатора и в медицине в качестве лимфотропного препарата (трейсера), вводимого в ткань с последующей визуализацией лимфатических путей у больных раком. Наночастицы  $\text{Re}_2\text{S}_7$  являются рентгеноаморфными и обладают неправильной формой, что позволяет использовать их в качестве объекта ультрафагоцитоза для  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  в форме  $\text{TcO}_2$ . Обнаружение микрометастаз в лимфатических узлах методом радиоизотопной лимфосцинтиграфии позволяет сократить объём диссекции при удалении первичной опухоли и выполнять органосохраняющие операции. Оптимальным для диагностики являются коллоидные системы  $\text{Re}_2\text{S}_7$  с размером частиц от 20 до 100 нм, которые могут протекать через физиологические капилляры в лимфатические сосуды и лимфоузлы после подкожной инъекции в новообразование.

Существует два метода получения  $\text{Re}_2\text{S}_7$  [1]: а) путем осаждения из кислых растворов перренатов сероводородом; б) обменной реакцией перренатов с тиосульфатами в кислой среде. Нами разрабатывается новый способ получения наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$ . В основе способа лежит облучение водных растворов  $\text{NaReO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  УФ-излучением.

Целью работы является изучение синтеза наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  при УФ-облучении водных растворов, содержащих  $\text{NaReO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

Максимальное окрашивание в облученном растворе достигается при смешении 0,1 моль/л  $\text{NaReO}_4$  и 0,1 моль/л  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  в объемном соотношении 1:47. На рисунке 1 представлены электронные спектры исходного и фотолизированных растворов.

При УФ-облучении в течение 10 мин в электронном спектре происходит появление поглощения в области 300–700 нм с максимумами ~415 нм и ~475 нм, при этом раствор окрашивается в светло-коричневый цвет. Увеличение времени облучения приводит к росту оптической плотности фотолита, но не приводит к выделению дисперсной фазы. Это указывает, что в процессе фотолиза образуются коллоидные частицы устойчивые к коагуляции.

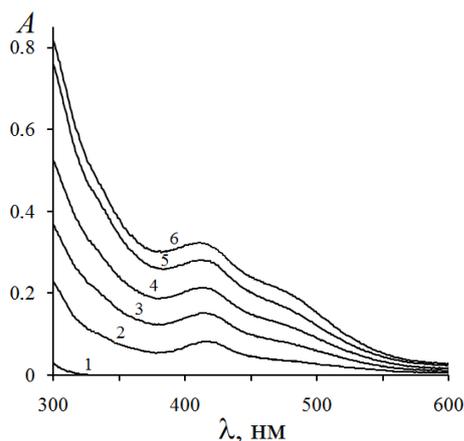


Рисунок 1 – Электронные спектры смеси водных растворов 0,1 М  $\text{NaReO}_4$  и 0,1 М  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  в объемном соотношении 1:47 при различном времени облучения: 1 – 0 мин; 2 – 2 мин; 3 – 4 мин; 4 – 6 мин; 5 – 8 мин; 6 – 10 мин

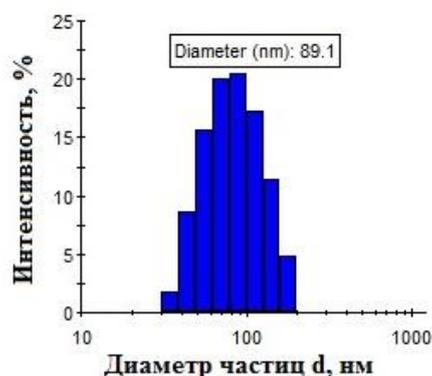


Рисунок 2 - Гистограмма распределения по размерам частиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , полученных после 3 мин УФ-облучения

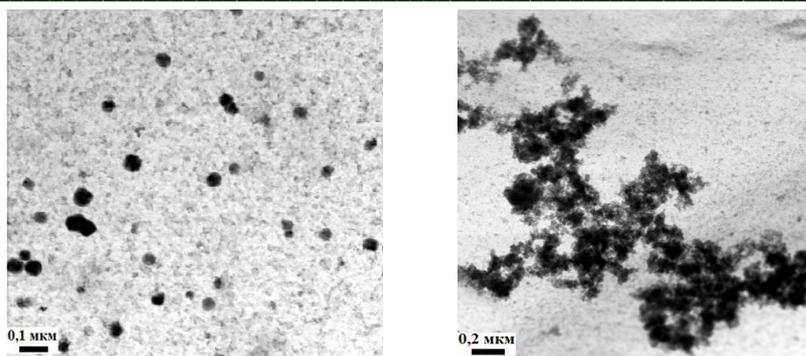


Рисунок 3 – Электронные микрофотографии частиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , образующихся при УФ-облучении водных растворов  $\text{NaReO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  в течение 3 мин

Размеры и морфология полученного фотохимическим способом  $\text{Re}_2\text{S}_7$  была изучена методами электронной спектроскопии и лазерной дифракции. Электронные микрофотографии и диаграммы распределения наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  показывают, что в начальный момент времени (от 1 до 3 мин) в растворе происходит формирование коллоидных частиц, имеющих шаровидную форму и размеры от 20 до 100 нм (рисунок 2 и 3).

Исследование полученного осадка методом рентгенофазового анализа показало, что осадок состоит из элементарной серы (PDF 00-008-0247). Поэтому был сделан вывод о том, что вещество, отвечающее за окрашивание элементарной серы в коричневый цвет, является рентгеноаморфным.

Спектры рентгенофлуоресцентного анализа показывают, что осадок помимо серы содержит рений.

Облучение 0,1 моль/л водного раствора  $\text{NaReO}_4$  не приводит к его фотолизу. Следовательно, образование  $\text{Re}_2\text{S}_7$  в водном растворе происходит при взаимодействии иона  $\text{ReO}_4^-$  с продуктами фотолиза  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

Из литературы известно, что УФ-облучение водных растворов  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  приводит к образованию элементарной серы, сульфита и сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Это позволяет предположить, что образование  $\text{Re}_2\text{S}_7$  может происходить в результате реакции:



На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что при УФ-облучении водных растворов  $\text{NaReO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  происходит образование наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , которые могут быть использованы в качестве диагностического средства для лимфосцинтиграфии.
2. С увеличением времени фотолиза возрастает не только концентрация наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$ , но и их средний диаметр. Установлено, что в момент времени (от 1 до 3 мин) происходит формирование сферических частиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  размером от 20 до 100 нм.
3. Предположена схема образования  $\text{Re}_2\text{S}_7$  из водных растворов, содержащих  $\text{NaReO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .
4. Предложен новый способ получения наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  с использованием УФ-облучения водных растворов  $\text{NaReO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , который отличается от известных способов, тем, что позволяет регулировать скорость реакции образования наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  и осуществлять контроль за их размером.

#### Список литературы

1. Гуревич П.А., Билялова Г.А., Богородская М.А. О кинетике образования наночастиц  $\text{Re}_2\text{S}_7$  // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 17. – С. 30–34.

## ФОТОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦ Au-Au<sub>2</sub>S

Н.Б. ЕГОРОВ, А.А. КУЗНЕЦОВА

Томский политехнический университет

E-mail: egorov@tpu.ru

Способность золотосодержащих наночастиц конвертировать световую энергию в тепло, достаточную для необратимого повреждения раковых клеток известно давно, что позволяет их использовать в терапевтических целях. Для воздействия излучения только на пораженные ткани необходимо проводить предварительно их визуализацию.

Более эффективно если в качестве терапевтического и контрастного агента, проникающего в пораженную ткань, применялось бы одно вещество. При использовании многофотонной спектроскопии для лечения раковых заболеваний в качестве такого многофункционального вещества предложено применять наночастицы Au-A<sub>2</sub>S, хорошо поглощающие инфракрасное излучение [1].

Целью данного исследования является фотохимический синтез многофункциональных золотосодержащих наночастиц Au-Au<sub>2</sub>S, которые могут быть одновременно использованы как для визуализации раковых клеток, так и для их уничтожения.

В качестве исходного соединения для фотохимического синтеза наночастиц Au-Au<sub>2</sub>S был выбран водный раствор дитиосульфатоаурата (I) натрия (Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]·2H<sub>2</sub>O), который в свою очередь применяется для лечения системной красной волчанки. Синтез Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] осуществляли как это описано в работе [2]. В работе использовали растворы Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] с концентрацией от 10<sup>-4</sup> до 10<sup>-1</sup> моль/л. Водные растворы Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] облучали на воздухе ртутной лампой ДКБУ – 9 (λ=253,7 нм). Образующийся при фотолизе осадок отделяли от раствора центрифугированием, трехкратно промывали водой, затем этиловым спиртом и сушили в вакуумном эксикаторе. Процедуру получения осадка повторяли многократно до накопления количества, достаточного для проведения анализов.

Дифрактограммы записывали на дифрактометре D8 ADVANCE. Электронные спектры снимали на спектрофотометре Evolution 600. Морфология и размеры полученных продуктов реакции были изучены с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM – 2100F и на анализаторе размера частиц DelsaMax Pro.

На рисунке 1 представлена дифрактограмма продукта фотолиза, которая свидетельствует, что при фотолизе водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] происходит образование Au-Au<sub>2</sub>S.

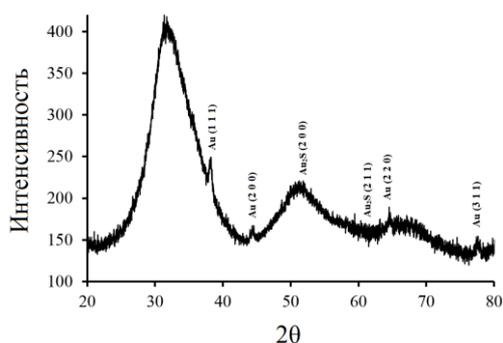


Рисунок 1 – Дифрактограмма продукта фотолиза водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]

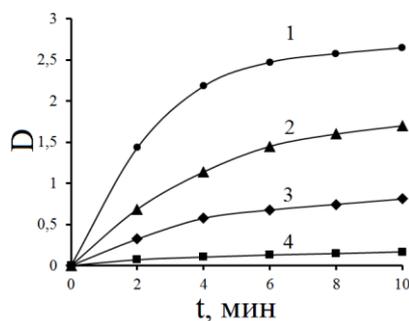


Рисунок 2 – Кинетика фотолиза водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] от времени облучения: 1 – 10<sup>-1</sup> моль/л, 2 – 10<sup>-2</sup> моль/л, 3 – 10<sup>-3</sup> моль/л, 4 – 10<sup>-4</sup> моль/л (λ=400 нм)

При УФ-облучении в электронном спектре водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] происходит появление поглощения в области 300–700 нм без ярко выраженного максимума, при этом

раствор окрашивается в коричневый цвет. Увеличение времени облучения приводит к росту оптической плотности фотолита (рис. 2). Скорость образования частиц Au-A<sub>2</sub>S с повышением концентрации Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] в растворе увеличивается.

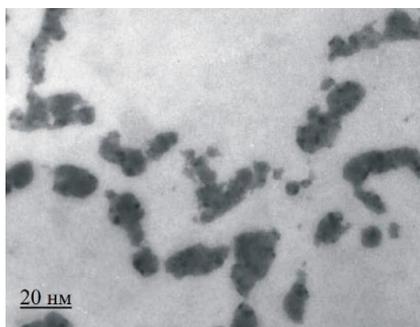


Рисунок 3 – Микрофотография наночастиц, образующихся при УФ-облучении водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] (1×10<sup>-3</sup> моль/л) в течение 4 мин

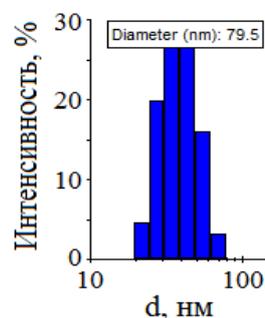
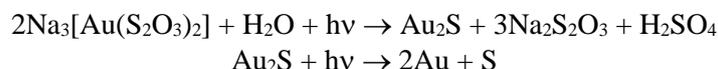


Рисунок 4 – Гистограмма распределения по размерам частиц, полученных при УФ – облучении водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] (1×10<sup>-3</sup> моль/л) в течение 2 мин

В первоначальный момент в растворе образуются наночастицы Au-Au<sub>2</sub>S, которые имеют неправильную форму и обладают размерами от 20 до 120 нм.

Интенсивности рефлексов отражения в дифрактограмме (рис. 1) указывают на то, что содержание Au<sub>2</sub>S в осадках фотолита больше, чем содержание Au. Это позволяет сделать вывод, что основным продуктом фотолита водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] является Au<sub>2</sub>S, а Au образуется в результате восстановления Au<sub>2</sub>S при воздействии излучения. Подобный процесс наблюдали в работе [3] с получением наночастиц Ag<sub>2</sub>S-Ag.

Исходя из этого предположения образование смешанных наночастиц Au-Au<sub>2</sub>S возможно по следующим схемам:



На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. При УФ-облучении водных растворов Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] образуются наночастицы Au-A<sub>2</sub>S, концентрация которых повышается в растворе с увеличением времени облучения.
2. Установлено, что в растворах с концентрацией Na<sub>3</sub>[Au(S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] 10<sup>-2</sup> моль/л и более образуются наночастицы Au-A<sub>2</sub>S устойчивые к коагуляции, а в более разбавленных растворах устойчивость наночастиц понижается и зависит от времени облучения.
3. Показано, что образующиеся наночастицы Au-A<sub>2</sub>S имеют неправильную форму и обладают размерами от 20 до 120 нм, что позволяет их использовать для лечения раковых заболеваний.

#### Список литературы

1. Day E.S., Bickford L.R., Slater J.H., Riggall N.S., Drezek R.A., West J.L. Antibody-conjugated gold-gold sulfide nanoparticles as multifunctional agents for imaging and therapy of breast cancer // International Journal of Nanomedicine. – 2010. – № 5. – P. 445–454.
2. Brown H. Sodium aurothiosulfate. A simple method for its preparation // J. Am. Chem. Soc. – 1927. – V. 49. – P. 958–959.
3. Ремпель С.В., Кузнецова Ю.В., Герасимов Е.Ю., Ремпель А.А. Влияние облучения на свойства коллоидных наночастиц сульфида серебра (Ag<sub>2</sub>S) // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59. – № 8. – С. 1604–1

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ SR-СОДЕРЖАЩИХ КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*А.А.КАЗАКБАЕВА<sup>1</sup>, М.Б. СЕДЕЛЬНИКОВА<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [aigerim\\_bk@bk.ru](mailto:aigerim_bk@bk.ru)

В современной травматологии и ортопедии все большее значение приобретает разработка новых биокomпозитных материалов для лечения повреждений и заболеваний опорно-двигательной системы. Для осуществления стабильной фиксации фрагментов кости при проведении открытой репозиции переломов используют различные имплантаты [1]. Не одно десятилетие внимание исследователей привлекают сплавы на основе магния, как биоразлагаемые и биоабсорбируемые материалы [2]. Магниево-кальциевые сплавы, благодаря своим прочностным характеристикам, являются пригодными для изготовления различных типов имплантатов, так как их плотность до  $1.85 \text{ г/см}^3$  и модуль упругости около 45 ГПа наиболее соответствуют свойствам кости [1].

Одной из проблем, затрудняющих применение магниевых сплавов, является высокая скорость их биорезорбции в организме человека. Скорость растворения магниевых сплавов можно регулировать путем формирования на их поверхности кальцийфосфатных (КФ) покрытий [3]. Введение в состав покрытий микроэлементов, таких как Sr позволяет усиливать пролиферацию преостеобластических клеток, стимулировать формирование кости и уменьшать ее резорбцию [4]. Метод микродугового оксидирования (МДО) в водных растворах электролитов является наиболее технологичным и востребованным для нанесения биологически активных покрытий на поверхность металлических имплантатов.

В качестве образцов использовали пластинки размером  $10 \times 10 \times 1 \text{ мм}^3$  из сплава Mg-0,8Ca. Нанесение покрытий осуществлялось в водном растворе электролита, содержащего  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , NaOH, NaF, Sr-замещенный гидроксиапатит  $\text{Ca}_{7,5}\text{Sr}_{2,5}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$  (Sr-ГА) или Sr-замещенный трикальцийфосфат  $\text{Ca}_2\text{Sr}(\text{PO}_4)_2$  (Sr-ТКФ). Параметры нанесения покрытий были следующие [5]: длительность импульсов – 100 мкс, частота импульсов – 50 Гц, время нанесения покрытий – 5 мин, рабочее напряжение МДО варьировалось от 350 до 500 В.

Были проведены исследования морфологии поверхности, элементного и фазового состава покрытий. РЭМ – изображения, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (LEO EVO 50 с приставкой для энергодисперсионного анализа, ЦКП ИФПМ СО РАН «Нанотех», г. Томск), показывают, что покрытия на поверхности имеют округлые бугорки, неровности, образующиеся в результате микродуговых разрядов и формирующие характерный рельеф (рис.1), благоприятный для адгезии клеток. Поверхность покрытия имеет пористую структуру, причем размер пор на поверхности Sr-ГА покрытий, равный 3- 8 мкм, превышает размер пор, присутствующих на поверхности Sr-ТКФ покрытий.

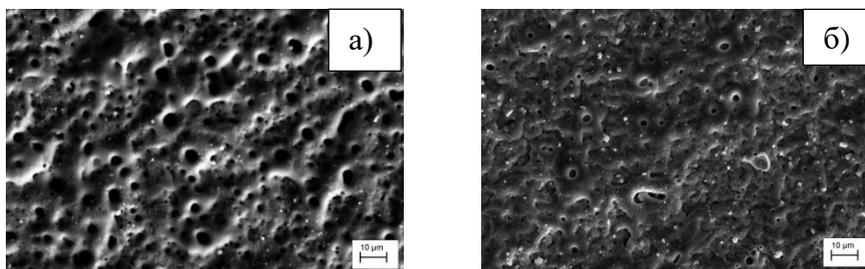


Рисунок 1 – РЭМ-изображения поверхности покрытий на основе Sr-ГА (а) и Sr-ТКФ (б), нанесенных на сплав Mg-0,8Ca при напряжении процесса 350 В

Зависимости плотности тока от времени нанесения Sr-ГА и Sr-ТКФ покрытий при различных импульсных напряжениях представлены на рисунке 2. На графиках зависимостей

наблюдаются скачкообразные перепады значений, указывающие на импульсную природу тока. Появление микрозарядов на поверхности погруженных в электролит образцов, приводящих к формированию покрытия, происходит при начальном значении напряжения микродугового процесса – 350 В. При этом начальная плотность тока для Sr-ГА составляет 0,22 А/см<sup>2</sup> и для Sr-ТКФ сплава – 0,17 А/см<sup>2</sup>. Повышение импульсного напряжения в интервале 350–500 В приводит к увеличению начальной плотности тока от 0,22 до 0,32 А/см<sup>2</sup> для Sr-ГА покрытий и от 0,17 до 0,29 А/см<sup>2</sup> для Sr-ТКФ покрытий. Это связано с тем, что с повышением приложенного напряжения увеличивается интенсивность микродуговых разрядов, приводящих к увеличению плотности тока процесса, и, следовательно, скорости роста покрытий для обоих типов электролитов. Постепенно в процессе нанесения покрытия плотность тока снижается и через 2-3 минуты выходит на плато, что указывает на формирование диэлектрического слоя [4].

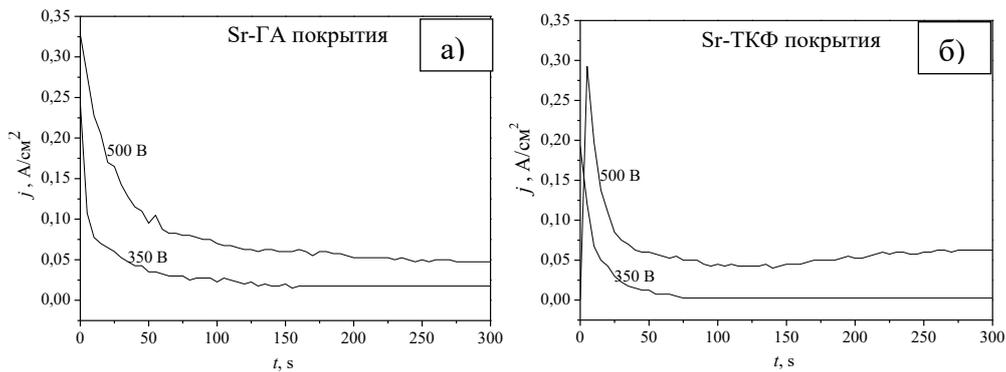


Рисунок 2 - Графики зависимости плотности тока от времени нанесения Sr-ГА (а) и Sr-ТКФ (б) покрытий на Mg-0,8Ca, нанесенных при различных импульсных напряжениях

Таким образом, выявлены закономерности формирования Sr-содержащих кальцийфосфатных покрытий на поверхности сплава Mg-0,8Ca. Показано, что процесс МДО нанесения Sr-ГА идет более интенсивно, чем для Sr-ТКФ покрытий и характеризуется большей плотностью тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований СО РАН, 2013–2020 гг., проект № III.23.2.5.

#### Список литературы

1. Головаха М.Л., Беленичев И.Ф., Черный В.Н. и др. Особенности метаболизма лабораторных крыс при биодеградации имплантата из сплава на основе магния // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2013. – №. 3. – С. 43-46.
2. Головаха М.Л., Черный В.Н., Яцун Е.В. и др. Регенерация костной ткани при остеосинтезе имплантатами из сплавов на основе магния в эксперименте // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2013. – №. 2. – С. 45-50.
3. Черный В. Н. Перспективы применения биодеградирующих сплавов на основе магния в остеосинтезе // Запорожский медицинский журнал. – 2013. – №. 6. – С. 76-79.
4. Avci M., Yilmaz B., Tezcaner A., Evis Z. Strontium doped hydroxyapatite biomimetic coatings on Ti6Al4V plates // Ceramics International. – 2017. – V 43. – №. 12. P. 9431-9436.
5. Sedelnikova M.B., Komarova E.G., Sharkeev Y.P., Tolkacheva T.V., Sheikin V.V., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Kazakbaeva A.A., Schmidt J. Characterization of the Micro-Arc Coatings Contained  $\beta$ -Tricalcium Phosphate Particles on Mg-0.8Ca Alloy // Metals, 2018, volume 8(4). P. 238. doi:10.3390/met8040238.

## РАЗРАБОТКА ОБЩИХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К НОВЫМ РЕАГЕНТАМ ПОЛИВАЛЕНТНОГО ИОДА НА ОСНОВЕ ПОЛИИОДАРЕНОВ

*И.А. КАРТАШОВ, И.А. МИРОНОВА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: kartashov.ilia.tomsk@gmail.com

Химия поливалентного иода является перспективной областью для ученых со всего мира. За последние 5 лет было опубликовано 1312 статей, что указывает на высокий интерес к реагентам поливалентного иода. Соединения поливалентного иода обладают следующими преимуществами: высокая хемоселективность; они проявляют реакционную способность, схожую с переходными металлами, соответственно являются более экологичными [1-3]. Эти соединения нашли широкое применение в органическом синтезе в качестве селективных окислителей и «зеленых» реагентов. Наиболее известными реагентами поливалентного иода являются 2-иодоксибензойная кислота (IBX), реактив Десс-Мартина (DMP), 2-иодоксибензолсульфокислота (IBS), фенилиодозоацетат (PIDA) и т.д. (рис. 1).

2-Иодоксибензойная кислота – типичный представитель циклических иодиларенов - используется в качестве окислителя спиртов до альдегидов, без риска дальнейшего окисления до карбоновой кислоты, как региоселективный реагент в деароматизации фенолов до 2,4-циклогекса-2,4- или 2,5-диена. IBX устойчив к влаге, однако взрывается при нагревании до 200 °C или механическом воздействии, плохо растворяется в органических растворителях. [1-3]

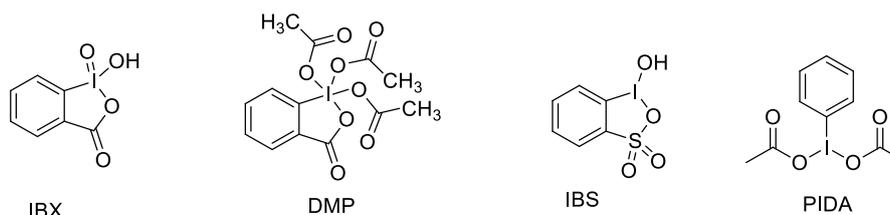


Рисунок 1 – Структуры IBX и DMP, IBS, PIDA

Реактив Десс-Мартина является продуктом взаимодействия 2-иодоксибензойной кислоты с уксусным ангидридом [4]. Такая дериватизация позволила получить более реакционноспособный продукт, чем IBX, а также значительно повысить растворимость в органических растворителях. DMP применяется как селективный окислитель спиртов до карбонильных соединений; в синтезе полициклических соединений и гетероциклов [5]; в реакции деароматизации пирролов в  $\gamma$ -лактамы [6] и др. Однако же, при работе с реактивом Десс-Мартина нужно соблюдать особые условия, связанные с его нестойкостью и чувствительностью к влаге [1-3], более того, данный реагент является дорогостоящим.

1,2-Дииодбензол известен как эффективный катализатор для межмолекулярного аминирования аренов в гомогенных условиях [7]. Ключевым аспектом для успешного C-N-сочетания является напряженная конформация связей с кислородами бис-соединения поливалентного иода (III), которые обуславливают их высокую реакционную способность [7]. Такими соединениями могут выступать 1,2,3-бенздииодоксолы, производные соединений 1,2-дииодбензола, 1,2,4,5-тетраиодбензола, гексаиодбензола.

Особая привлекательность аминирования C-H связей заключается в возможности заменить наиболее известные в настоящее время методы синтеза ариламинов (сочетание Бухвальда-Хартвига или Ульмана), которые требуют использования предварительно полученных арилгалогенидов и палладиевого или медного катализа [8-9].

Целью нашей работы является разработка общих синтетических подходов к новым реагентам поливалентного иода на основе полииодаренов, которые будут отличаться лучшими выходами, относительно традиционных методик.

В ходе исследований нами была разработана методика окисления 1,2-диодбензола и 1,2,4,5-тетраидбензола в присутствии надуксусной и уксусной кислот при температуре 30°C (схема 1):

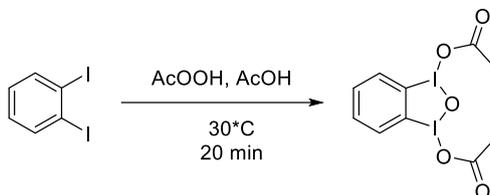


Схема 1 – Синтез 1,3-диацетокси-1,3-дигидро 1,2,3-бенздиодоксола

В результате нами был получен продукт с выходом 33%, что выше описанного выхода в оригинальной методике [10].

Мы предположили, что новый метод синтеза 1,2,3-бенздиодоксолов с использованием экологически безопасного Oxone® (схема 2) приведет к образованию целевого продукта с более высоким выходом, чем при использовании надуксусной кислоты в качестве окислителя.

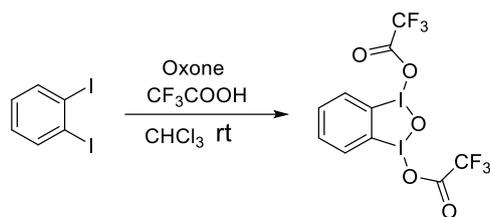


Схема 2 – Синтез 1,3-дитрифторацетокси-1,3-дигидро 1,2,3-бенздиодоксола

Однако в результате проведенной реакции нами был получен 1,2-диодилбензол с выходом 80%.

Полученные соединения были охарактеризованы современными физико-химическими методами. В ходе работы нами были получены вещества: 1,3-диацетокси-1,3-дигидро-1,2,3-бенздиодоксол, 1,3-дитрифторацетокси-1,3-дигидро 1,2,3-бенздиодоксола, 1,2-диодилбензол. В дальнейшем планируется оптимизация методик окисления данных иодпроизводных бензолов и изучение их реакционной способности.

#### Список литературы

1. Zhdankin, V.V. Hypervalent Iodine Chemistry: Preparation, Structure and Synthetic Applications of Polyvalent Iodine Compounds. John Wiley & Sons: Chichester, 2013, 468 p.
2. Yoshimura A., Zhdankin V. V. Chem. Rev. 2016, 116, 5, 3328-3435.
3. Hypervalent Iodine Chemistry, (Ed.: T. Wirth), Springer, Berlin, 2003, 1-4.
4. Dess D. B., Martin J. C. // J. Org. Chem. 1983, 48, 22, 4155-4156.
5. Kita, Y. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1994, 116, 3684-3691.
6. Mirk, D. et al. // Adv. Synth. Catal. 2004, 346, 675-681.
7. Wolf W., Chalekson E., Kobata D. Org. Chem. 1967, 32, 10, 3239-3241.
8. Maity A., Hyun S. M., Powers D. C. // Nature Chem. 2018, 10, 2, 200.
9. Zagulyaeva A. A., Yusubov M. S., Zhdankin V. V. // J. Org. Chem. 2010, 75, 6, 2119-2122.
10. Lucchetti N. et al. Synth. & Catal. 2016, 358, 1, 2093-2099.

## ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

*Н.Л. КИЛИН, В.В. КРЕВСУН, К.В. ЛАЗАРЕВ*

Гомский политехнический университет

E-mail: volgina\_t@mail.ru

Мировое потребление биоразлагаемых пластиков развивается высокими темпами, среднегодовой рост составляет 20–27 %. Порядка 43 % приходится на полилактид (ПЛ) – самый типичный и распространенный биопластик, схожий по свойствам с АБС-пластиками, полиэтиленом и полистиролом. Самыми крупными производителями L-полилактида считаются Nature Works (США), Toyota (Япония), Hitachi (Япония), DuPont (США), Galactic (Бельгия), Hisun Biomaterials (Китай). Компания PURAC (Нидерланды) является главным производителем L,D-полилактида [1]. В России потребление полилактида реализуется только импортными поставками, так как на сегодняшний день проекты по производству полилактида в РФ заведомо обречены на более высокие издержки, чем аналогичные проекты в других регионах мира [2]. Да и цена самого полимера остается по-прежнему высокой и в среднем (в зависимости от производителя) составляет 300 руб./кг, это в 3–4 раза дороже по сравнению с синтетическими аналогами.

Повлиять на стоимость ПЛ (как и любого другого полимера) возможно за счет использования отходов термопластичных пластмасс (ОТП), что позволит также частично решить сырьевые проблемы и сократить потребление первичных материальных ресурсов. Классифицировать ОТП можно следующим образом: технологические, образующиеся при синтезе и переработке (составляют от 5 до 35 % мас.); производственного потребления, образующиеся в результате выхода из строя изделий (составляют от 15 до 45 % мас.); бытового потребления, образующиеся в результате морального или физического износа изделий и предметов (составляют ~50 % мас.).

Самыми популярными способами переработки пластиков являются: повторное использование по прямому назначению и пиролиз с целью получения топлива. Они позволяют снизить нагрузку на окружающую среду, сохранить ресурсы и получить новые продукты.

Целью данной работы является получение мономера (лактида) методом термокаталитической деполимеризации из технологических отходов стадий получения и переработки полилактида.

Деполимеризация – процесс превращения макромолекул полимера в исходный мономер или смесь мономеров. В случае разложения полилактида (1) возможно образование различных продуктов (рис. 1): L- и/или D-молочная кислота (2), м-лактид, L, D-лактид, L- и/или D-лактид (3), олигомер молочной кислоты (4), вода.

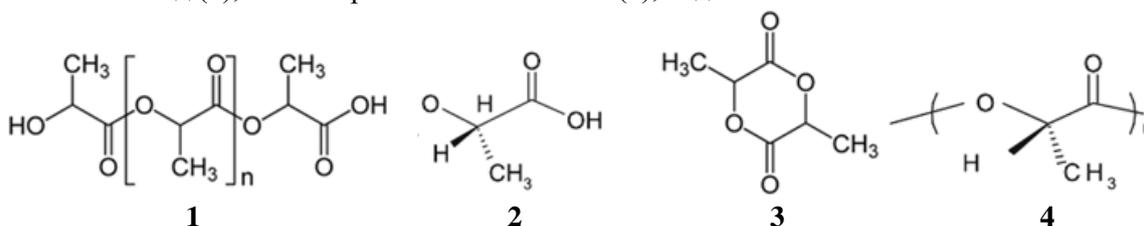


Рисунок 1 – Сырье и продукты термокаталитической деструкции полилактида

На выход мономеров и их соотношение в смеси влияет состав и количество катализатора. В отсутствие катализатора при температуре 230–250 °С и давлении 10 мбар образуется преимущественно D,L-лактид с примесями м-лактида (табл. 1), что подтверждается значениями температуры плавления продукта 121 °С (литературные данные 125 °С). Использование катализатора (например, октоата олова или оксида цинка) при тех же условиях приводит к образованию индивидуальных мономеров лактида L- и/или D-лактид с температурой плавления 95 °С (литературные данные 96 °С).

Таблица 1 – Влияние состава катализатора на выход лактида-сырца ( $\beta_{л-с}$ ) и лактида ( $\beta_{л}$ )

Катализатор/Концентрация, % масс.	$\beta_{л-с}$ , % масс.	$\beta_{л}$ , % масс.	$T_{пл}$ , °C
–	42,3	7,8	120,8
ZnO/1,4	88,3	25,5	89,9
Sn(Oct) <sub>2</sub> /1,6	96,2	56,8	94,4

На фотографиях, приведенных на рисунке 2 видно, что в составе полученных индивидуальных мономеров присутствуют незначительные примеси м- и D,L-лактида, которые отображаются в виде плоских пластинок, в отличие от индивидуальных L- и/или D-лактид, имеющих игольчатую структуру [3].

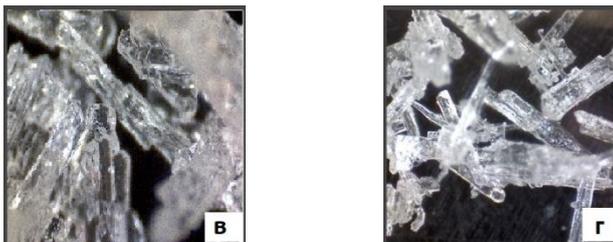


Рисунок 2 – Цифровые фотографии кристаллов лактида при 200-кратном увеличении: в – катализатор Sn(Oct)<sub>2</sub>, г – катализатор ZnO

Известно, что L и D-лактиды имеют противоположное направление вращения плоскости поляризации [4]: угол вращения LL-лактида составляет около  $-262^\circ$ , а DD-лактида соответственно  $+262^\circ$ . Следовательно (табл. 2), полученный нами мономер более чем на 99 % состоит из LL-изомера с незначительной примесью DD-изомера (до 1 %).

Таблица 2 – Характеристика лактида, полученного термokatалитической деполимеризацией полилактида

$\beta_{л}$ , % мас.	Содержание молочной кислоты, % мас.	$T_{пл}$ , °C	Угол вращения, [α]
53,5±13,3	4,6±0,8	92,9±3,4	-260±1,9

Таким образом, было показано, что при термической переработке отходов термопластичного полилактида можно выделить до 50 % (мас.) чистого мономера, который в дальнейшем может быть подвергнут полимеризации с целью получения полимеров различной молекулярной массой.

#### Список литературы

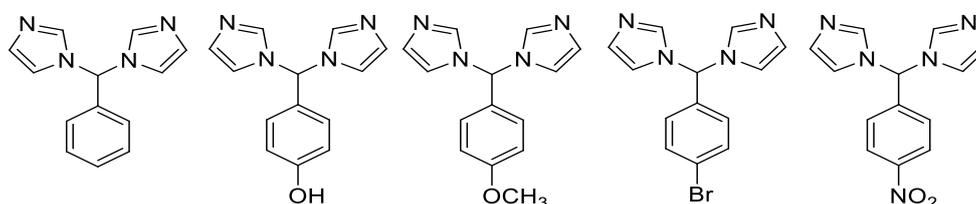
1. Скоротецкий М. С. Рентабельность использования биоразлагаемых полимеров // Успехи в химии и химической технологии. 2011. – Т. XXV. – № 9. С. 44–47.
2. Тимирбаева Г.Р. Биоразлагаемые полимеры: тенденции развития рынка // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 724–727.
3. Карпухин Л.Е., Спиридонова В.М., Бровина Е.А., Самсонова Т.И., Петров А.Г., Шкуренко С.И. Экспресс-метод оценки энантиомерного состава циклических димеров молочной кислоты // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». – 2015. – № 1. – С. 83–92.
4. Алексеенко К.В., Бабкина О.В., Светличный В.А., Изаак Т.И., Новиков Д.В., Новиков В.Т. Разработка методов исследования характеристик полупродуктов и конечных веществ при синтезе лактидов и гликолидов // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 368. – С. 200–203.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА НОВЫХ МУЛЬТИТОПНЫХ ЛИГАНДОВ ПРОИЗВОДНЫХ ИМИДАЗОЛА

*М.А. КЛЮЧЕНКО, В.В. МАТВЕЕВСКАЯ, А.С. ПОТАПОВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: klyuchenkomaksim@mail.ru

Химия полифункциональных лигандов в последнее время развивается быстрыми темпами. Соединения, содержащие несколько азольных фрагментов, соединенных алифатическим линкером, представляют большую синтетическую ценность, поскольку могут выступать в качестве активных хелатирующих агентов для синтеза координационных соединений многих элементов. Такие лиганды способны образовывать как дискретные комплексы различной геометрии, так и металл-органические координационные полимеры. Синтез металл-органических координационных полимеров в последние десятилетия является одним из самых актуальных направлений.



Данная работа посвящена синтезу лигандов на основе имидазола с жестким фениленовым линкером. С целью получения новых мультитопных лигандов на основе имидазола нами были осуществлены реакции между диимидазолилкарбонилем **1** и некоторыми производными бензальдегида с использованием хлорида кобальта ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Схема 1). Синтез проводили в отсутствие растворителя в инертной атмосфере (аргона или азота).

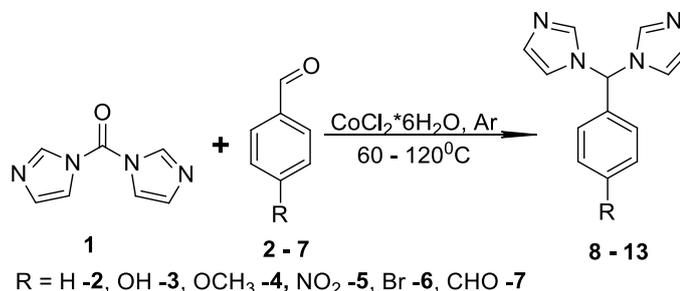


Схема 1 – Общая схема синтеза лигандов

В качестве производных бензальдегида использовались: бензальдегид **2**, 4-гидроксибензальдегид **3**, анисовый альдегид **4**, 4-нитробензальдегид **5**, 4-бромбензальдегид **6** и терефталевый альдегид **7**. Продукты выделялись с помощью колоночной хроматографии с высокими выходами. Структура синтезированных соединений была подтверждена с помощью ИК и ЯМР спектроскопии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00676

### Список литературы

- Day E.S., Bickford L.R., Slater J.H., Riggall N.S., Drezek R.A., West J.L. Antibody-conjugated gold-gold sulfide nanoparticles as multifunctional agents for imaging and therapy of breast cancer // *International Journal of Nanomedicine*. – 2010. – № 5. – P. 445–454.
- Brown H. Sodium aurothiosulfate. A simple method for its preparation // *J. Am. Chem. Soc.* – 1927. – V. 49. – P. 958–959.

## СИНТЕЗ НОВЫХ БИДЕНТАТНЫХ ЛИГАНДОВ НА ОСНОВЕ 4-МЕТИЛПИРАЗОЛА

А.А. КУЗНЕЦОВ, В.В. МАТВЕЕВСКАЯ, А.С. ПОТАПОВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

e-mail: kyz9@tpu.ru

В последние годы синтез новых лигандов на основе N-гетероциклических соединений является одним из самых быстроразвивающихся направлений в органической химии в виду их высокого синтетического потенциала. Одними из таких соединений являются бис(азолил)алканы и различные их производные. Бис(азолил)алканы представляют особый интерес для координационной химии, поскольку являются активными хелатирующими агентами и способны образовывать комплексы со многими элементами. В литературе описаны примеры использования бис(азолил)алканов в качестве лигандов для синтеза координационных соединений металлов платиновой группы, которые обладают значительной противораковой активностью. В спектр биологической активности таких лигандов и комплексов на их основе также входят: антибактериальная, антифунгицидная, нейролептическая, гипотензивная и т.д.

Данная работа посвящена синтезу новых бис(азолил)алканов: 1,2-бис(4-метилпиразол-1-ил)-1,2-этандиола и 1,2-бис(4-метилпиразол-1-ил)-1,2-дихлорэтана.

Известно, что азолы способны взаимодействовать с карбонильными соединениями с образованием продуктов присоединения по атому азота иминогруппы. С целью получения новых 1,2-бис(азол-1-ил)-1,2-этандиолов нами была проведена реакция взаимодействия 4-метилпиразола с 40% водным раствором глиоксаля. Обнаружено, что 4-метилпиразол легко вступает в реакцию присоединения с диальдегидами с образованием 1,2-бис(4-метилпиразол-1-ил)-1,2-этандиола (Схема 1).

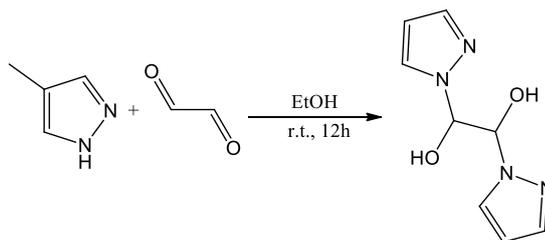


Схема 1 – Синтез 1,2-бис(4-метилпиразол-1-ил)-1,2-этандиола

Для увеличения стабильности и реакционной способности полученного диола гидроксильные группы были заменены на атомы хлора действием хлористого тионила (Схема 2).

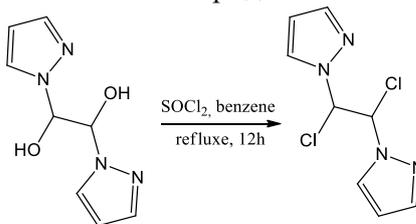


Схема 2 – Синтез 1,2-бис(4-метилпиразол-1-ил)-1,2-дихлорэтана

Полученные соединения являются перспективными лигандами для синтеза координационных соединений. Структура соединений подтверждена методами ЯМР и ИК спектроскопии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00676

## Список литературы

1. Day E.S., Bickford L.R., Slater J.H., Riggall N.S., Drezek R.A., West J.L. Antibody-conjugated gold-gold sulfide nanoparticles as multifunctional agents for imaging and therapy of breast cancer // International Journal of Nanomedicine. – 2010. – № 5. – P. 445–454.
2. Brown H. Sodium aurothiosulfate. A simple method for its preparation // J. Am. Chem. Soc. – 1927. – V. 49. – P. 958–959.

**РАЗРАБОТКА СКРЕТЧ МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Ю.В. ЛЕДОВСКИХ, Е.В. ГУБАРЕВ, Д.О. БЕГЛЕЦОВ, В.К. БЕЛОВ*

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

E-mail: [ledovskih2016@yandex.ru](mailto:ledovskih2016@yandex.ru)

Одним из способов оценки адгезии покрытия является «скретч-тест» (scratch test), этот способ внесен в стандарты и является наиболее перспективным. Основным стандартом в этой области является стандарт ISO 20502:2005 [1], рисунок 1.

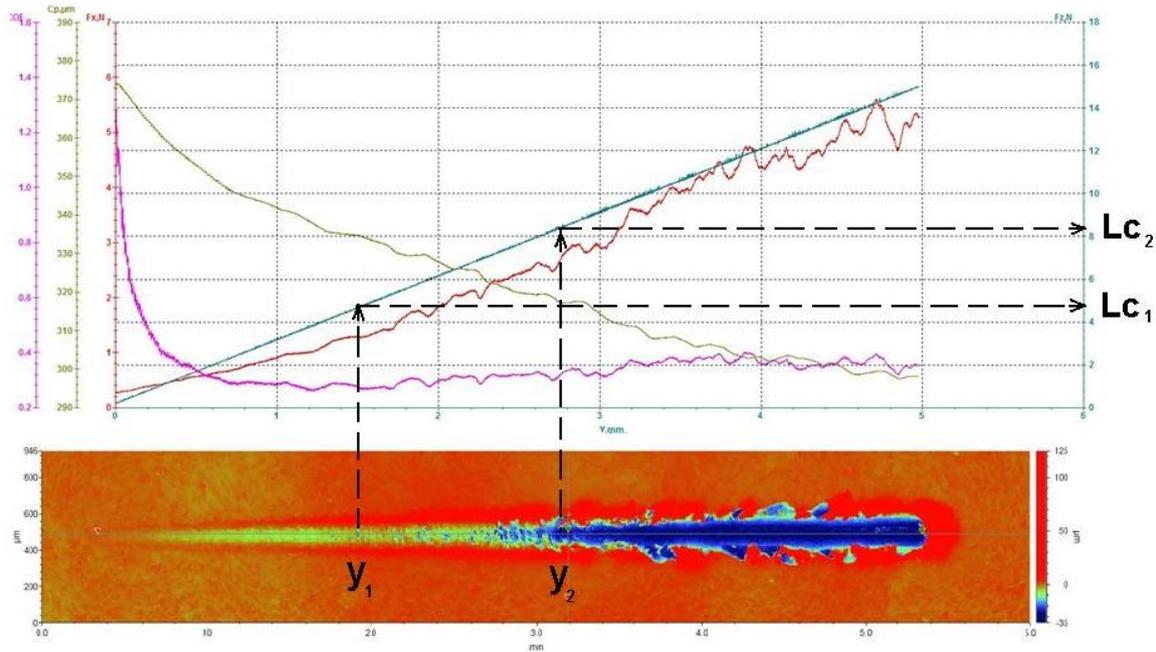


Рисунок 1 – Скретч тест по методике стандарта ISO 20502:2005

Методика склерометрических испытаний, основана на непрерывном нагружении материала, его деформировании в упругой и упругопластической областях до предельного состояния и последующем разрушении путем горизонтального перемещения индентора, предварительно внедренного на определенную глубину. Данное измерение невозможно провести «вручную». Поэтому мы использовали комплект оборудования для определения физико-механических свойств материалов UMT – 1 (Bruker, Германия). Оборудование позволяет изменять нагрузку на индентор и регулировать скорость царапания. Также для фиксации различных стадий разрушения используется оптический профилометр Contour GT K1 (Bruker, Германия).

Далее было произведено исследование прочностных характеристик полимерного покрытия с помощью известной методики Оливера и Фарра [2] стандарт ISO 14577-1:2002 или ГОСТ Р 8.748-2011 [3] (см.рис. 2) на оборудование для определения физико-механических свойств материалов UMT – 1 (Bruker, Германия). Отличие методика Оливера и Фарра от традиционных методов оценки твёрдости заключается в учёте и выделении упругой составляющей деформации материала при внедрении индентора в материал. Также данная методика позволяет измерить твердость самого покрытия, а не характеристики подложки.

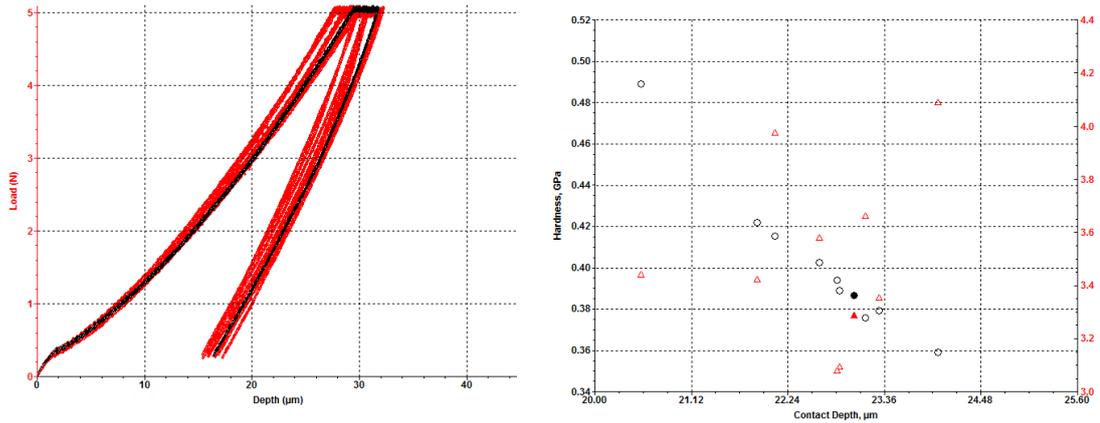


Рисунок 2 – Результаты измерения твердости по методике Оливера и Фарра

Сопоставление результатов «скретч теста» и твёрдости покрытия определённой по методу Оливера и Фарра дают комплексную оценку состояния полимерного покрытия.

#### Список литературы

1. ISO 20502:2005 «Керамика тонкая (высококачественная керамика, высококачественная техническая керамика). Определение прочности сцепления керамических покрытий методом склероскопического испытания».
2. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments //J. Mater. Res. - 1992.-7. №6.-P. 1564-1583.
3. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002) ГСИ. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ В СИСТЕМЕ SI-C-N-O

*А.Р.НАСЫРБАЕВ, С.О.ПОГОРЕЛОВА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: arn1@tpu.ru

Одними из материалов, которые удовлетворяют многим потребностям современного производства, являются карбиды и нитриды кремния. Высокая тугоплавкость, химическая стойкость и высокая твердость, позволяют использовать карбид и нитрид кремния при производстве абразивных материалов [1]. Замечательные тепловые свойства, в совокупности с высокими показателями твердости и прочности, позволяют использовать SiC и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при производстве высокопрочной керамики [2].

Особое значение в последнее время приобрела проблема синтеза нанодисперсных материалов. Это связано с тем, что вещество в наноразмерном состоянии способно проявлять уникальные сочетания механических, тепловых, электрических, оптических и других свойств, отличных от аналогичных крупнозернистых образцов [3]. Еще одним важным развивающимся направлением является синтез тройных систем. Например, в системе Si-C-N возможно получение карбонитрида кремния, сочетающего в себе свойства карбида и нитрида кремния [4].

В настоящее время существует много способов производства нанопорошков, но они неэффективны из-за ряда факторов: высокая стоимость используемых прекурсоров, большие издержки производства и др. В работе применяется метод прямого динамического синтеза в гиперскоростной струе кремний-углеродной электроразрядной плазмы. Генерация плазменного потока осуществляется посредством коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) с графитовыми электродами.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования влияния внешней газообразной среды на структурно-фазовый состав нанокристаллического SiC. Были проведены 4 серии экспериментов с различной газовой средой камеры-реактора: 1 – аргон; 2 – воздух; 3 – азот; 4 – аргон и воздух.

В процессе проведения экспериментов были получены порошкообразные продукты, которые анализировались несколькими методиками. Методом рентгеновской дифрактометрии были получены дифрактограммы, приведенные на рисунке 1. Продукт, полученный в воздушной атмосфере, состоит лишь из одной фазы – оксида кремния, который на рентгенограмме дает один аморфный рефлекс. Несколько иная картина получена в экспериментах со смесью воздуха и аргона: продукт включает в себя, помимо преимущественного оксида кремния, фазы кубического карбида кремния β-SiC и кубического кремния. При этом продукт, полученный в инертной среде, отличается высоким содержанием искомой фазы кубического карбида кремния (свыше 90 %, согласно полнопрофильному анализу). При истечении в азотную среду дифрактограмма продукта схожа с атмосферой аргона, однако наблюдается появление пиков интенсивности, принадлежащих гексагональной фазе нитрида кремния.

Результаты рентгеноструктурного анализа подтверждаются результатами просвечивающей электронной микроскопии. На рисунке 2-а изображено скопление частиц продукта, полученного при истечении плазменной струи в воздушную атмосферу. В этом случае образуются лишь частицы оксида кремния, имеющие характерную для аморфного материала сферическую форму. При истечении плазменного потока в смесь воздуха и аргона, помимо сферических частиц диоксида кремния, которые становятся более дисперсными, имеются частицы карбида кремния. Микроснимки, полученные в аргоновой и азотной атмосферах, схожи по морфологии. Частицы кубической фазы карбида кремния принимают формы многоугольников с усеченными вершинами. Интересен факт того, что в азотной атмосфере образуются частицы с сильно искаженной структурой (рисунок 2-б), что может говорить о внедрении атомов азота в кристаллическую решетку карбида кремния [5].

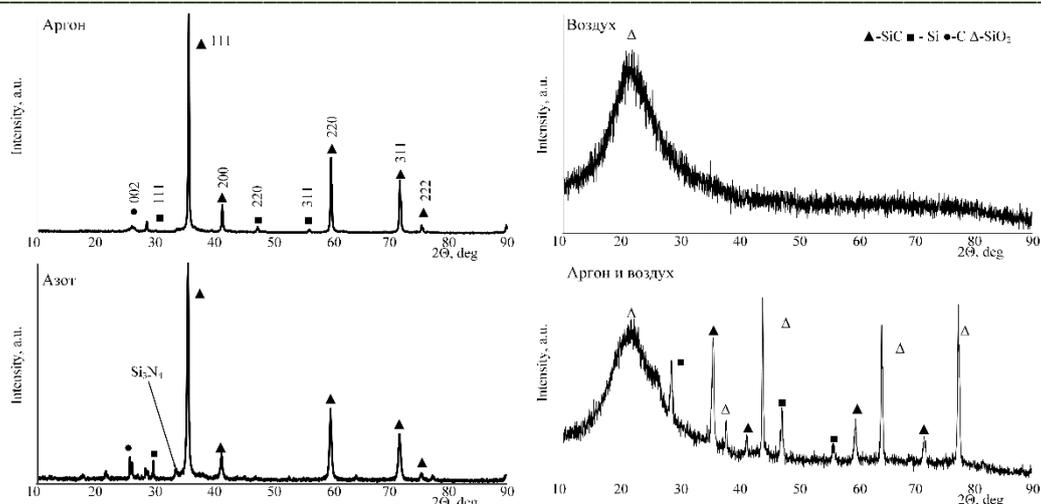


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы продукта синтеза при истечении в газовую среду: а – аргон; б – воздух; в – азот; г – аргон и воздух

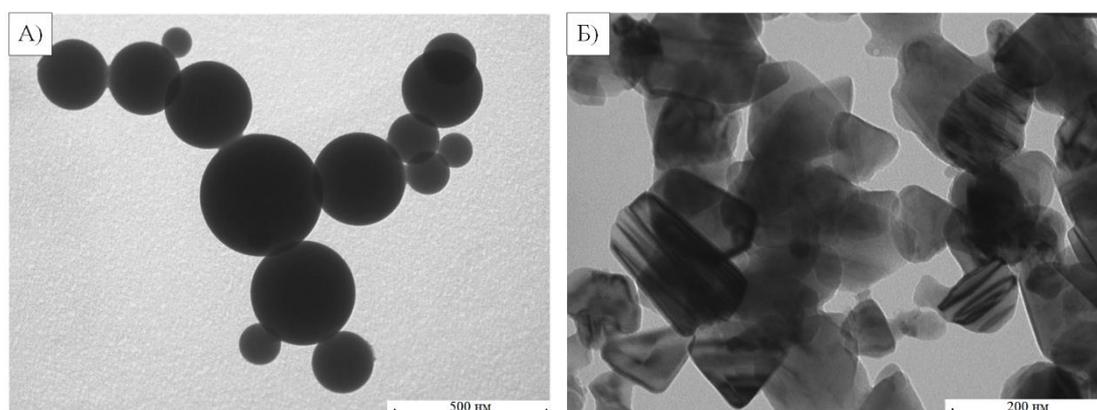


Рисунок 2 – Результаты просвечивающей микроскопии продуктов при истечении в газовую среду: а – воздух; б – азот

Результатом работы стало исследование возможности синтеза продуктов системы Si-C-N-O методом прямого плаздинамического синтеза. Получены нанодисперсные порошкообразные продукты, содержащие фазу  $\beta$ -SiC. Была изучена возможность синтеза частиц тройной системы Si-C-N в азотной атмосфере камеры-реактора. Выявлено, что при истечении плазменного потока в воздушную атмосферу камеры реактора происходит окисление прекурсорных фаз углерода и кремния.

#### Список литературы

1. Vocanegra-Bernal M.H., Matovic B. Mechanical properties of silicon nitride-based ceramics and its use in structural applications at high temperatures //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Т. 527. – №. 6. – С. 1314-1338.
2. Андриевский Р.А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства //Успехи химии. – 2009. – Т. 78. – №. 9. – С. 889-900.
3. Klabunde K. J. Introduction to nanotechnology //Nanoscale Materials in Chemistry. – 2001. – С. 1-13.
4. Yin X. et al. Electromagnetic properties of Si-C-N based ceramics and composites //International Materials Reviews. – 2014. – Т. 59. – №. 6. – С. 326-355.
5. Li Q., Yin X., Feng L. Dielectric properties of Si3N4-SiCN composite ceramics in X-band //Ceramics International. – 2012. – Т. 38. – №. 7. – С. 6015-6020.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛ ПЛАВЛЕНОГО СВАРОЧНОГО ФЛЮСА ДЛЯ НАПЛАВКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ГРАНУЛИРОВАНИИ

*С.В. НАУМОВ, А.О. АРТЕМОВ, М.Н. ИГНАТОВ, К.И. БЕЛОУСОВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: NaumovStanislav@yandex.ru

Сварочные материалы являются неотъемлемой частью современного сварочного производства. Особенным спросом пользуются сварочные материалы на минеральной основе, а именно покрытые электроды, порошковые проволоки, сварочные флюсы различного назначения. При сварке ответственных конструкций и строительных конструкций общего назначения требуется использование качественных сварочных материалов с высокими сварочно-технологическими свойствами. С этой целью улучшается химический состав сварочных материалов для стабильности горения дуги и благоприятного протекания физико-химических реакций в процессе сварки. Совершенствуются также и способы изготовления сварочных материалов для снижения энерго- и материальных затрат и повышения сварочных свойств в целом [1].

При наплавке в основном используются сварочные материалы с высоким коэффициентом наплавки, который достигается за счет добавления металлического порошка в электродообразующую смесь при изготовлении покрытых электродов или в шихту при изготовлении керамического флюса [2, 3]. На рисунке 1 представлены гранулы, полученные гранулированием металлической пластины с подложкой из минерального сырья с помощью высококонцентрированного источника тепла (плазменной дуги).

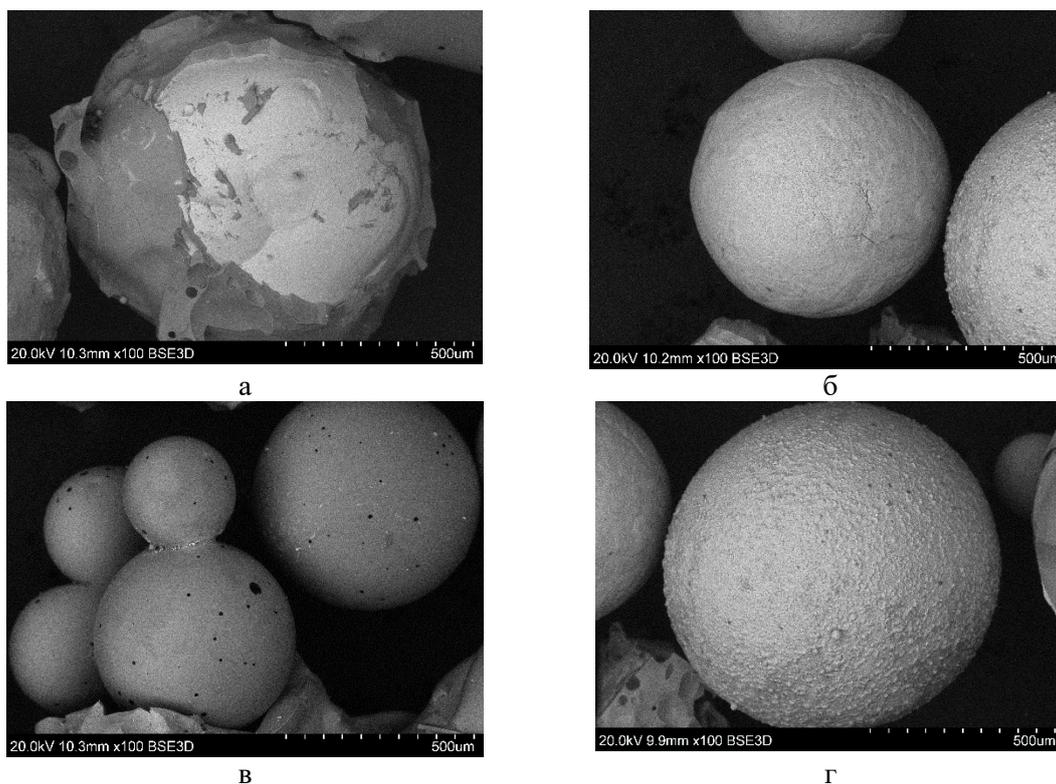


Рисунок 1 – Образование различных по морфологии и химическому составу гранул сварочного флюса,  $\times 100$ : а – гранула на металлической основе покрытая частично шлаком; б – гранула, покрытая шлаком; в – пористые гранулы на шлаковой основе; г – гранула из окисленного металла

Под воздействием плазменной дуги, зажигаемой на пластине из стали 20 толщиной не более 1 мм совмещенной с подложкой толщиной 10-15 мм из минерального сырья на оксидосиликатной основе [4, 5] замешанного на жидком натриевом стекле, происходило распыление металлического слоя с последующим расплавлением подложки и образованием гранул, покрытых уже оксидосиликатной основой (рис. 1, а, б). Для получения гранул сварочного флюса использовался плазмотрон HyperTherm Powermax 45. Для изучения морфологии и исследования химического состава гранул использовался электронный микроскоп Carl Zeiss EVO50, результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты химического анализа гранул сварочного плавяного флюса

Гранулы на рис. 1	Химический состав, масс. %									
	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
а (шлак)	35,35	2,14	3,19	2,76	12,45	4,53	0,38	0,58	0,19	38,42
а (металл)	5,29	1,46	0,62	0,39	1,04	0,18	-	-	-	91,02
б	28,92	0,96	0,96	0,76	3,79	1,61	0,08	0,35	0,30	62,27
г	22,01	0,56	0,08	0,11	0,63	0,72	-	-	0,16	75,73

Высокое содержание оксида натрия обусловлено использованием связующего жидкого натриевого стекла для смешивания оксидосиликатной основы подложки и скрепления с металлической пластиной. Магний, алюминий и другие оксиды металлов присутствуют в небольшом количестве, т.к. изначально почти отсутствовали в подложке из минерального сырья, а также частично выгорали под воздействием плазменной дуги. Если шлаковая корка образовывалась на поверхности гранул, то содержание железа превышало более 90 масс. % в центре гранулы. В противном случае без образования шлака на поверхности гранул железо окислялось и содержание достигало до 75,73 масс. % (рис. 1, г).

Таким образом предложен способ получения сварочного плавяного флюса для наплавки при помощи высококонцентрированного источника тепла (плазменной дуги). При получении гранул плавяного флюса, которые содержат как шлаковую, так и металлическую основу, можно варьировать различные свойства, состав и морфологию гранул в широких пределах, получая сварочные материалы широкого применения.

#### Список литературы

1. Kartsev D.S., Zernin E.A., Use of Refractory Nanoparticles as a Component of Welding Materials in Welding and Surfacing with Coated Electrodes and Flux Cored Wires, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 142, Issue 1, 2016.
2. Игнатов М.Н., Игнатова А.М., Наумов С.В. Патент РФ № 2497646 МПК В 23 К 35/36, опубл. 10.11.2013. «Минеральный сплав для покрытий сварочных электродов».
3. Игнатов М.Н., Игнатова А.М., Наумов С.В. Патент РФ №2504465 МПК В 23 К 35/365 опубл. 20.01.2014. «Электродное покрытие».
4. Наумов С.В., Игнатова А.М. Исследование физико-химических процессов, протекающих при сварке в сварочных материалах на основе техногенных образований // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 150-153
5. Артемов А.О., Наумов С.В., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Минералогическая характеристика техногенных минеральных ресурсов Урала и Предуралья для их переработки петругрией // Георесурсы. – 2012, №6 (48)

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ПРИ ВВЕДЕНИИ ПЛАСТИФИКАТОРА

С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>, В.О. АЛЕКСЕНКО<sup>1,2</sup>, Д.Г. БУСЛОВИЧ<sup>1,2</sup>, Ю.В. ДОНЦОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладая приемлемыми для полимеров характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износо- и химической стойкостью в агрессивных средах, используется для изготовления узлов трения машин и механизмов, а также широко используется в медицине в качестве узлов ортопедических имплантатов [1]. Однако, из-за большой длины полимерных цепей СВМПЭ имеет чрезвычайно низкий показатель текучести расплава (ПТР - 0,06 г/10 мин) [2], что существенно сдерживает возможности его переработки традиционными для полимеров методами производства, такими как шнековая экструзия, литье под давлением и др. Таким образом, вопросы повышения технологичности (экструдированности) композитов на основе высокомолекулярной матрицы, в частности СВМПЭ, остаются нерешенными.

Выбор полимерных компонент для введения в матрицу сверхвысокомолекулярного ПЭ с целью увеличения технологичности (экструдированности) СВМПЭ обусловлен поиском доступных (промышленно выпускаемых) наполнителей. Это позволит разработать износостойкие экструдированные полимерные композиты для 3D-технологий производства прочных и износостойких изделий сложной формы для трибоузлов в машиностроении и медицине.

В работе исследовали полимер-полимерные композиции на основе СВМПЭ, наполненные промышленно выпускаемым полипропиленом марки 21030. Образцы изготавливали горячим прессованием двухкомпонентных композиций и методом 3D-печати из гранул, полученных путем помола экструдата, после экструзионного смешения тех же полимерных компонентов. Задача исследования – оценить влияние способа и режимов изготовления на формирование надмолекулярной структуры, механические и триботехнические свойства.

В работе использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) фирмы Ticona (GUR-4120) молекулярной массой 4,0 млн и размером частиц порошка 15–50 мкм, порошок полипропилена ПП21030 (размер порошка ~100–200 мкм). Гранулы СВМПЭ после экструзионного смешения имели размер 3–5 мм. Образцы полимерных композитов получали компрессионным спеканием при давлении 10 МПа и температуре 200 °С со скоростью последующего охлаждения 5 °С/мин. Методом 3D-печати из гранул, полученных путем помола экструдата, после экструзионного смешения тех же полимерных компонентов, были получены образцы размером 65×70×10 мм.

На основании полученных результатов (рис. 1) показано, что износостойкость полимер-полимерных композиций на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена при умеренных скоростях скольжения (0,3 м/с) и нагрузках (60 Н) остается на уровне чистого СВМПЭ. При большой скорости и нагрузке на образец (140 Н) происходит кратное возрастание износа СВМПЭ и всех композиций на его основе (в 5-10 раз). Из рис. 1 видно, что величины износа композитов на основе СВМПЭ, полученных экструзионным смешением и дальнейшей 3D-печатью, при нагрузках  $P=60$  Н и 140 Н и скоростях скольжения  $V=0,3$  м/с и 0,5 м/с близки таковым для композитов, полученных спеканием порошковых смесей.

Упругое восстановление [3] композитов незначительно меньше, чем у чистого СВМПЭ (снижается с 46,5 % до 19,6 % при скорости 0,3 м/с и нагрузке 60 Н).

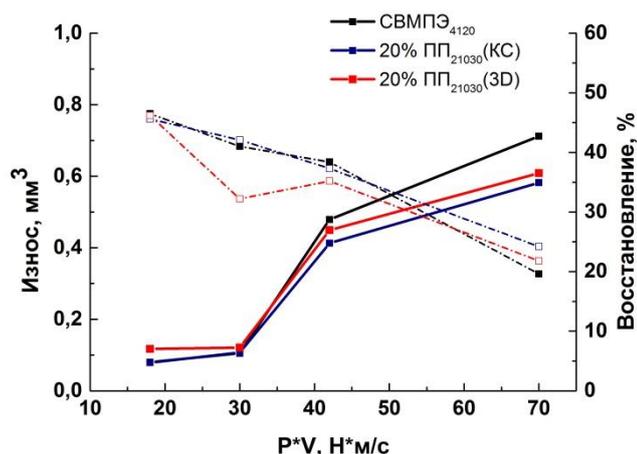


Рисунок 1 – Величина износа (мм<sup>3</sup>) и упругого восстановления (%) для СВМПЭ и композиций «СВМПЭ+20 вес.% ПП» полученных методом компрессионного спекания (КС) и 3D-печатью, в условиях сухого трения скольжения при скоростях 0,3 и 0,5 м/с, при нагрузках 60 и 140 Н на стадии установившегося изнашивания

Температура контртела (табл. 1.) при скорости трибонагружения 0,3 м/с в композите с полимерным наполнителем практически не изменяется и находится в пределе  $T=28\pm 2$  °С. При увеличении скорости до 0,5 м/с на поверхности ненаполненного СВМПЭ формируются наплывы и складки. С повышением нагрузки до 140 Н температура для всех композитов увеличивается до  $51\pm 2$  °С.

Таблица 1 – Значения температуры контртела после окончания трибоиспытаний СВМПЭ и композитов на его основе в различных условиях трибонагружения

Состав	Температура контртела °С			
	18 Н*м/с	30 Н*м/с	42 Н*м/с	70 Н*м/с
СВМПЭ	28	32	38,5	53
СВМПЭ+20%ПП (горячее прессование)	26,6	30,1	34,7	43,1
СВМПЭ+20%ПП (3D-печать)	27,2	32,1	32,3	43,5

В данной работе были определены приемлемые условия трибонагружения (скорость, нагрузка) для материалов из экструдированных полимер-полимерных композиций на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для машиностроения и медицины.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" Министерства образования и науки РФ; Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154.

#### Список литературы

1. Kurtz S.M. The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement. – L.: Academic press, 2004. 379 p.
2. Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Buslovich D.G., and Dontsov Yu.V. Extrudable polymer-polymer composites based on ultra-high molecular weight polyethylene // AIP Conf. Proc. – 2017. 1915. pp 020005-1–020005-5.
3. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Возняк Ю.В. Эффект памяти формы в полимерах. // Успехи химии. – 2005. – Т.74. – № 3. – С. 285-303

## ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ В СИСТЕМЕ Ti-B-N

С.О. ПОГОРЕЛОВА, А.Р. НАСЫРБАЕВ

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: sop2@tpu.ru

Покрyтия системы Ti-B-N хорошо известны благодаря превосходному потенциалу этих покpытий во многих промышленных применениях, поскольку обладают такими свойствами, как высокая твердость, высокая ударная вязкость, высокая термодинамическая стабильность с химической инертностью, хорошая коррозионная устойчивость и износостойкость [1-3]. В настоящее время существует множество способов синтеза в системе Ti-B-N: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, механический синтез, метод ультразвукового импульсного электроосаждения [4,5]. Сам по себе TiN не обладает уникальной высокой твердостью и износостойкостью, однако в сочетании с TiB<sub>2</sub> – система Ti-B-N может показывать превосходную твердость (до 55 ГПа) и хорошую устойчивость к коррозии [6].

В данной работе для получения фаз системы Ti-B-N используется метод прямого плазмодинамического синтеза в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе (КМПУ). Было проведено 3 серии экспериментов с аргоном Ar для сравнения с 3 сериями экспериментов с использованием азота N<sub>2</sub> в качестве атмосферы камеры-реактора при различном способе инициации дугового разряда: 1) с использованием титановых проводников; 2) с использованием углеволокон; 3) графитизация.

Полученный продукт был исследован методом рентгеновской дифрактометрии. Рентгеновские дифрактограммы представлены на рисунке 1. Количественный анализ продукта был получен после исследование дифрактограмм программой PowderCel. Результаты количественного анализа экспериментов с использованием аргона и с использованием азота представлены в таблице 1 и таблице 2 соответственно.

Сложность идентифицирования рентгеновских максимумов интенсивности нитрида титана TiN заключается в их полном совпадении с максимумами моноборида титана TiB, что представляет практически невозможным оценивание данной фазы в отдельности. В азотной атмосфере побочная фаза Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> полностью отсутствует. С изменением способа инициации дугового разряда изменяются интенсивности пиков, а соответственно и выходы фаз TiB<sub>2</sub>, TiB/TiN. В аргоновой атмосфере наилучший эксперимент для получения TiB<sub>2</sub> является эксперимент с графитизацией и выходом TiB<sub>2</sub> 93,2 %. В азотной же атмосфере наоборот: в эксперименте с использованием графитизации выход TiB<sub>2</sub> наименьший – 60,1%, но выход TiB/TiN наибольший – 39,9 %. Средний размер всех частиц не превышает 100 нм, что позволяет нам сделать вывод о том, что получен порошок с наноструктурой.

Таблица 1 – Количественный анализ экспериментов с использованием аргона

Способ инициации	Атм.	Фазовый состав, %			ОКР, нм		
		TiB	TiB <sub>2</sub>	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiB	TiB <sub>2</sub>	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ti-проводники	Ar	66,2	26,8	7,0	22,5	46,7	20,5
Углеволокна	Ar	21,2	62,1	16,7	18,4	61,1	35,5
Графитизация	Ar	6,8	93,2	-	16,7	56,1	-

Таблица 2 – Количественный анализ экспериментов с использованием азота

Способ инициации	Атм.	Фазовый состав, %		ОКР, нм	
		TiB/TiN	TiB <sub>2</sub>	TiB/TiN	TiB <sub>2</sub>
Ti-проводники	N <sub>2</sub>	22,9	77,1	25,3	77,0
Углеволокна	N <sub>2</sub>	15,2	84,8	20,8	69,0
Графитизация	N <sub>2</sub>	39,9	60,1	37,2	79,9

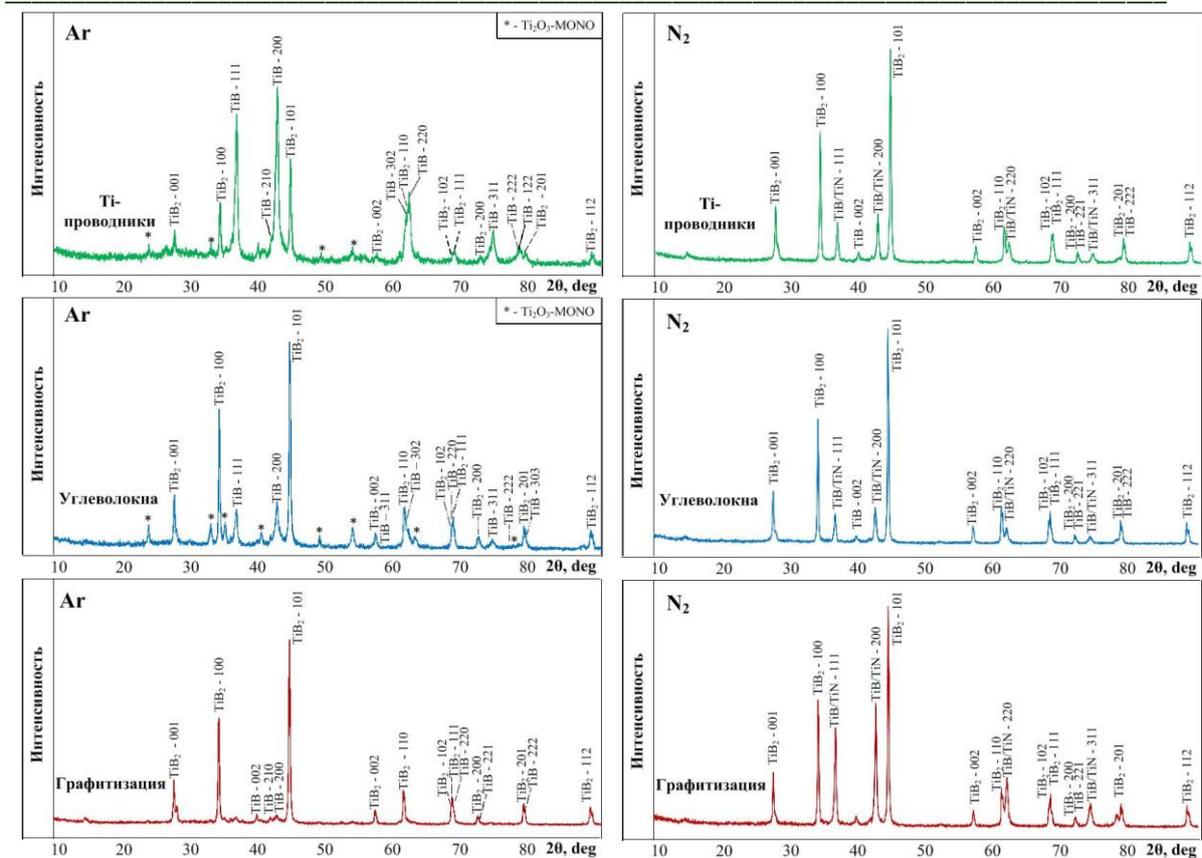


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы продукта, синтезированного в аргонной и азотной атмосфере при различных способах инициации дугового разряда

С помощью КМПУ был синтезирован порошок системы Ti-B-N. В результате проведенных серий экспериментов был получен композитный материал, состоящий из фаз TiB<sub>2</sub>, TiB и TiN. Результаты показали, что для получения наибольшего выхода TiB<sub>2</sub> следует использовать графитизацию и аргоновую атмосферу камеры-реактора, а для получения наибольшего выхода фаз TiB<sub>2</sub>-TiN-TiB графитизацию в азотной атмосфере.

### Список литературы

1. Zhou S. Y. et al. Effects of modulation period on microstructure, mechanical properties of TiBN/TiN nanomultilayered films deposited by multi arc ion plating // Vacuum. – 2016. – Т. 126. – С. 34-40.
2. Aouadi S. M. et al. Characterization of TiBN films grown by ion beam assisted deposition //Surface and Coatings Technology. – 2002. – Т. 160. – №. 2-3. – С. 145-151.
3. He Y. et al. Effect of prior plasma nitriding applied to a hot-work tool steel on the scratch-resistant properties of PACVD TiBN and TiCN coatings //Surface and Coatings Technology. – 2006. – Т. 201. – №. 6. – С. 2534-2539.
4. Zhou S. Y. et al. Influence of modulation period and modulation ratio on structure and mechanical properties of TiBN/CrN coatings deposited by multi-arc ion plating // Applied Surface Science. – 2015. – Т. 351. – С. 1116-1121.
5. García-González L. et al. Structure and mechanical properties of TiBN coatings fabricated by dc reactive sputtering technique //Journal of materials processing technology. – 2007. – Т. 186. – №. 1-3. – С. 362-366.
6. Son M. J. et al. Properties of TiBN coating on the tool steels by PECVD and its applications //Journal of materials processing technology. – 2002. – Т. 130. – С. 266-271.

## О НОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ 4-АРИЛАМИНО-1,2-НАФТОХИНОНОВ

*Т.А. РУКОВЕЦ<sup>1,2</sup>, О.И. ФОМИНЫХ<sup>1</sup>, Ю.Г. ХАЛЯВИНА<sup>1</sup>, Л.М. ГОРНОСТАЕВ<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева

<sup>2</sup>Красноярский государственный медицинский университет

им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого

E-mail: tatyana\_xim@mail.ru

Известно, что производные 1,2-нафтохинонов применяются для получения практически важных веществ; некоторые из них находят применение в качестве лекарств [1] или перспективны для изучения их биологической активности [2-3]. Поэтому исследования в области функционализации 1,2-нафтохинонов являются актуальными.

Нами найдены новые реакции 4-ариламино-1,2-нафтохинонов. Установлено, что 4-ариламино-1,2-нафтохиноны (**1**) при многочасовом кипячении в водной уксусной кислоте изомеризуются в 2-ариламино-1,4-нафтохиноны (**2**) (схема 1). Предложен механизм изомеризации **1**→**2** (схема 2).

Схема 1

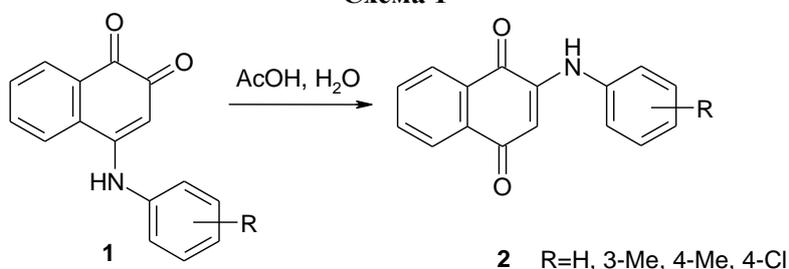
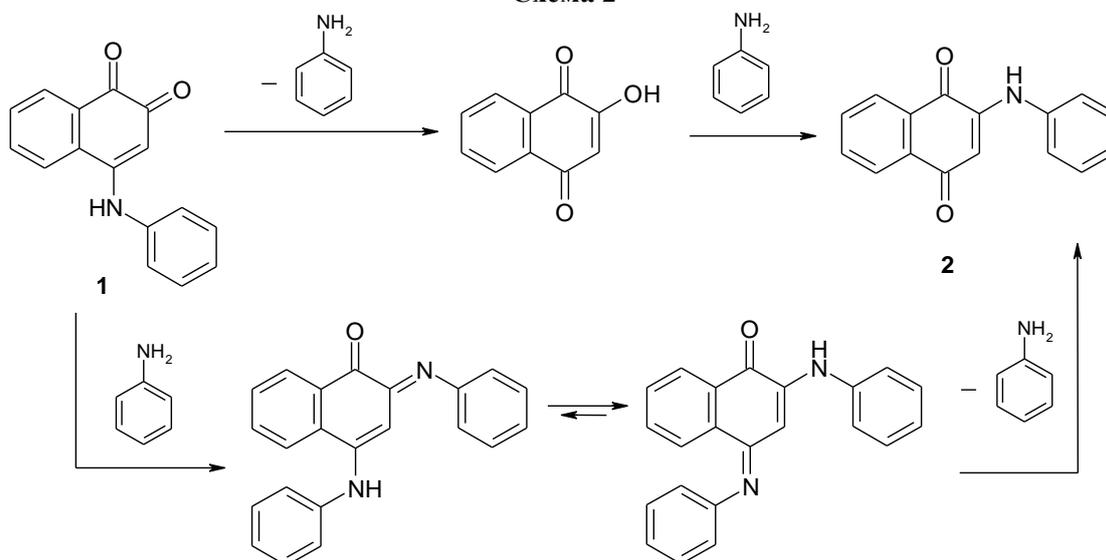
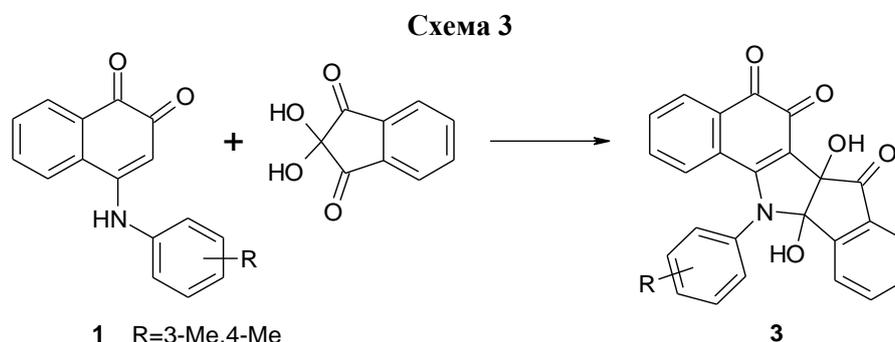


Схема 2



Установлено также, что 4-ариламино-1,2-нафтохиноны (**1**) реагируют с нингидрином превращаясь в 12-арил-6b,11b-дигидрокси-11b,12-дигидробензо[g]индено[1,2-b]индол-5,6,7(6bH)-трионы (**3**), содержащие пиррольный фрагмент (схема 3). Как известно [4]

полициклические хиноны, содержащие пиррольный цикл, проявляют различные виды биологической активности.



Ход реакций и структура полученных продуктов подтверждена различными физико-химическими методами. Полагаем, что вещества **3** перспективны в плане изучения их биологической активности.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00663.*

#### Список литературы

1. Гринев А.Н., Урецкая Г.Я., Архангельская Н.В., Кричевский Э.С., Сахащик З.М., Першин Г.Н., Богданова Н.С., Николаева И.С. Способы получения 6-бром-1,2-нафтохинона (бонафтона) // Патент СССР №522170. 1976. Бюл. №27.
2. Горностаев Л. М., Арнольд Е. В., Лященко Т.А. Синтез 7-оксидов бензо[а]феназин-5,6-диона. Химия гетероциклических соединений // Химия гетероциклических соединений. – 2013. – №48. – С.1972-1975.
3. Горностаев Л. М., Руковец Т. А., Арнольд Е. В., Лаврикова Т. И., Халявина Ю. Г., Крюковская И. С. О реакциях 7-оксидов бензо[а]феназин-5,6-дионов с метанольным раствором щелочи и пирролидином // Химия гетероциклических соединений. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 166–169.
4. Reddy H.R., Reddy C.V.S., Subashini R., Roopan S.M. Fluorescent and antioxidant studies of effectively synthesized isochromenopyrrolone analogues // RSC Advances – 2014. – №4. – P. 29999-30003.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

*А.Е. СЕИЛКАНОВ, О.А. МИРЮК*

Рудненский индустриальный институт

E-mail: psm58@mail.ru

Состояние производства вяжущих веществ определяет уровень современного строительства. Эффективному развитию отрасли способствуют экономия материальных и топливно-энергетических ресурсов, расширение ассортимента при стабильно высоком качестве вяжущих веществ. Истощение природных запасов предопределяет кардинальное изменение сырьевой базы за счет освоения техногенных источников. Логическим продолжением разработок последних десятилетий по замене дефицитного сырья отходами является оптимизация технологических решений при многоплановом использовании техногенных материалов [1, 2].

При обогащении скарново-магнетитовых руд выделяются хвосты сухой магнитной сепарации (СМС), представляющие собой щебневидный материал с размером зерен до 25 мм. Хвосты СМС имеют стабильный химический состав, мас. %: SiO<sub>2</sub> 40 – 45, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10 – 12, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15 – 17, CaO 12 – 13, MgO 5 – 6, S 2 – 3, R<sub>2</sub>O 2 – 4. Минеральную основу отходов образуют пироксены, амфиболы, гранаты, полевые шпаты, скаполит, эпидот, хлорит; присутствуют: пирит, магнетит, примеси кварца [3].

Интенсивная разработка месторождений увеличивает объемы отходов обогащения руды, основная масса которых направляется в отвалы. Рациональная утилизация отходов обогатительных производств имеет большое значение для железорудного региона.

Цель работы – исследование влияния хвостов СМС на образование и свойства цементных клинкеров различного состава.

Синтезированы клинкеры на основе сырьевых смесей с различным содержанием хвостов СМС, таблица 1. В смесях серии К отходы выполняют роль железосодержащего и алюмосиликатного компонентов. Смесей серии Ж получены при замене хвостами СМС в контрольной серии П только железистого компонента – пиритных огарков. Полученные цементы характеризуются высокими прочностными показателями. Повышенная гидравлическая активность низкоосновных клинкеров (КН = 0,77 – 0,87) обусловлена высокотемпературным белитообразованием, легированием фаз примесями, вносимыми техногенным компонентом.

Таблица 1– Прочностные характеристики цементов

Серия цемента	КН	Модули		Предел прочности при сжатии, МПа, образцов размером 2×2×2 см, в возрасте, сут		
		п	р	2	7	28
К – 1	0,95	2,5	0,9	95	103	125
К – 2	0,87		0,9	83	90	110
К – 3	0,77		0,9	50	70	105
Ж – 1	0,95		1,2	101	108	118
Ж – 2	0,87		1,2	81	95	110
Ж – 3	0,77		1,2	54	73	100
П – 1	0,95		1,2	78	85	110
П – 2	0,87		1,2	77	82	110
П – 3	0,77		1,2	48	60	95
Контрольный М 550				90	108	120

Эффективность введения хвостов СМС можно оценить по теоретическому расходу теплоты на физико-химические превращения в смеси. Тепловой эффект клинкерообразования (ТЭК) определен как алгебраическая сумма теплоты эндотермических

процессов (декарбонизация известняка, дегидратация минералов глины, образование жидкой фазы) и экзотермических реакций (окисление пирита, вносимого хвостами СМС, формирование клинкерных фаз).

Наличие кальциевых и магниевых силикатов в хвостах СМС способствует сокращению тепловых затрат на декарбонизацию в смесях равной основности на 4 – 11 %. Экономия теплоты на диссоциацию карбонатов достигается также при изменении коэффициента насыщения от 0,95 до 0,77; для смесей серий К, Ж, и П экономия равна соответственно 165, 151 и 116 кДж/кг клинкера. Примечательно, что теоретический расход теплоты для высокоосновных хвостосодержащих смесей К – 1 и Ж – 1 меньше, чем для смеси низкой основности П – 3 из традиционного сырья.

По мере исключения из сырьевой смеси глины сокращаются тепловые затраты на дегидратацию минералов, и экономия достигает 47 – 150 кДж/кг клинкера. Весомую часть тепловых расходов в хвостосодержащих смесях компенсирует тепло, выделяемое при окислении пирита. Энергетическая выгода от присутствия пирита в шихтах с хвостами СМС сопоставима или превышает таковую от снижения основности для смесей составов П – 1 и П – 3. Эффективность смесей с отходами иллюстрирует изменение удельного расхода топлива на клинкерообразование, рисунок 1. При введении в сырьевую смесь хвостов СМС экономия топлива на ТЭК составляет 7,4 – 21,6 кг/т клинкеров одинаковой основности.

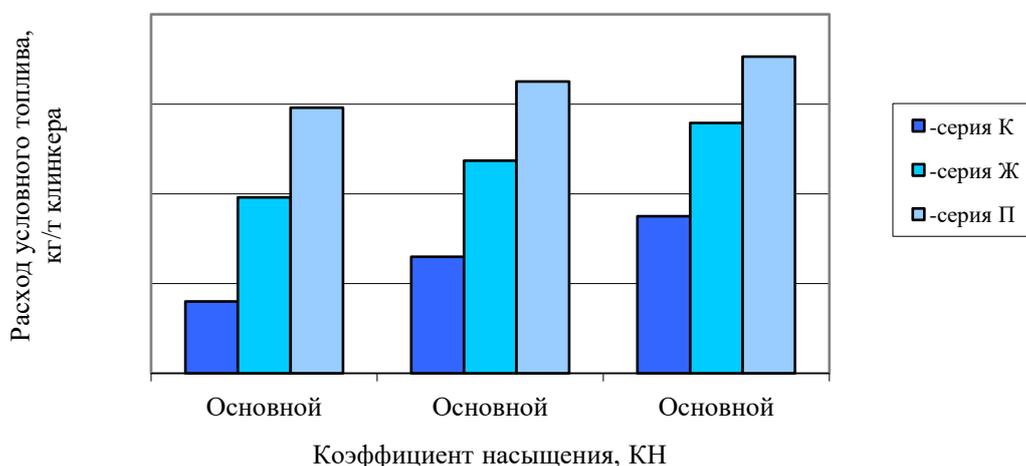


Рисунок 1 – Удельный расход топлива на клинкерообразование при обжиге смесей с различным содержанием хвостов СМС

**Выводы.** Основные преимущества использования отходов обогащения скарно-магнетитовых руд в производстве вяжущих веществ: расширение сырьевой базы за счет техногенного источника; экономия природного сырья при сохранении качества вяжущих веществ; снижение топливно-энергетических затрат на обжиг материалов; рациональная утилизация многотоннажных отходов; уменьшение вредного влияния производственных выбросов в результате сокращения расхода карбонатного сырья и топлива.

#### Список литературы

1. Классен В.К., Борисов И.Н., Мануйлов В.Е. Техногенные материалы в производстве цемента.– Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 126 с.
2. Таймасов Б.Т., Худякова Т.М., Жаникулов Н.Н. и др. Процессы клинкерообразования в малоэнергоёмких сырьевых шихтах // Цемент и его применение. – 2018. – № 1. – С. 34 – 37.
3. Мирюк О.А., Ахметов И.С. Оценка техногенного сырья для получения вяжущих веществ // Строительные материалы. – 2002. – № 9. – С. 7 – 8.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ НА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

*М.О. ШИЛЫКОВСКИЙ, Н.Г. ИБРАГИМОВ, Э.Н. ИБРАГИМОВ*

АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»

E-mail: niipm001@yandex.ru

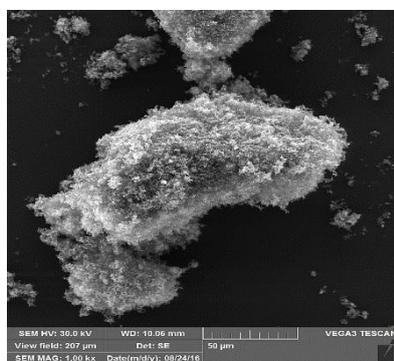
Известно, что эффективность модификаторов конденсированных систем (КС) зависит от множества факторов: химического состава, количества и дисперсности модификатора, способа его ввода, компонентного состава КС и многих других. Изучение практического катализа КС показало, что наиболее эффективными модификаторами являются различные соединения следующих металлов: свинца, меди, никеля и др.

Значительного увеличения эффективности традиционно используемых модификаторов можно достичь за счет уменьшения размера частиц и увеличению времени их пребывания в зоне реакций. В Институте технической химии Уральского отделения РАН разработана методика получения нанодисперсных оксидов свинца, никеля и меди, осажденных на поверхность углеродных частиц [1]. При горении КС при участии углерода на поверхности образуется так называемый углеродистый каркас, который за счет собственной высокой теплопроводности обеспечивает дополнительный приход тепла из надповерхностной зоны горения в зону разложения. Благодаря размещению оксидов металлов непосредственно на образующемся каркасе, а также лучшему распределению оксидов металлов в массе КС данная методика позволяет повысить эффективность действия модификатора.

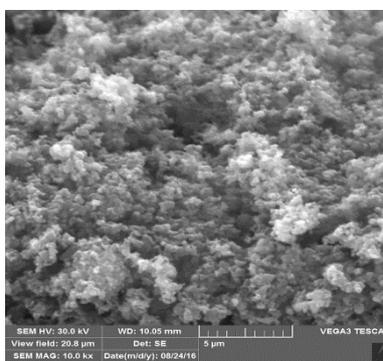
Целью работы является проверка эффективности катализа КС модификаторами на основе оксидов свинца, меди, никеля, высаженных на углеродную подложку. Сравнительная характеристика наноразмерных модификаторов приведена в таблице 1. В качестве углеродной подложки была использована печная сажа м. П-803. На рисунке 1 приведены снимки поверхности частиц образца № 6, типичные для всех компонентов.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых наноразмерных модификаторов КС

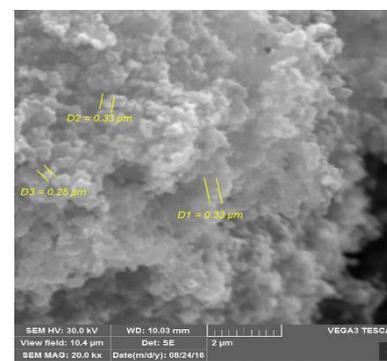
Номер образца	Наименование осажденного металла на углерод (соотношение, вес. ч.)	Содержание металлов на углеродной подложке, %			Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
		PbO	CuO	NiO	
0	Углерод марки П-803	-	-	-	14,5
1	PbO + CuO (2:1)	14,7	7,2	-	19,8
2	PbO + CuO (1:1)	9,4	11,2	-	21,2
3	PbO + NiO (2:1)	14,2	-	8,1	24,3
4	PbO + NiO (1:1)	9,4	9,9	-	23,2
5	NiO + CuO (2:1)	-	7,3	14,5	21,5
6	NiO + CuO (1:1)	-	9,6	12,0	28,4
7	NiO	-	-	10,0	20,8



а) увеличение 1000 раз



б) увеличение в 10000 раз



г) увеличение в 20000 раз

Рисунок 1 – Снимки поверхности частиц образца № 6 (NiO + CuO (1:1))

Из рисунка 1 видно, что частицы представляют собой аморфные сферические образования с шероховатой поверхностью. При увеличении в 20 тыс. раз на поверхности заметны образования размерами 200-300 нм – оксиды никеля и меди.

Методом дифференциально-термического анализа (ДТА) определена температура начала интенсивного разложения ( $T_{нпр}$ ), которая для всех исследуемых образцов выше 300 °С.

Исследование влияния наноразмерных оксидов металлов на скорость разложения и показатель степени в законе быстроты проведено на образцах КС с их введением в количестве 0,7 %. Результаты приведены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2 – Характеристики образцов КС с исследуемыми модификаторами

Модификатор		Показатели для КС на основе исследуемых модификаторов			
		Быстрота при P=10 МПа и T=20 °С, ед	Эффект, %	Показатель степени в законе быстроты в области давлений 4-12 МПа	Эффект, %
обр. 0	Базовый	21,7	-	0,692	0
обр. 1	PbO + CuO (2:1)	25,4	17,0	0,298	57,0
обр. 2	PbO + CuO (1:1)	22,5	4,0	0,132	81,0
обр. 3	PbO + NiO (2:1)	22,2	2,0	0,261	62,3
обр. 4	PbO + NiO (1:1)	21,7	0	0,260	62,4
обр. 5	NiO + CuO (2:1)	22,3	3,0	0,643	7,0
обр. 6	NiO + CuO (1:1)	21,3	-1,9	0,217	68,6
обр. 7	NiO	24,4	12,0	0,278	59,8

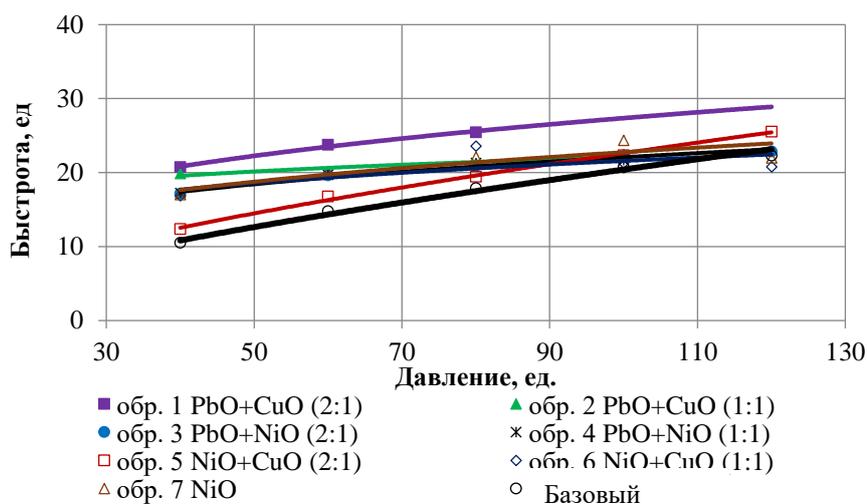


Рисунок 2 – Зависимость быстроты от давления при температуре 20 °С КС с исследуемыми модификаторами

Выводы:

Результаты исследования показывают, что введение в штатную конденсированную систему наноразмерных оксидов свинца, меди, никеля, высаженных на углеродную подложку, приводит к значительному снижению показателя степени в законе быстроты. Так, при введении 0,7 % оксидов свинца-меди (1:1) и оксидов никеля-меди (1:1) удалось снизить показатель степени быстроты на 70-80 % относительно штатной КС.

#### Список литературы

1. Вальцифер В.А. Новый подход к созданию модификаторов горения для ЭКС / В.А. Вальцифер, В.Н.Стрельников, Л.Л.Хименко//Боеприпасы.–2006.–Спец. выпуск.– С.98-102.

**СИНТЕЗ ДИАМИНОПРОИЗВОДНЫХ БИС(АЗОЛ-1-ИЛ)АЛКАНОВ***Н.А. ШЕГАРОВА, В.В. МАТВЕЕВСКАЯ, А.С. ПОТАПОВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
 Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера, Томск, Россия  
 e-mail: soboll2016@mail.ru

Химия гетероциклических соединений в последние годы приобретает все большую популярность. Это связано с тем, что такие соединения являются составляющими многих биологически значимых природных соединений: многих алкалоидов, нуклеиновых кислот и т.д. Так, например, аминопиразолы и их производные входят в состав некоторых лекарственных средств (анальгин, антипирин), используемых в качестве обезболивающих и жаропонижающих агентов. Производные азолов, содержащие два гетероциклических фрагмента, соединенных метиленовым мостиком, представляют особый интерес как в качестве биологически активных соединений, так и в качестве лигандов для синтеза различных координационных соединений.

Данная работа посвящена синтезу диаминопроизводных бис(пиразолил-1-ил) алканов из соответствующих нитропроизводных. Такие диаминопроизводные могут быть использованы в качестве мономеров в реакциях поликонденсации. Полученные на их основе полимеры представляют синтетическую ценность для получения металлоорганических координационных полимеров, синтез которых является очень популярным направлением в последние годы.

Для получения диаминопроизводных бис(азолил)алканов была использована процедура восстановления соответствующих нитропроизводных с помощью палладия на активированном угле в атмосфере водорода. Необходимое количество водорода было генерировано с помощью взаимодействия цинка с серной кислотой. На примере 1,8-бис(3,5-диметил-4-аминопиразол-1-ил)октана было показано, что использование данного подхода к синтезу приводит к образованию целевого продукта, однако его выход оказался небольшим, что обусловлено адсорбцией продукта на угле (Схема 1). В связи с этим данная методика требует усовершенствования с целью повышения выхода продукта реакции.

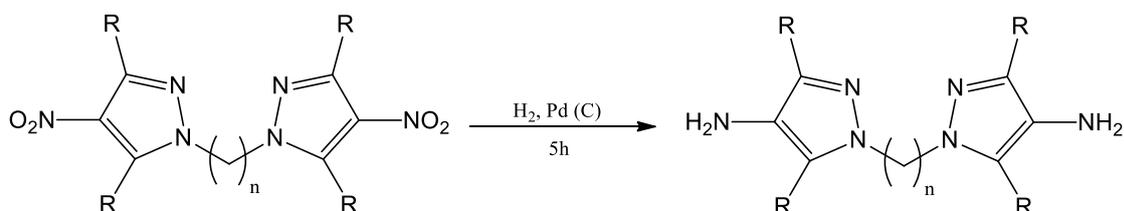


Схема 1. Синтез диаминопроизводных бис(пиразолил)алканов

Полученное соединение представляет интерес в качестве строительного блока для синтеза металлоорганических координационных соединений. Структура соединения была подтверждена методами ЯМР и ИК спектроскопии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00676*

**Список литературы:**

Brown H. Sodium aurothiosulfate. A simple method for its preparation // J. Am. Chem. Soc. – 1927. – V. 49. – P. 958–959.

## ***СЕКЦИЯ 2***

### ***РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ***

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НАНОВОЛОКОН ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СПЕКАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

*Т.Р. АЛИШИН, О.С. ТОЛКАЧЁВ, А.А. ЛЕОНОВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [alishin.95@mail.ru](mailto:alishin.95@mail.ru)

Благодаря комплексу уникальных свойств керамика из частично-стабилизированного диоксида циркония имеет широкий спектр применения в различных областях науки и техники [1]. Повышение прочности керамических материалов возможно при сочетании различных механизмов упрочнения. Например, в композиционных керамических материалах механизм упрочнения обусловлен торможением распространения трещин на границе раздела двух взаимно-инертных фаз. С другой стороны, использование наноразмерных добавок способствует снижению температуры спекания [2]. Целью данной работы является исследование влияния содержания нановолокон оксида алюминия на спекание керамики на основе частично стабилизированного иттрием диоксида циркония.

В качестве исходного материала для изготовления керамической матрицы использовали наноразмерный частично стабилизированный иттрием порошок диоксида циркония  $ZrO_2+3$  моль.%  $Y_2O_3$  (TZ-3YS, Tosoh). Наполнителем являлся нановолокнистый  $Al_2O_3$  (Fibrall, OCSiAl), полученный методом жидкофазного каталитического окисления алюминия молекулярным кислородом при температуре 820 °С. При исследовании структуры исходных компонентов методами РФА и РСА установлено, что в порошке TZ-3YS присутствуют тетрагональная (65,8 %) и моноклинная модификации  $ZrO_2$  (34,2 %) с размерами ОКР 50 нм и 26 нм, соответственно. Основной модификацией исследуемых волокон является кубическая ( $\gamma$ ). Диаметр волокон, по результатам ПЭМ составляет ~15 нм, а их длина достигает ~1 мкм. Отжиг волокон при 1250 °С сопровождается полным переходом в  $\alpha$ - $Al_2O_3$ .

Были подготовлены смеси порошка  $ZrO_2$  с различным объемным содержанием (1, 2, 5, 10, 20 и 50 %) исходных нановолокон  $Al_2O_3$ . С целью обеспечения гомогенного распределения компонентов, нановолокна  $Al_2O_3$  предварительно подвергались диспергированию с использованием мощного ультразвукового воздействия (~1.4 кВт) в среде этилового спирта в течении 10 мин, при помощи следующего оборудования: ультразвуковой генератор УЗГ2-22 (Ультразвуканс, Россия), магнитно-стрикционный преобразователь стержневого типа с рабочей частотой 18,7 кГц. После чего в суспензию вводили  $ZrO_2$ , таким образом, чтобы концентрация исходных компонентов составляла 4 г. на 70 мл. этанола, после чего, повторно обрабатывали мощным ультразвуковым воздействием в описанном выше режиме. Подготовленные суспензии подвергали дополнительному перемешиванию в шаровой мельнице в течении 24 ч. В качестве мелющих тел использовали бисер ~200 мкм в соотношении 4 г. на 1 г. смеси. По результатам просвечивающей электронной микроскопии достигнуто равномерное распределение исходных компонентов без значительного изменения морфологии волокон.

Компакты из подготовленных смесей были получены при давлении 100 МПа в закрытой жесткой пресс-форме диаметром 10 мм для одноосного одностороннего прессования, необходимое усилие прессования обеспечивали с помощью испытательного пресса ИП-500М-авто (ЗИПО, Россия). Плотность образцов после прессования составляла ~45 % для образцов с содержанием наноразмерных  $Al_2O_3$  волокон до 20 %, и 32 % для образцов с содержанием 50 %.

Спекание спрессованных образцов проводили в высокотемпературной атмосферной печи ЛНТ 08/18/Р310 (Nobertherm, Германия); спекание проводили с выдержкой в течении 1 часа и скоростью изменения температуры 200 °С /ч при различных температурах: 1400, 1450, 1500 °С.

Плотность спеченной керамики определяли методом гидростатического взвешивания. Используемые значения теоретической плотности для расчета относительной, 6,1 г/см<sup>3</sup> и 3,99 г/см<sup>3</sup> для TZ-3YS и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соответственно. Зависимость относительной плотности керамики от режима спекания и содержания нановолокон оксида алюминия представлена на рис. 1.

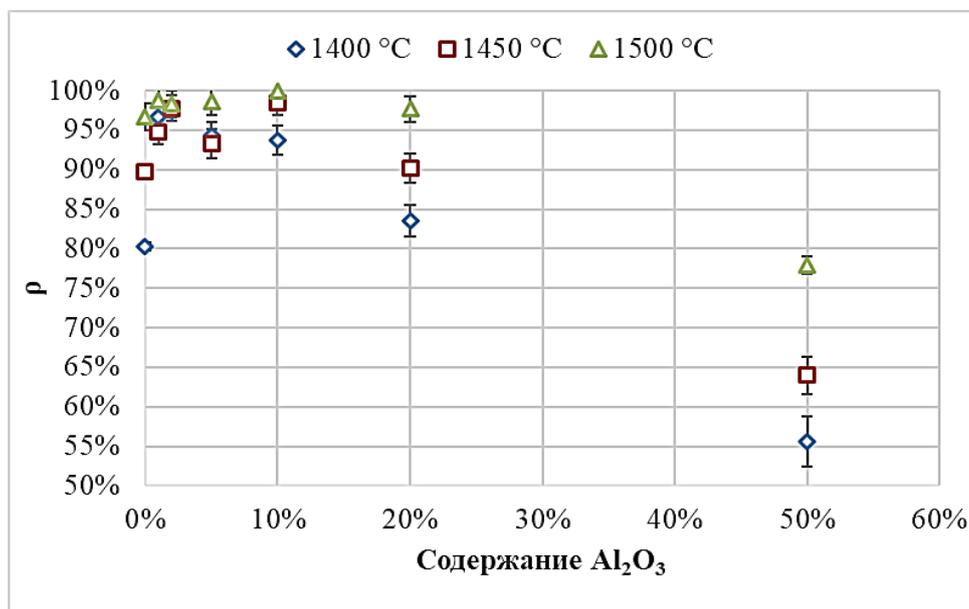


Рисунок 1 – Зависимость относительной плотности керамики от режима спекания и содержания нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Введение в состав керамики небольшого (1, 2%) количества нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сопровождается приростом плотности относительно образцов из исходного порошка уже при 1400 °C, ~98 % и ~80 %, соответственно. Для порошков с содержанием нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 20 % достигнуты значения плотности более 97 % в исследуемых диапазонах режимов. Относительно низкие значения плотности для образцов с 50 % нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обусловлено более низкой плотностью после прессования.

В результате исследований установлено, что введение 1-2 объемных процентов нановолокон оксида алюминия в состав керамики на основе диоксида циркония приводит к иницированию процесса спекания и, как следствие, увеличению плотности керамики. Инициация спекания является следствием комплексного изменения реологических параметров подготовленных пресс-порошков, а также переходом метастабильных нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в стабильную аллотропную модификацию.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00763 мол\_а.*

#### Список литературы

1. Лукин Е.С., Макаров Н.А., Козлов А.И. и др. Современная оксидная керамика и области ее применения // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. - № 1. - С. 3-13.
2. Подболотов К.Б., Волочко А.Т., Гусоров. Исследование влияния различных добавок для спекания керамики на основе микропорошков корунда: Труды международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». - Витебск, 2017. - С. 79-81.

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ТЕПЛА НА КАМНЕЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО И  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

*А.О. АРТЕМОВ, С.В. НАУМОВ, М.Н. ИГНАТОВ, М.Ф. КАРТЫШЕВ*

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет (ПНИПУ)  
E-mail: artemoff87@mail.ru

Расширение области использования минерального сырья, а именно габброидной и базальтоидной групп уральского региона, является актуальной задачей, поскольку Пермский край и близлежащие регионы обладают большими запасами как природного, так и техногенного сырья. Одним из способов получения новых видов продукции из минерального сырья является обработка плазменной дугой - высококонцентрированным источником тепла. Плазменные технологии применяются в различных отраслях промышленности: плазмохимия, сварка, резка, плазменное нанесение различных покрытий, производство металлических и неметаллических порошков различного фракционного состава.

Такая продукция как минеральная вата широко известна благодаря получению волокон из базальта, как сырье, обладающее высокой доступностью, сравнительно не дорогое, с усредненным химическим составом, благоприятной плавкостью и вязкостью для получения такого класса продукции [1]. В работе для получения минерального волокна используются габбро породы [2], которые менее распространены из-за больших температур плавления, меньшей плавкости породы и вязкости расплава. Однако, на территории уральского региона доступно большое количество отсеков этих пород, а под высокотемпературным динамическим воздействием плазменной дуги перечисленные недостатки могут быть устранены.

Плазменная технология производства минерального (керамического) волокна основана на использовании плазмотрона для получения потока высокотемпературного газа (воздуха, аргона, азота и др.). В специальной камере поток горячего газа плавит шихту, а образовавшийся расплав и горячий газ расплавляющий шихту выходят через отверстие в камере. Под воздействием горячего газа раздувается жидкий расплав, при котором образуется большое количество тонких минеральных волокон [3].

Известны [4] и способы получения минеральной ваты с использованием газопламенных горелок, однако у плазменных установок есть ряд преимуществ, а именно:

1) Плазмотрон дает значительно более высокую температуру газа и обеспечивает более эффективный раздув струи расплава, благодаря чему получают более тонкие волокна.

2) Плазмотрон позволяет регулировать температуру газа в широких пределах, за счет чего возможен подбор оптимальных режимов для получения ваты.

3) Технология с использованием плазменной дуги позволяет значительно снизить энергозатраты.

4) Большой ресурс работы плазмотронов до замены электродов от 500 до тысяч часов при малом времени замены электродов, что составляет до 15 мин [5].

Для получения лабораторных образцов минерального волокна из габбро-пород Первоуральского месторождения использовалась система плазменной резки Powermax 45 (Hypertherm), плазмотрон прямого действия, зажигаемый на вольфрамовом неплавящемся электроде. Габбро-породы дробились до состояния мелкодисперсной шихты фракционного состава до 0,1 мм и смешивались с жидким натриевым стеклом для того, чтобы они не разлетались под воздействием плазменной струи, а также легче расплавлялись и образовывали волокно. На рисунке 1а видно, как частица под действием высоких температур и динамического воздействия плазменной струи удлиняется, образуя волокно [6].

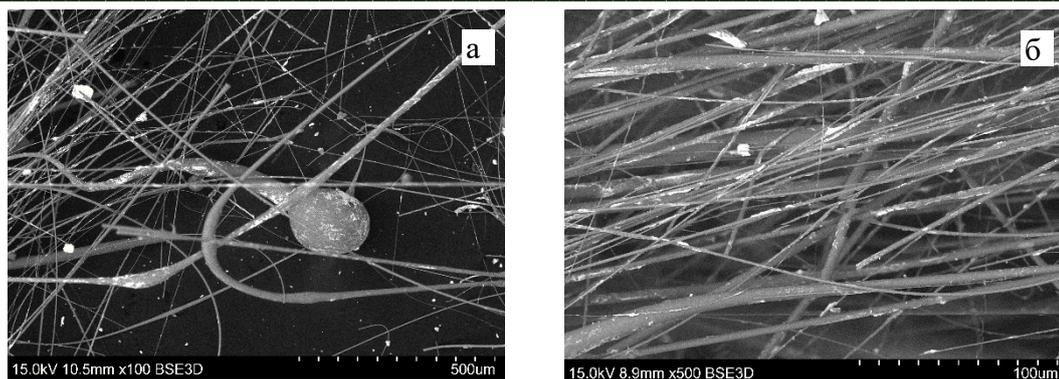


Рисунок 1 – Минеральное волокно габбро-пород (горнблендит): а – гранула, не успевшая вытянуться и раздуться в волокно под действием плазменной струи,  $\times 100$ , б – вытянутые волокна в одном направлении

Отличительной особенностью получения волокон является расплавление шихты в плазменной дуге прямого действия. Плазматрон предназначен для воздушной плазменной резки металлов. В тоже время осуществляется лёгкая наладка оборудования для получения минерального волокна. Толщина волокон находится в широком диапазоне от 500 нм до 20 мкм (рисунок 1б). На размер волокон влияет множество параметров, таких как скорость подачи шихты на связующем веществе, соотношение габбро-пород и натриевого жидкого стекла, фракционный состав шихты, скорость потока и давление газа, режим работы плазматрона и др. На поверхности волокон обнаружен осажденный мелкодисперсный слой с частицами менее 100 нм. Растровая электронная микроскопия с микрозондовым анализом показала, что химический состав слоя состоит, в основном, из оксида вольфрама ( $W=70,6$  wt.%). Обнаруженные на волокне частицы в виде твёрдых составляющих аэрозолей образуются в результате частичного выгорания нижнего вольфрамового электрода [7].

Доказана возможность получения минерального волокна из горнблендита Первоуральского месторождения уральского региона. Несмотря на то, что из горнблендита традиционными способами сложно получить минеральное волокно из-за, повышенной температуры плавления и более низкой вязкости по сравнению с базальтом, применение плазменных технологий в получении минеральных волокон из габбро-пород решают вышеизложенные проблемы. Размеры волокон при этом зависят от множества факторов, важнейшими из которых являются физико-химические свойства исходного сырья и технические характеристики плазматрона.

#### Список литературы

1. S.L. Buyantuev, A.S. Kondratenko et al. The study of the mineral and chemical features of the trans-baikal basalt deposit to generate melt using the electric arc method, Biosciences Biotechnology Research Asia, Volume 13, Issue 2 (2016) 1063-1068.
2. A.O. Artemov, M.N. Ignatov, A.M. Ignatova, S.V. Naumov, Composition development and production technology of stone casting silicate materials and items. Key Engineering Materials, № 743 (2017) 401-405.
3. Г.А. Денисов и др. Патент РФ 2214371 С2 (2003).
4. О.Г. Волокитин и др. Патент РФ 2355651 С2 (2009).
5. Электронный ресурс. – Режим доступа <http://www.forec.ru/plaz/wool-eng.htm>.
6. N. Jain, V.K. Singh, S. Chauhan, Review on effect of chemical, thermal, additive treatment on mechanical properties of basalt fiber and their composites, Journal of the Mechanical Behavior of Materials, Volume 26, Issue 5-6 (2017) 205-211.
7. Lassner, Erik and Wolf-Dieter Schubert, Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds, New York: Kluwer Academic, 1999.

## ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО КАК РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

*Н.Д. АНДРИЙЧУК<sup>1</sup>, Л.Ю. БОГАТЫРЁВА<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»  
Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства

<sup>2</sup>ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»  
E-mail: bogatyreva.lyuba@mail.ru

В настоящее время необходимость поиска новых способов обеспечения топливом Луганскую Народную Республику обусловлена территориальными конфликтами, невозможностью получать топливо для обеспечения теплоснабжения всего города и области традиционным образом. На данный момент найдено решение по транспортировке газа и других видов топлива на данную территорию, но при наличии каменноугольных шахт, необходимо пользоваться своими ресурсами. Производство водоугольного топлива обеспечит ритмичное снабжение топливом заданного качества.

Основная часть добываемых углей Донбасса, а также почти треть его геологических запасов, составляют антрациты, которые по своим характеристикам являются одними из лучших в мире. Газовый уголь составил 28% от общих запасов. Четверть это спекающиеся угли. Тощих углей на Донбассе, чуть менее 16%, а длиннопламенных около 2%.

Весь добытый уголь, возможно, использовать при производстве водоугольного топлива. Водоугольное топливо в 4 раза дешевле мазута (таблица 1). Т.е. при использовании каменного угля для производства водоугольного топлива, позволяет заменить дорогостоящий мазут и эффективно использовать имеющийся на территории Донбасса уголь.

Таблица 1 – Сравнительные технико-экономические показатели

Топливо	Низшая теплота сгорания	Эффективность сжигания	Стоимость 1 Гкал. руб.
Мазут	9,5 Гкал/т	97 %	1238
Газ	7,2 Г кал/тыс м <sup>3</sup>	99 %	463
ВУТ из угля	3,85 Гкал/т	97 %	342
ВУТ из шлама	3,85 Гкал/т	97 %	232

На сегодняшний момент существует множество действующих и эффективных технологических решений приготовления водоугольного топлива с требуемыми характеристиками и параметрами. Однако универсальной технологии приготовления ВУТ не существует, обусловлено тем что для каждого вида угля требуется определенный подбор параметров, основные же этапы включают в себя предварительное дробление, мокрый помол, гомогенизацию.

Водоугольное топливо успешно сжигается в котельных малой и средней мощности, следовательно данное топливо возможно успешно использовать для отопления республики.

Горение жидких топлив происходит более сложно. Ранее проведенные исследования доказали, что процесс горения данного топлива подразделяется на четыре основных этапа, которые вступают в силу после завершения предыдущего этапа.

В первую очередь суспензия прогревается до температуры, при которой производится испарения влаги, данный этап происходит при температуре близкой к 110 °С. При испарении влаги, частица уменьшается в своей массе временной, промежуток данного этапа равен 3 секундам. После испарения влаги происходит термическое разложение топлива с последующим выделением и горением летучих. В течении 7 секунд масса частицы водоугольного топлива на основе промышленных сточных вод, стабильно уменьшается, в последствии образуется коксовый остаток. При завершении процесса горения водоугольного топлива на основе промышленных сточных вод происходит закивание твёрдого углеродистого агломерата.

Процесс окисления и горения водоугольного топлива напрямую зависит от воды и водяного пара. Итоговые реакции горения водоугольного топлива – реакции окисления и горения угольной мелочи с кислородом и водяным паром, особенность данной реакции заключается в ее протекании при высокой концентрации водяного пара при температурах приближенных к теоретическим температурам горения углерода.

Отметим, что именно вода осуществляет влияние на сам процесс воспламенения с последующим горением водоугольного топлива.

Увеличение процентного содержания воды в суспензии приводит к росту затрат энергии и времени на испарение влаги. В результате испарения влаги на поверхности углеродистого агломерата образуется углеродистый каркас. Углеродистый каркас имеет высокие термическое сопротивление, вследствие чего происходит увеличение скорости возрастания температуры водоугольной частицы. Пары, образованные посредством испарения, проходят через каркас, вследствие чего около фронта испарения образовывается зона повышенного давления, а температура пара повышается на 10-20 °С.

Использование ВУС в теплоэнергетических комплексах может решить ряд проблем, как по использованию некондиционных углей, так и по утилизации отходов производств. В некоторых случаях эти отходы могут действовать как пластификаторы.

При сравнении водоугольного топлива и угля в первую очередь отмечается, что при сжигании угля недожжённым остается до 40% угля, ВУТ при этом практически полностью выгорает (не менее 98%), следовательно снижается объем потребляемого угля. Прямая экономия (т.е. снижение себестоимости 1 Гкал), с учётом затрат на приготовление водоугольного топлива в этом случае составляет не менее 20...40%.

Дополнительно при сжигании водоугольное топливо не остаётся угольного шлама, который необходимо утилизировать (т.е. экологический эффект), то выгода водоугольное топливо тем более на лицо. Утилизация несгоревшего угля в этом случае также вносит дополнительные затраты.

Оставшийся от сжигания водоугольного топлива зола может быть использована для строительства, в том числе для производства кирпича.

Использование водоугольного топлива позволит экономить на стоимости тепловой энергии, следовательно обеспечит снижение расхода топлива на производство тепловой энергии.

#### **Список литературы**

1. Андрийчук Н.Д., Богатырёва Л.Ю. «Перспективы применения водоугольного топлива» - Вестник ЛГУ им. В. Даля №2 2016 – 17-20 с.
2. Андрийчук Н.Д. Гидравлические системы для ВУТ: моделирование, оптимизация/ Н.Д. Андрийчук, М.В. Пилавов, А.А. Коваленко. – Луганск: изд-во ВНУ им. В.Даля, 2013.-239 с.
3. Баранова, М. П. Технологические аспекты получения водоугольных топливных суспензий / М. П. Баранова, В. А. Кулагин, С. В. Лебедев // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: Всероссийская НПК, – Бийск, 2009. – С. 58-62.
4. Круть А.А., Козыряцкий Л.Н. «Водоугольное топливо на основе угольных шламов» // Сб. научных работ ДонНТУ, сер. Горно-электромеханическая. №17. – 2009. с. 185 – 194.

## МАГНЕЗИАЛЬНЫЙ ТАМПОНАЖНЫЙ МАТЕРИАЛ

*А.Е. БОЖЕНОК, Н.А. МИТИНА*

Томский политехнический университет

E-mail: anastasiyaruleva1981@mail.ru

Добыча углеводородного энергетического сырья, нефти и газа, концентрируется в основном в регионах со сложными географическими и климатическими условиями. Такие местности характеризуются наличием вечной мерзлоты, скалистостью, повышенным содержанием сероводородной и углекислотной флюидных фаз, а также присутствием в породе минерализованных вод и отложений растворимых солей. В этих условиях при проектировании и возведении скважин необходимо большое внимание уделять качественному цементированию и креплению оборудования при бурении скважин. Для этой цели применяют тампонажный цементный материал – это твердеющая композиция на основе вяжущего вещества, которая при затворении с жидкостью образует раствор, переходящий в камневидное состояние. Среди основных задач, стоящих перед тампонажным материалом на первые места выходят: обеспечение хорошего сцепления как с окружающей породой, так и металлом колонн, герметичности обсадных колонн, изолирования скважин от подземных вод и отделение одного газоносного пласта от другого [1]. Поэтому качественный тампонажный материал должен обладать высокой начальной и конечной прочностью, низкой газопроницаемостью, безусадочностью (объемным расширением), коррозионноустойчивостью в контакте с пластовыми агрессивными средами.

В настоящее время применяемые тампонажные материалы основаны на использовании портландцементного вяжущего, однако, для удовлетворения возрастающих требований по эксплуатационным свойствам в такие материалы необходимо введение большого количества различных добавок, что делает композицию многокомпонентной и дорогостоящей и не всегда в полной мере решаются поставленные задачи. Взамен портландцементных тампонажных материалов могут применяться оксихлоридные (оксисульфатные) магниезиальные тампонажные материалы. Они обладают высокой стойкостью при контакте с водорастворимыми природными солями: галитом, карналлитом, сильвинитом и др.; позволяют проводить цементирование обсадных колонн скважин в мерзлых грунтах, в присутствии агрессивных солевых отложений [2]. Однако, оксихлоридный магниезиальный цемент характеризуется низкой стойкостью по отношению пресной и минерализованной воде, то есть низкой водостойкостью. Для решения этой проблемы можно использовать магниезиальный гидравлический водостойкий цемент, разработанный учеными Томского политехнического университета [3]. Использование в качестве жидкости затворения водный раствор бикарбоната магния позволяет получить магниезиальный цементный камень с водонерастворимыми кристаллическими фазами. Материал отличается плотной водо- и газонепроницаемой структурой. Контакт с минеральными водами, содержащими растворенный углекислый газ дополнительно упрочняет структуру.

В связи с этим целью данных исследований является определение возможности применения гидравлического магниезиального вяжущего в качестве тампонажного материала и определение его основных свойств, соответствующих требованиям нормативных документов.

В качестве исходных компонентов использовали порошок магниезиальный каустический марки ПМК-75 производства ООО «Сибирские порошки» г. Иркутск с содержанием активного оксида магния 75% массовых. Каустический магnezит затворяли водным раствором бикарбоната магния (БКМ), концентрация которого составляла 13-19 г/л.

Оценка гидравлического магниезиального вяжущего как тампонажного материала проводилась по определению следующих параметров:

- 1) оптимальное водотвердое отношение по растекаемости раствора с помощью конуса АЗНИИ. Для этого были приготовлены магниезиальные растворы с  $V/T = 0,5-0,8$ ;
- 2) плотность тампонажного магниезиального раствора оптимального состава;

- 3) водоотдача тампонажного магниезиального раствора оптимального состава;
- 4) прочностные характеристики затвердевшего тампонажного магниезиального материала оптимального состава. Для этого из магниезиальной смеси формовались образцы-балочки размером 2×2×10 см. После 2 суток твердения в воздушно-влажных условиях образцы испытывались на прочность при изгибе и сжатии;
- 5) коэффициент водостойкости по отношению прочности при сжатии образцов, твердевших в воде к прочности при сжатии образцов, твердевших на воздухе.

Результаты испытаний и сравнение их с нормативными данными приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний магниезиального тампонажного материала

Критерии	Тампонажный материал на основе магниезиального вяжущего	Требования к тампонажному материалу согласно ГОСТ 1581-96
Плотность	1,57 г/см <sup>3</sup>	Облегченный – 1.4-1.65 г/см <sup>3</sup> Утяжеленный – свыше 2.3 г/см <sup>3</sup>
Растекаемость	220 мм при В/Т=0,65 (при нормальной густоте магниезиального цементного теста 0,46)	Не менее 200 мм при В/Т=0,50 (при нормальной густоте цементного теста 0,25 - 0,30)
Водоотделение	4 мл	Не более 7 мл
Прочность при изгибе на 2 сут.	1,6-2,2 МПа	Для облегченных не менее 0.7 МПа Для тяжелых не менее 2,7 МПа

Изучение специфики предлагаемых материалов показало, что для обеспечения коррозионной стойкости и сопротивления воде необходимо сформировать в процессе твердения вяжущего водостойкой структуры из водонерастворимых соединений. В результате твердения вяжущей композиции из каустического магнетита MgO и раствора Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> образуются гидрокарбонаты магния с общей формулой MgCO<sub>3</sub>·Mg(OH)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O или MgCO<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O. Данные соединения нерастворимы в воде, создают прочную водостойкую непроницаемую структуру магниезиального цементного камня, способного твердеть во влажных и водных условиях. Показатели по коэффициенту водостойкости больше 1, оксихлоридное магниезиальное вяжущее – 0,75-0,8. В силу этого композицию гидравлического магниезиального вяжущего можно использовать в качестве тампонажного материала, особенно в присутствии минерализованных (карбонатных) вод и солевых растворов. Цементный магниезиальный камень характеризуется регулируемыми сроками схватывания – конец схватывания не позднее 8 часов, высокой прочностью при твердении в воде до 35 МПа, высоким сродством с вмещающими породами, а, следовательно, высоким сцеплением с породой, высокой водостойкостью и коррозионностойкостью в солевых растворах. Одним из основных достоинств разработки является полная экологичность применяемых материалов – получаемые в результате соединения являются полными аналогами существующих в природе.

#### **Список литературы**

1. Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Каримов Н.Х., Мавлютов М.Р. Повышение долговечности тампонажного камня в агрессивных флюидах нефтяных и газовых скважин. – Самара: Изд-во Самарского фил. секции «Строительство» РИА, 1998. – 272 с.
2. Г.М. Толкачев, А.С. Козлов, А.М. Шилов, А.В. Анисимова Перспективы использования магниезиальных тампонажных материалов при освоении недр подземными горными выработками. // Вестник КРСУ. - 2016. - Том 16. № 1. – С. 187-189.
3. Митина Н. А., Лотов В. А. Формирование структуры цементного камня при гидратации и твердении гидрокарбонатного магниезиального вяжущего // Строительные материалы. - 2017 - №. 8. - С. 68-73.

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШЛИКЕРА НА КАЧЕСТВО ОТЛИТОЙ ЛЕНТЫ

*О.В. БОРОДИЧ, А.А. ДИТЦ*

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: ditts@tpu.ru

AlN часто используют в электронике, микроэлектронике, в приборостроение для изготовления подложек интегральных схем. Учитывая, что одним из востребованных и хорошо развивающимся сегментов рынка в мире является электроника и электротехника, требуется разработать более экономичный способ производства подложек, которые необходимы для отвода тепла от теплонагруженных элементов. Подложки набираются из керамических лент, которые формируются с помощью шликерного литья на основу.

Целью исследовательской работы является изучение влияния состава шликера на его реологические свойства. Изучение влияния состава на свойства позволит определить условия получения керамической бездефектной ленты толщиной более 700 мкм, что значительно снизит себестоимость конечного изделия.

Материалы. В качестве исходных материалов применяли: порошок AlN производства Россия, поливинилбутираль (PVB) производства Германия, дибutilфталат (DBP) производства Россия. В качестве растворителей система этанол - толуол, олеиновая кислота (ПАВ).

Методика эксперимента. Для приготовления шликера сырьевые материалы дозируются согласно рецепту, добавляются в барабан объемом 1 л с корундовыми шарами в соотношении тв:шары как 1:1. Первым загружали растворители (толуол, этанол), ПАВ и перемешивали в течение 15 минут. Твердую фазу, загружали частями, время перемешивания между загрузками 15-30 мин после каждой загрузки. Связка PVB также добавляется в 2 приема с интервалами по 15 мин. В последнюю очередь добавляется пластификатор (DBP). Далее шликер мешали до полного растворения компонентов в течение 24 часов. В процессе приготовления шликера в его объеме и на поверхности остаются газовые включения, которые значительно снижают качество отливки. Для их удаления шликер обезгаживают. Вязкость базового шликера составляет от 2 до 4 Па·с, данная вязкость не может обеспечить отливку ленты толщиной более 200 мкм. Поэтому необходимо повысить вязкость шликера для получения ленты толщиной более 700 мкм. Приготовление более вязкого шликера не позволит провести равномерное смешение компонентов и провести стадию осветления. В связи с этим предлагается готовить шликер на стадии смешения с низкой вязкостью, а затем за счет удаления растворителя увеличивать вязкость.

Вакуумирование шликера вели при остаточном давлении 0,5-0,7 МПа и постоянном перемешивании. Время вакуумирования до 40 мин. Каждые 10 мин определяли динамическую вязкость шликера на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+ Pro. Соотношение компонентов определяли по потери массы при температурах 110 и 500 °С соответствующие удалению растворителя и связки с пластификатором. Вакуумированный шликер отливали в виде ленты на литейной машине CAM L 252 фирмы КЕКО.

Результаты. Изменение соотношения компонентов в шликере при вакуумировании. Согласно полученным данным с увеличением времени вакуумирования содержание твердого в шликере растет с 63 до 78 мас.%, а растворителя уменьшается с 38 до 23 мас.%.  
Изменение динамической вязкости шликера определенное на вискозиметре после вакуумирования представлено на рисунке 1.

Согласно данным рисунка 3 шликер можно отнести к неньютоновским псевдопластичным жидкостям. С увеличением времени вакуумирования происходит увеличение вязкости шликера с 5 до 12 Па·с.

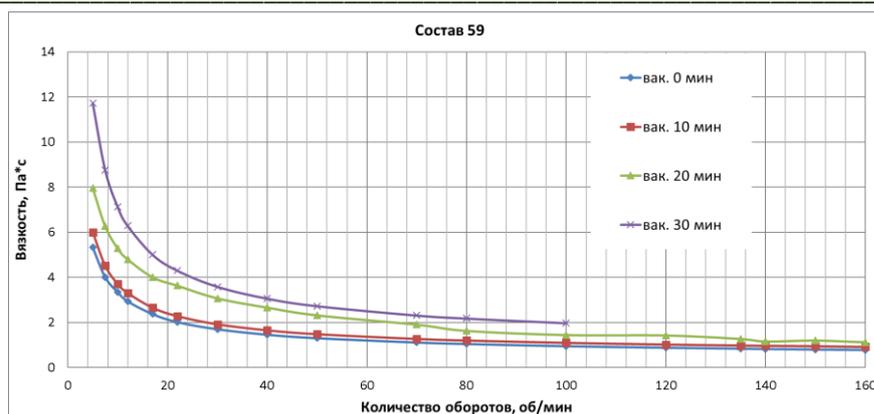


Рисунок 1 – Динамическая вязкость шликера

При всех временах вакуумирования при отливки керамической ленты получали годные, без дефектов на поверхности и в объеме образцы. Фотографии отлитой ленты представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фотографии отлитой ленты

Толщина отлитой ленты измерялась штангенциркулем. Толщина меняется от 200 мкм для шликера вакуумированного 0 мин до 1600 мкм для шликера вакуумированного 10 мин и снижается при дальнейшем вакуумировании до 1300 мкм.

#### Список литературы

1. В.Е. Крупенникова, В.Д. Раднаева, Б.Б. Танганов, Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+ Pro. 2011г
2. Дитц А.А., Погребенков В.М., Гришко Н.Е. / Получение высокотеплопроводных материалов методом шликерного литья на основу [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25722858>.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РАДИУСА ДОСТАВКИ СЖИЖЕННОГО ГАЗА ПОТРЕБИТЕЛЯМ

*О.О. БРАЖНИК, О.Н. МЕДВЕДЕВА*

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

E-mail: medvedeva-on@mail.ru

Существующая в России технология газификации с использованием сети газовых магистралей практически исключает из этого процесса целые районы с малыми населенными пунктами, фермерскими хозяйствами, коттеджными поселками, отдельными объектами промышленности, малыми предприятиями. Оценка экономической эффективности использования сжиженного газа показывает, что данный энергоноситель позволяет обеспечить потребителей безопасным, конкурентоспособным топливом в тех регионах страны, где экономически нецелесообразно строительство газопроводных сетей [1, 2].

Для оптимального функционирования всего комплекса снабжения потребителей сжиженным газом необходимо наладить четкое взаимодействие между его основными составляющими. Известны следующие способы транспортировки природного газа: трубопроводный транспорт; транспортировка сжиженного газа судами, автотранспортом, железнодорожным транспортом. Каждый из способов имеет присущие ему преимущества и недостатки [2].

Доставка сжиженного углеводородного газа (СУГ) к потребителям осуществляется в автоцистернах (для перевозки больших объемов газа) и баллоновозах (для перевозки небольших объемов газа). Доставка СУГ потребителям в баллонах непосредственно с ГНС обуславливает высокий уровень транспортных затрат, увеличивая конечную стоимость топлива для потребителя [1].

В результате анализа существующих схем топливоснабжения на базе сжиженного природного газа (СПГ) с использованием автомобильного транспорта авторами [2] предлагается способ транспортировки газа, позволяющий свести к минимуму количество бесполезно расходуемого холода. Суть идеи заключается в возвращении холода, полученного при регазификации СПГ, обратно на завод по получению СПГ и использованию его для предварительного охлаждения природного газа в цикле сжижения [2].

В настоящее время в литературе отсутствует методика выбора экономически целесообразных марок машин различной грузоподъемности и их экономических радиусов действия. Отечественными и зарубежными производителями выпускается большое количество автомобилей, которые по техническим характеристикам могут найти применение как спецмашины для перевозки сжиженного газа. В связи с этим, целесообразно сравнить технико-экономические показатели по существующим машинам с показателями по новым автомашинам. Для наиболее целесообразных спецмашин необходимо выявить зоны их применения при определенных условиях и дальности развозки газа [1, 2]. Кроме того, определенный интерес для проектных организаций представляет вопрос о экономических радиусах действия существующих машин. Решение поставленных задач требует разработки методики сопоставления и выяснения условий сопоставимости, различных марок автомашин. Выбор оптимального варианта должен производиться на основании сравнения величин расчетных затрат по сравниваемым вариантам [3].

Как показывает анализ, на величину расчетных затрат по транспорту сжиженного газа различными марками автомашин влияют следующие факторы [1, 3]:

- расстояние транспортировки газа;
- состояние дорог;
- грузоподъемность машины;
- условия разгрузки газа, концентрации потребителей;
- организация труда в газовых хозяйствах (количество смен работы автопарка и продолжительность рейса);
- мощность средств механизации заправки автоцистерн и погрузки баллонов;

- принятая схема газоснабжения (расположение потребителя в том же городе или в другом населенном пункте);

- особенности заводов-производителей и др.

Для сопоставления вариантов транспорта с помощью различных марок автомашин необходимо учитывать, чтобы варианты обеспечивали единый народно-хозяйственный эффект. В нашем случае это требование выражается в одинаковом количестве перевозимого в течение года сжиженного газа на одно и то же расстояние.

В связи с тем, что грузоподъемность автомашин разная, необходимо сравнить различное количество автомашин или сравнить удельные расчетные затраты на 1 тонну перевозимого в год газа при равных радиусах перевозки. Таким образом, за основной показатель принята величина [1, 3]:

$$\frac{Z}{Q} = \frac{K}{T_{кр} \cdot Q} + \frac{И}{Q},$$

где  $Z$  – расчетные затраты по одной автомашине, руб;

$Q$  – количество газа перевозимого в год автомашиной, тонн/год;

$K$  – капитальные вложения по рассматриваемой автомашине, руб;

$И$  – годовые эксплуатационные расходы по автомашине, руб;

$R_{кр}$  – критический срок окупаемости.

Все расчетные затраты можно условно разделить на переменные, зависящие от расстояния перевозки машиной постоянные, и независящие от него [3]:

$$\frac{Z}{Q} = a \cdot R + b,$$

где  $R$  – расстояние перевозки газа, км;

$a$  – переменные затраты, руб/т · км;

$b$  – постоянные затраты, руб/т.

При  $b_1 = b_2$ ;  $a_1 \neq a_2$  целесообразной к использованию окажется машина, имеющая меньшую величину  $a$ . При  $a_1 = a_2$ ;  $b_1 \neq b_2$  – целесообразна машина, имеющая меньшее значение  $b$ . При  $a_1 > a_2$ ;  $b_1 < b_2$  или  $a_1 < a_2$ ;  $b_1 > b_2$  – точка пересечения кривых определит величину критического радиуса  $R_{крит}$ , менее которого целесообразно применение машины, имеющей меньшую постоянную часть, и более которого экономичнее применение машины, имеющей большую постоянную часть [1].

Величина  $R_{крит}$  может быть определена следующим образом:

$$R_{крит} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}.$$

Помимо этого, необходимо учитывать, что при заданной продолжительности рабочего времени каждой автомашине характерна величина максимального радиуса развозки сжиженного газа  $R_{max}$ , который будет определяться продолжительностью нахождения машины в пути и скоростью движения машины.

### **Список литературы**

1. Курицын Б.Н. Системы снабжения сжиженным газом. – Саратов: СГУ, 1988. – 196 с.
2. Medvedeva O.N., Frolov V.O. Theoretical substantiation of method of delivery liquefied natural gas// Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. – №4(32). – 2016. – pp. 34-35.
3. Курицын Б.Н., Медведева О.Н. Технико-экономическая оптимизация систем теплоснабжения. – Саратов: СГТУ, 2011. – 60 с.

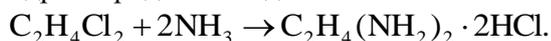
## ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНДИАМИНА

Н.А. БЫКОВСКИЙ, Е.А. КАНТОР, В.С. ФАНАКОВ, Л.Н. ПУЧКОВА, Н.Н. ФАНАКОВА

Уфимский государственный нефтяной технический университет

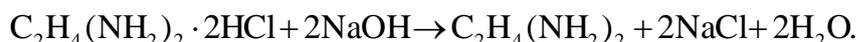
E-mail: nbikovsky@list.ru

Производство этилендиамина (ЭДА) аминированием 1,2-дихлорэтана аммиаком приводит к образованию дигидрохлорида этилендиамина:



Реакцию аминирования дихлорэтана проводят 20÷70% водным раствором аммиака при температуре до 180°C, давлении 0,8÷7 МПа и мольном отношении дихлорэтана и аммиака 1:2÷6,4 [1,2].

Для разрушения дигидрохлорида этилендиамина его обрабатывают гидроксидом натрия:



В результате получают водный раствор ЭДА содержащий полиэтиленполиамины (ПЭПА) и хлорид натрия. Полученную смесь подвергают выпарке и ректификации [3]. В процессе выпаривания получают газообразный аммиак, направляемый на стадию аминирования 1,2-дихлорэтана, амины, направляемые на ректификацию для их выделения и насыщенный раствор поваренной соли с содержанием 1÷2% аминов. В процессе ректификации в верхней части ректификационной колонны образуется водная фракция с содержанием около 1% этилендиамина и около 2% аммиака. Таким образом, сточные воды, образующиеся в производстве ЭДА, представляют собой насыщенный раствор поваренной соли с примесью аминов и водную фракцию процесса ректификации, содержащую ЭДА и аммиак. В расчете на 1 т ЭДА образуется около 3 м<sup>3</sup> насыщенного раствора поваренной соли и около 14 м<sup>3</sup> водной фракции процесса ректификации. Поскольку содержание аминов и аммиака в этих стоках значительно превышает их предельно-допустимые концентрации, то перед сбросом их подвергают многократному разбавлению.

В последнее время для определения токсичности сточных вод все шире применяются различные фитоэкоиндикаторы, одним из которых является кресс-салат [4,5]. Преимущество использования последнего в качестве фитоэкоиндикатора обусловлено отзывчивостью на токсичность среды таких параметров как всхожесть, длина проростков и сухой вес проростков.

В работе представлены результаты исследований токсичности сточных вод, образующихся в производстве этилендиамина как на стадии выпарки, так и на стадии ректификации. В первом случае это насыщенный раствор NaCl содержащий 2% ПЭПА, а во втором случае это раствор, содержащий 1% ЭДА и 2% NH<sub>3</sub>. В качестве фитоэкоиндикатора использовали кресс-салаты сортов забава и крупнолистовой. Эксперимент проводили по методике, описанной в литературе [6]. Критический коэффициент корреляции для данной серии опытов, в соответствии с [7] равен 0,514.

В таблицах 1 и 2 представлены уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для стока, содержащего насыщенный раствор NaCl с 2% ПЭПА и стока, содержащего 1% ЭДА и 2% NH<sub>3</sub>.

Анализ представленных данных показывает, что наиболее чувствительным параметром является длина проростков. На это указывают высокие коэффициенты корреляции. Поэтому для определения безопасной степени разведения использовали уравнения регрессии, полученные для длины проростков. Так для сточной воды, содержащей насыщенный раствор NaCl с 2% ПЭПА безопасная степень разведения, определенная по сорту забава составила 771, а безопасная степень разведения, определенная по сорту крупнолистовой составила 927 для сточной воды, содержащей 1% насыщенный раствор NaCl с 2% ПЭПА.

*Секция 2 – Рациональное использование природного  
и техногенного минерального сырья и водных ресурсов*

Таблица 1 – Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для стока, содержащего раствор NaCl с 2% ПЭПА

Сорт кресс-салата		Анализируемый параметр		
		Всхожесть, %	Длина проростков, мм	Сухой вес проростков, мг
Забава	Уравнение регрессии	$Y=90,408 +0,0087 \cdot X$	$Y= 57,807+0,0508 \cdot X$	$Y=1,676-0,2E-3 \cdot X$
	Коэффициент корреляции	0,47	0,63	0,46
Крупно-лиственной	Уравнение регрессии	$Y=92,71+0,0053 \cdot X$	$Y=61,452+0,0481 \cdot X$	$Y=1,724-0,3 E-3 \cdot X$
	Коэффициент корреляции	0,29	0,62	0,56

Таблица 2 - Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для стока, содержащего 1% ЭДА и 2% NH<sub>3</sub>

Сорт кресс-салата		Анализируемый параметр	
		Всхожесть, %	Длина проростков, мм
Забава	Уравнение регрессии	$Y=96,95-0,003 \cdot X$	$Y=59,77+0,066 \cdot X$
	Коэффициент корреляции	0,45	0,63
Крупно-лиственной	Уравнение регрессии	$Y=72,68+0,042 \cdot X$	$Y=43,06+0,15 \cdot X$
	Коэффициент корреляции	0,33	0,88

ЭДА и 2% NH<sub>3</sub> безопасная степень разведения, определенная по сорту забава составила 509, а безопасная степень разведения, определенная по сорту крупнолиственной составила 526.

**Список литературы**

1. Пат. 2114849 Российская федерация, МПК С07D 487/08. Способ получения триэтилендиамина /Тестова Н.В., Сухова О.Б., Ионе К.Г.; заявитель и патентообладатель Конструкторско-технологический институт каталитических и адсорбционных процессов на цеолитах «Цеолит» СО РАН - №96106959/04; заявл. 09.04.1996; опубл.10.07.1998.
2. Пат. 2226189 Российская федерация, МПК С07С 211/10. Способ получения этилендиамина и полиэтиленполиаминов /Загидуллин Р.Н.; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество «Каустик» - №2002128683/04; заявл. 25.10.2002; опубл. 27.03.2004. Бюл. №9.
3. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. Изд. 4-е, переработанное и дополненное – М.: Химия, 1988. – 592 с.
4. Быковский Н.А., Пучкова Л.Н., Фанакова Н.Н. Исследование токсичности дистиллерной жидкости аммиачно-содового производства различными тест-объектами // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19. – № 10. – С. 48-51.
5. Даминев Р.Р., Исламутдинова А.А., Шаяхметов А.И. Allium-тест и математическая модель при оценке токсичности циклических аммониевых соединений // Экология урбанизированных территорий. – 2012. – №2. – С. 80-84.
6. Методика определения токсичности питьевых, грунтовых, поверхностных и сточных вод, растворов химических веществ по измерению показателей всхожести, средней длины и среднего сухого веса, проростков семян кресс-салата (*lepidium sativum*) // ПНД Ф Т 14.1:2:4.19-2013/Москва.-2013.
7. Урбах В.Ю. Биометрические методы (статистическая обработка опытных данных в биологии, сельском хозяйстве и медицине). – М.: Наука, 1964. – 415 с.

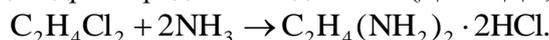
## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТИЛЕНДИАМИНА

*Н.А. БЫКОВСКИЙ, Е.А. КАНТОР, В.С. ФАНАКОВ, Л.Н. ПУЧКОВА, Н.Н. ФАНАКОВА*

Уфимский государственный нефтяной технический университет

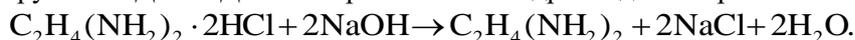
E-mail: nbikovsky@list.ru

Производство этилендиамина (ЭДА) аминированием 1,2-дихлорэтана аммиаком приводит к образованию дигидрохлорида этилендиамина (ДГХ ЭДА):



Реакцию аминирования дихлорэтана проводят 20÷70% водным раствором аммиака при температуре до 180°C, давлении 0,8÷7 МПа и мольном отношении дихлорэтана и аммиака 1:2÷6,4 [1,2].

Для разрушения ДГХ ЭДА его обрабатывают гидроксидом натрия:



В результате получают водный раствор ЭДА содержащий полиэтиленполиамины (ПЭПА) и NaCl. Полученную смесь подвергают выпарке и ректификации [3]. В процессе выпаривания получают газообразный аммиак, направляемый на стадию аминирования 1,2-дихлорэтана, амины, направляемые на ректификацию для их выделения и насыщенный раствор поваренной соли с содержанием 1÷2% ПЭПА. В процессе ректификации в верхней части ректификационной колонны образуется водная фракция с содержанием около 1% этилендиамина и около 2% аммиака. Таким образом, сточные воды, образующиеся в производстве ЭДА, представляют собой насыщенный раствор NaCl с примесью аминов и водную фракцию процесса ректификации, содержащую ЭДА и NH<sub>3</sub>. В расчете на 1 т ЭДА образуется около 3 м<sup>3</sup> насыщенного раствора NaCl и около 14 м<sup>3</sup> водной фракции процесса ректификации. Поскольку содержание аминов и аммиака в этих стоках значительно превышает их предельно-допустимые концентрации, то перед сбросом их подвергают многократному разбавлению. Кроме того, следует отметить, что со сточными водами теряется около 220 кг ЭДА в расчете на производство 1 т.

Известно, что использование мембранного электролиза позволяет проводить технологические процессы без образования сточных вод, а также перерабатывать сточные воды, получая полуфабрикаты, используемые в производстве и товарную продукцию [4].

В работе представлены результаты исследований по переработке сточных вод, образующихся на стадии ректификации и переработке раствора ДГХ ЭДА в мембранных электролизерах [5-8].

При аминировании 1,2-дихлорэтана аммиаком на производство 1 т ЭДА с учетом полуторного избытка необходимо затратить 4,25 т 40% NH<sub>3</sub>. Количество сточной воды, получаемой в процессе ректификации в 3,3 раза больше, чем количество, необходимое для получения 40% раствора NH<sub>3</sub>. В связи с этим этот сток невозможно полностью использовать для получения раствора NH<sub>3</sub>, применяемого в процессе аминирования. Исследования проводили в трехкамерном мембранном электролизере. Катодная камера отделялась анионообменной мембраной МА-40, а анодная камера – катионообменной мембраной МК-14. Через анодную камеру прокачивали сточную воду, а в катодной камере циркулировал раствор NaOH. Такая конструкция электролизера позволяла получать в средней камере концентрат, содержащий ЭДА и NH<sub>3</sub>. Максимальная концентрация этилендиамина и аммиака в растворе, образующемся в средней камере электролизера, зависит от плотности тока. Так при плотности тока, равной 130 А/м<sup>2</sup> концентрация этилендиамина в средней камере электролизера поднимается до 98,8 г/л, а концентрация аммиака – до 92,2 г/л. Увеличение плотности тока до 519 А/м<sup>2</sup> приводит к повышению концентрации этилендиамина до 118,6 г/л и аммиака – до 105,8 г/л. Таким образом электрохимическая переработка легкой фракции, образующейся на стадии ректификации и представляющая собой воду, содержащую ЭДА и аммиак, позволяет получать концентрат, содержащий амины и аммиак, который может

применяться для приготовления аммиачной воды, используемой в процессе получения аминов. При этом исключается потеря этилендиамина и аммиака со сточными водами.

При переработке раствора ЭГХ ЭДА на 1 т ЭДА образуется около 3 м<sup>3</sup> насыщенного раствора NaCl с содержанием до 2% ПЭПА. Это приводит к потере примерно 60 кг с производством 1 т ЭДА. Нами исследован процесс переработки раствора ДГХ ЭДА в четырехкамерном электролизере с ионообменными мембранами марки МК-10 и МА-40. Катодная и анодная камеры электролизера отделялись катионообменными мембранами марки МК-40, а средняя камера разбивалась на две анионообменной мембраной МА-40. Через камеру, соседнюю с катодной прокачивали раствор ДГХ ЭДА, через анодную камеру – 0,1 н раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Катодная и соседняя с анодной камеры перед опытами заполнялись водой. Такая организация процесса позволила получать в катодной камере раствор ЭДА, свободный от HCl, а в соседней с анодной камере – раствор HCl. Показано, что концентрация растворов ЭДА и HCl, концентрируемые в соответствующих камерах электролизера определяются мембранной плотностью тока. Максимальная концентрация растворов ЭДА и HCl, достигнутая при мембранной плотности тока 50 мА/см<sup>2</sup>, составила 234,3 г/л и 100,2 г/л соответственно. Таким образом, переработка раствора ДГХ ЭДА в электролизере с ионообменными мембранами позволяет получать растворы ЭДА, свободные от HCl и растворы HCl. При этом исчезает необходимость в обработке ЭГХ ЭДА щелочью, что приведет к экономии последней ликвидации стадии выпарки и ликвидации сточных вод, формируемых в процессе выпарки.

#### **Список литературы**

1. Пат. 2114849 Российская федерация, МПК С07D 487/08. Способ получения триэтилендиамина /Тестова Н.В., Сухова О.Б., Ионе К.Г.; заявитель и патентообладатель Конструкторско-технологический институт каталитических и адсорбционных процессов на цеолитах «Цеолит» СО РАН - №96106959/04; заявл. 09.04.1996; опубл.10.07.1998.
2. Пат. 2226189 Российская федерация, МПК С07С 211/10. Способ получения этилендиамина и полиэтиленполиаминов /Загидуллин Р.Н.; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество «Каустик» - №2002128683/04; заявл. 25.10.2002; опубл. 27.03.2004. Бюл. №9.
3. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. Изд. 4-е, переработанное и дополненное – М.: Химия, 1988. – 592 с.
4. Мазанько А.Ф., Камарьян Г.М., Ромашин О.П. Промышленный мембранный электролиз. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
5. Быковский Н.А., Муллабаев И.М., Кантор Е.А. Влияние электрохимической обработки на качество сточных вод в производстве этилендиамина // Экология и промышленность России. – 2010. – декабрь. – С. 8 – 10.
6. Пат. 2473965 Российская Федерация, МПК С 25 В 3/04, С 07 В 63/00. Способ выделения амина / Быковский Н.А., Кантор Е.А., Муллабаев И.М., Пучкова Л.Н.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. - №2010146235/07; заявл. 12.11.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. №23.
7. Муллабаев И.М., Быковский Н.А., Кантор Е.А. Электрохимическая обработка раствора аминоклоргидрата этилендиамина в четырехкамерном непроточном мембранном электролизере // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. – №5. – С. 153 – 154.
8. Пат. 2537564 Российска Федерация, МПК С07С 209/08. Способ получения амина / Быковский Н.А., Даминев Р.Р., Фаткуллин Р.Н., Пучкова Л.Н.; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. - №2013136661/04; заявл. 05.08.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. №1.

## ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛЫ УГОЛЬНЫХ ТЭС СОЛЯНОЙ КИСЛОТОЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПОЛИОКСИХЛОРИДА АЛЮМИНИЯ

Д.В. ВАЛЕЕВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и  
материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук  
E-mail: dmvalcev@yandex.ru

Ежегодно в России сжигается более 123 млн. т. твердого топлива, при этом образуется ~ 25 млн. т золошлаковых отходов (ЗШО), на переработку поступает только 2 млн. т. в год [1]. В золе содержится до 30 % оксида алюминия, что делает этот вид сырья самым перспективным в качестве альтернативы бокситам при производстве глинозема, основного материала для получения металлического алюминия. Алюминий в золе находится в виде минерала муллита, который плохо растворим в соляной кислоте при атмосферном давлении. В данном исследовании впервые был использован автоклавный процесс для выщелачивания ЗШО соляной кислотой. В качестве исходного сырья была использована зола ТЭЦ-4 г. Омск, РФ. Объем ЗШО на шламохранилище вблизи электростанции составляет ~37 млн. т. Ежегодный прирост составляет ~230 тыс. тонн.

В работе было изучено предварительное обогащение золы и дальнейшая гидromеталлургическая обработка немагнитной фракции. Обогащение включало в себя магнитную сепарацию ЗШО для отделения магнетитового концентрата в отдельный продукт. Содержание магнетита в магнитной фракции увеличилось с 5% до 20%. В немагнитной фракции содержанием магнетита не превышало 1%. Флотационным способом удаляли углерод (недожог). В качестве собирателя использовали керосин марки КО-25, вспенивателем выступал метилизобутилкарбинол. Был определен оптимальный расход собирателя, что позволило выделить концентрат с содержанием углерода ~30% (рисунок 1).

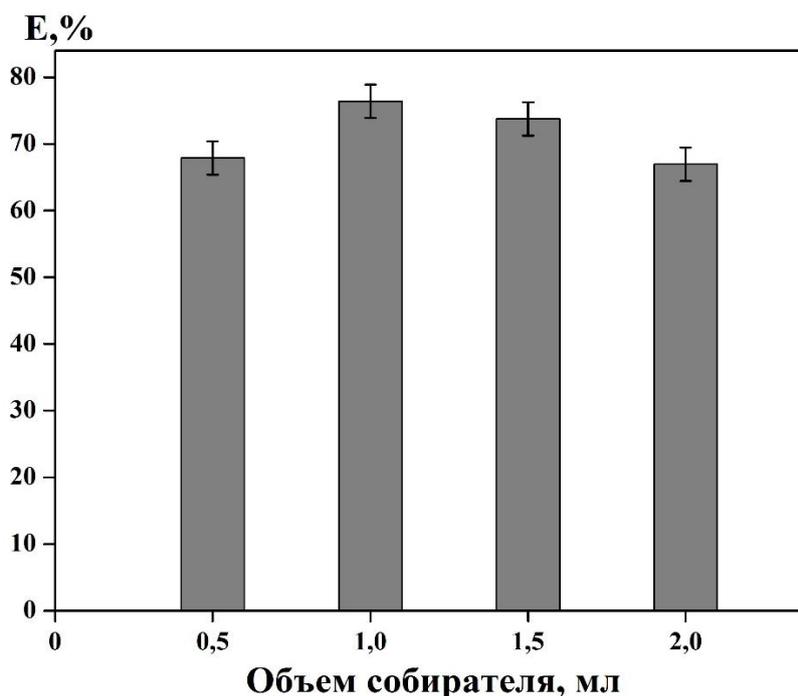


Рисунок 1 – Влияние объема собирателя (керосин КО-25) на эффективность флотации углерода из немагнитной фракции золы крупностью 40-71 мкм

При выщелачивании немагнитной фракции ЗШО соляной кислотой в автоклавных условиях было изучено влияние температуры, концентрации HCl, соотношения Т:Ж и продолжительности процесса на степень извлечения алюминия в раствор. При оптимальных параметрах показатель степени извлечения алюминия в раствор превысил 90%.

Проведено изучение возможности использования полученных алюмохлоридных растворов в качестве коагулянта. Исследования проводились на пробе воды Москва-реки. Были оценены коагулирующие способности раствора для снижения мутности, цветности и перманганатной окисляемости воды, содержащей взвешенные и органические вещества. Результаты исследования свидетельствуют о соответствии обработанной воды предельно допустимым значениям согласно СанПиН 2.1.4.1074-01.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00305).

#### **Список литературы**

1. Делицын, Л.М., Власова А.С., Меленьтьев Г.Б. и др. Угольная зола: отходы или сырьё? // Редкие земли. – 2015. – №2 (5). – С. 126–135.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*М.Д. ДАВЫДОВА, А.Н. ПОНИК, А.А. МАРТЫНОВА, О.И. САТОНИНА*  
АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»  
E-mail: ha\_marusia@mail.ru

Анализ литературных данных показывает, что одним из основных компонентов (от 20 до 80 %) керамических материалов различного назначения является оксид алюминия. Он придаёт керамическим изделиям такие важные эксплуатационные качества, как химическая инертность, низкая хрупкость при высокой твёрдости, высокая механическая прочность и др. [1,2]. В больших объемах алюмосодержащие отходы образуются на предприятии химической отрасли, металлургии, в производстве глинозёма, энергетической отрасли. К таким отходам относят гидроалюмокарбонатные осадки, бокситные, нефелиновые, оксалатные шламы, литейные шлаки, золошлаковые отходы и зола уноса [3]. Однако большинство этих отходов требует дополнительной обработки для обеспечения возможности их использования в производстве керамических материалов.

В АО «НИИПМ» в производственном цикле на фазе утилизации (методом сжигания) образуются алюмосодержащие отходы [4]. В представленных материалах приведены результаты исследования возможности использования вышеуказанных отходов для изготовления керамических материалов. Исследование состава и структурных показателей отходов осуществлялось несколькими методами (результаты приведены ниже). Компонентный состав определяли методом химического анализа отходов, таблица 1.

Таблица 1 – Химический состав отходов

Наименование	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Массовая доля монозёрен
Содержание, %	70	0,02-5,0	0,01-0,10	85-95

Структурный состав отходов определяли методом рентгеноспектрального анализа, таблица 2.

Таблица 2 – Структурный состав отхода, содержащего оксид алюминия

Модификация	Содержание, %
$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
$\alpha$ -SiO <sub>2</sub>	2
$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1

Структурные показатели, такие как дисперсность, форма и размеры частиц оксида алюминия и др. окислов, определяли методом рентгеноструктурного анализа, рисунок 1.

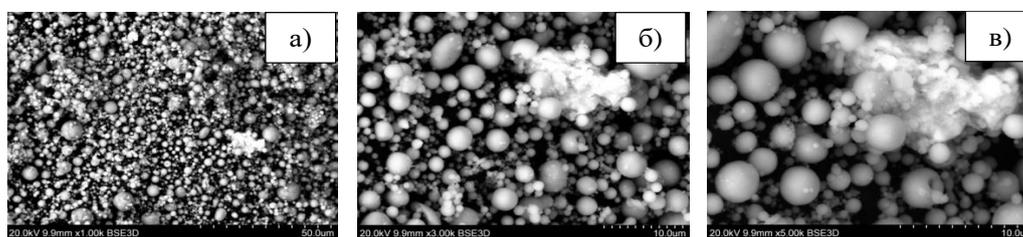


Рисунок 1 – Оптические фотографии поверхности образца при различном увеличении: а) увеличение 1000х,SE; б) увеличение 3000х,SE; в) увеличение 5000х,SE

Рентгеноструктурный анализ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения (3-10 нм) (модель «S-3400N» японской фирмы «НИТАСНИ»), который оснащён энергодисперсионным (ЭД) спектрометром XFlash Detektor 4010 фирмы «Брукер», предназначенным для проведения рентгеноспектрального микроанализа.

Анализ полученных с помощью микроскопа снимков (рисунок1) показал, что размер частиц в отходах колеблется от 0,5 до 10 мкм. Частицы, в основном, имеют сферическую форму, причём массовая доля частиц размером до 5 мкм составляет 85-95 %. Размер частиц оксида алюминия в отходах находится в пределах 2-10 мкм, при массовой доле порядка 90 %.

Известно, что размер частиц окислов, в том числе  $Al_2O_3$ , может существенно влиять на свойства керамических материалов (теплоёмкость, электропроводность и др.). Преобладание ультрадисперсных фракций (< 5 мкм) приводит к появлению новых свойств (оптических, магнитных, электронных) керамических материалов [5].

Из таблицы 1 видно, что содержание оксида алюминия достаточно высоко (70-90 %). Имеются примеси оксида железа (до 5 %) и окиси кремния (0,01-0,1 %).

Из таблицы 2 видно, что в составе отходов оксид алюминия находится в основном в  $\alpha$ -модификации (80 %), что, по литературным данным, является положительным фактором.

На основании проведённых исследований физико-химических свойств алюмосодержащих отходов можно сделать вывод, что данные отходы могут использоваться в качестве сырьевой добавки для получения керамических материалов.

#### **Список литературы**

1. Иванов В.В., Кайгородов А.С., Хрустов В.Р и др. Прочная керамика на основе оксида алюминия, получаемая с использованием магнитно-импульсного прессования композиционных нанопорошков // Российские нанотехнологии. - 2006. - Т. 1.- № 1. – С. 201–207.
2. Брагин В.Б., Иванов В.В., Иванова О.Ф. и др. Износостойкость керамик с тонкой структурой на основе  $Al_2O_3$ , допированного магнием, титаном или цирконием // Перспективные материалы. - 2004. - № 6. – С. 48–55.
3. Огрель А.С. Алюмосодержащие отходы как потенциальное сырьё для производства промышленной продукции // Экологический вестник России. – 2011. № 2. С. 36–40.
4. Мартынова А.А., Батракова Г.М., Шаманов В.А., Баранюк Д.И. Оценка возможности применения отходов уничтожения энергетических материалов в качестве добавки в строительные изделия // Труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых учёных «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», V Форум «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов». – Екатеринбург: УрО РАН, 2017. – С. 94-98.
5. Абдрахимов В.З., Колпаков А.В., Денисов Д.Ю. Кристаллизация муллита при синтезе керамических материалов из отходов производств // Научно-методический электронный журнал концепт. - 2013. - Т. 3. - С. 2716-2720.

## МОНИТОРИНГ ФЛУОРЕСЦЕИНА В ПЛАСТОВЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

*А.А.ДУДКИНА, М.А.ГАВРИЛЕНКО*

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"  
E-mail: ann.star1207@gmail.com

Перспективным направлением развития методов контроля различных объектов является создание оптических сенсоров, преимуществами которых являются низкая стоимость, возможность миниатюризации и автоматизации контроля. Среди оптических сенсоров особый интерес представляют оптоды. Их действие основано на твердофазной экстракции целевого вещества с последующим изменением цвета или интенсивности флуоресценции при обнаружении аналита, что позволяет получить легко измеряемый аналитический сигнал. Как правило, оптод представляет собой твердый носитель с иммобилизованным реагентом. Нами предложено использовать прозрачную полиметакрилатную матрицу для иммобилизации реагентов без потери их способности вступать в аналитическую реакцию с определяемым веществом, сопровождающуюся оптическим эффектом с сохранением прозрачности носителя [1–3].

Разработан способ определения флуоресцеина на полиметакрилатном оптоде при сокращении времени анализа за счет исключения стадии пробоподготовки и улучшения воспроизводимости результата. Результат получен за счет комбинирования твердофазной экстракции, включающей взаимодействие между полимерной матрицей со сшитой внутренней структурой и веществом, последующее отделение матрицы от раствора и оценку концентрации флуоресцеина. В качестве полимера применяют прозрачную полиметакрилатную матрицу, аналитический сигнал представляют в виде интенсивности полосы флуоресценции при 440 нм, количественную и/или качественную оценку количества экстрагированного флуоресцеина проводят по градуировочному графику. Такое обнаружение возможно вследствие взаимодействия флуоресцеина с эфирными группами полиметилметакрилата и его экстракции в полимерную матрицу.

Условия взаимодействия флуоресцеина с полиметакрилатной матрицей определены в результате изучения изменения интенсивности полосы флуоресценции при 440 нм от концентрации при различном времени контакта с раствором аналита объемом 10–50 мл. Установлено, что оптимальное значение pH раствора аналита для экстракции в полиметакрилатную матрицу и образования окраски соответствует 9. С увеличением времени контакта диапазон линейного характера зависимости интенсивности флуоресценции от концентрации снижается, но при этом возрастает чувствительность к малым концентрациям. Поэтому в качестве условий определения флуоресцеина выбраны время контакта 15 мин при pH 9 раствора.

Для проведения анализа внутрь шприца объемом 20 мл помещали пластинку 4x5 мм прозрачной полиметакрилатной матрицы, затем шприц опускали в пластиковую жидкость таким образом, чтобы можно было отобрать смесь фракций объемом 10 мл. После отбора впускали небольшое количество воздуха 2–4 мл в шприц для того, чтобы было удобно встряхивать шприц, содержащий пластинку с анализируемым раствором. После 15-минутного встряхивания сливали анализируемый раствор, вынимали пластинку полиметакрилатной матрицы, высушивали ее фильтровальной бумагой и измеряли интенсивность флуоресценции при 440 нм с использованием серийного спектрофотометрического анализатора Флюорат 02-3М.

Сравнение с эталонным фотометрическим способом проводили следующим образом. Пробу пластовой воды из нефтеперерабатывающей скважины, содержащая флуоресцеин, предварительно отделяли от нефти в делительной воронке, механические примеси удаляли фильтрованием через бумажный фильтр ФОФС-17 "синяя лента". Затем пробу осветляли путем осаждения коллоидных примесей с помощью коагулянта FeCl<sub>3</sub> в щелочной среде. Полученный раствор центрифугировали вместе с осадком при 8–10 тыс. об/мин до тех пор,

пока проба не приобретала прозрачность. В пробу добавляли 3-5 капель 2 н NaOH для получения раствора с pH 9. При этом значительно возрастает интенсивность при максимуме флуоресценции 440 нм, что обеспечивает определение концентрации флуоресцеина в исследуемой пробе (таблица 1).

Предлагаемый способ обеспечивает значительное повышение воспроизводимости определения флуоресцеина в буровой жидкости по сравнению с известным способом за счет концентрирования флуоресцеина в объеме полимерной матрицы. Относительная погрешность определения уменьшилась в среднем в 1.5 раза для концентраций свыше 0,10 мг/л при одновременном исключении стадии пробоподготовки.

Таблица 1 – Сравнительные данные экспериментальной проверки известного и предлагаемого способа в воде (Sr, относительная погрешность определения)

Концентрация флуоресцеина мг/л	Оптод		Флуориметрия раствора	
	Найдено, мг/л	Sr, %	Найдено, мг/л	Sr, %
0.10	0.09±0.02	13	0.10±0.02	16
0.50	0.48±0.03	3.0	0.49±0.05	4.4
Время, мин	65		20	

Для определения флуоресцеина в модельной и буровой жидкости в образец объемом 1 л вносили 0,7 мг флуоресцеина, затем встряхивали на механическом вибрационном смесителе со скоростью встряхивания 30 вибраций в минуту в течение 15 минут для равномерного распределения вещества. Затем проводили определение по разработанной методике (таблицы 2, 3).

Таблица 2 – Результаты определения флуоресцеина в буровой жидкости ( $n=3\div 4$ ,  $P=0,95$ )

Метод	Время, мин	Введено, мг/л	Найдено, мг/л
Оптод	20	0,70	0,77±0,11
Флуориметрия раствора	65	0,70	0,72±0,24

Таблица 3 – Результаты определения флуоресцеина с концентрацией 8 мкг/л в водно-углеводородной эмульсии ( $n=3\div 4$ ,  $P=0,95$ )

Метод	Время, мин	Введено, мкг/л	Найдено, мкг/л
Оптод	20	8,0	7,6±1,1
Флуориметрия раствора	65	8,0	7,8±1,7

Коэффициент корреляции между аналитическим сигналом и концентрацией флуоресцеина натрия составляет 0,9999 в области 0,5 – 120 мкг/л и снижается до 0,998 при более низких концентрациях, что затрудняет анализ. Таким образом, рекомендуемый диапазон определения флуоресцеина составляет 0,5 – 50 мкг/л и ниже.

#### **Список литературы**

1. Гавриленко Н.А., Саранчина Н.В., Федан Д.А., Гавриленко М.А. Твердофазно-спектрофотометрическое иодометрическое определение нитрита и селена (IV) с использованием полиметакрилатной матрицы // Журнал аналитической химии. – 2017. – Т. 72. – №5. – С. 546–560.
2. Gavrilenko N.A., Volgina T.N., Gavrilenko M.A. Colorimetric sensor for determination of thiocyanate in fossil and drill waters // Mendeleev Communication. – 2017, – V.27. – P. 529–530
3. Gavrilenko M.A., Gavrilenko N.A. Novel colorimetric sensor for determination of low molecular heparin // Mendeleev Communication. – 2017, – V.27. – P. 419–420

## ФИЛЬТРУЮЩАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

*Е.В. ДЬЯКОНОВА, Н.А. РОМАНЕНКОВА, Т.А. ХАБАС*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: ekaterina\_96@inbox.ru

Пористая фильтрующая керамика имеет широкий спектр применения. Пористые керамические материалы широко используют для фильтрации кислот, щелочей, горячих газов, расплавов солей и металлов, а также других агрессивных сред при низких и высоких температурах. Их применяют для очистки воздуха и различных горячих газов от твёрдых, радиоактивных и других частиц [1].

Благодаря сочетанию физико-химических свойств наиболее интересна для исследования керамика на основе оксидов  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , а также их смесей. Эти оксиды имеют высокую химическую стойкость и прочность, что позволяет использовать их во многих сферах производства.

Цель данной работы заключалась в создании фильтрующей керамики на основе диоксида циркония с добавлением длиннокристаллического порообразователя карбамида и наноразмерных порошков оксидов циркония и алюминия. Для проведения эксперимента использовался микронный порошок частично стабилизированного диоксида циркония (производство Чепецкого механического завода, г. Глазов, Россия) со средним размером частиц 0,85 мкм, а также нанопорошки диоксида циркония  $n-ZrO_2$  (производство Северский химический комбинат, г. Томск, средний размер частиц 80 нм) и оксида алюминия  $n-Al_2O_3$  (ИХТТ, г. Новосибирск, средний размер частиц 40 нм). Предварительными исследованиями установлены оптимально необходимые содержания добавок в количестве 1,5 мас.%  $n-ZrO_2$  и 0,5 мас.%  $n-Al_2O_3$  от исходной массы.

Рентгенографическим исследованием фазового состава порошкообразного образца микронного порошка диоксида циркония (ЧМЗ) показало содержание в нем 73% тетрагональной фазы и 27% моноклинной. Исследование фазового состава порошкообразного образца  $n-ZrO_2$  зафиксировано наличие тетрагонального диоксида циркония (97 об. %) и кубического оксида иттрия (3 об.%) (рис.1 а. б). Нанопорошок оксида алюминия в основном состоит из  $\alpha-Al_2O_3$ .

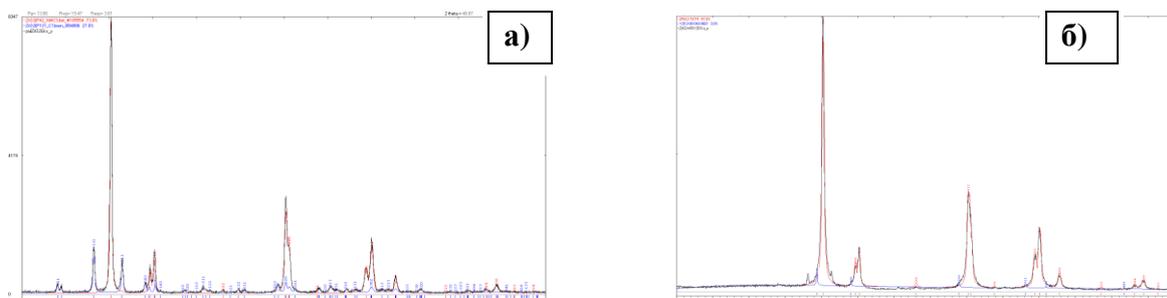


Рисунок 1 – Рентгенограмма порошка диоксида циркония с наложением спектров сравнения: а) ЧМЗ, г. Глазов; б) СХК, г. Томск

В качестве порообразователя был использован иглообразный кристаллический карбамид в количестве 20-30% от исходной массы [2].

Эксперименты с составами, содержащими нанопорошки и порообразователь в количестве 20 и 30%. имеют достаточно высокую пористость и прочность. Наибольшими значениями прочности обладают составы 9 и 10 с добавками наноразмерного диоксида циркония (рис.2).

Образцы керамики, сформированные в виде цилиндров ( $d = 20$  мм,  $h = 8-10$  мм,  $P_{уд} = 200$  МПа), использовались для определения предела прочности при сжатии, в форме дисков ( $d = 36$  мм;  $h = 4-6$  мм,  $P_{уд} = 60$  МПа) - для определения открытой и проницаемой пористости

(рис.3). Обжиг проводился при температурах 1000°C – утильный обжиг, 1580 °C – окончательный обжиг.

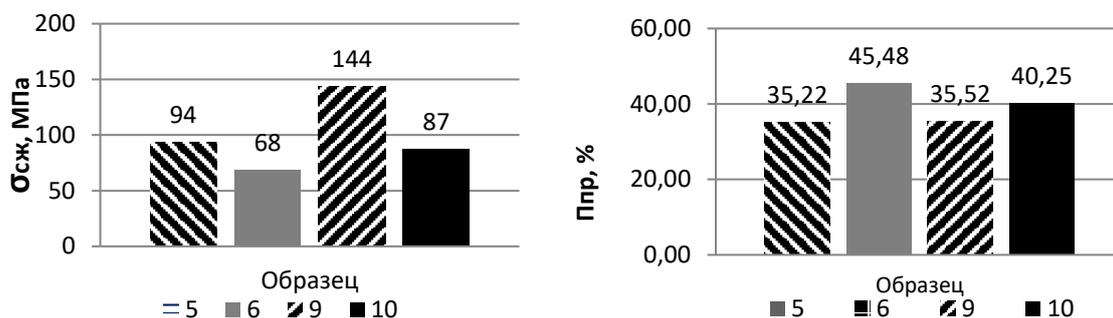


Рисунок 2 - Зависимость предела прочности при сжатии и пористой пористости керамики от состава шихты: 5)  $ZrO_2 - n-Al_2O_3 - 20\%$  карбамид, 6)  $ZrO_2 - n-Al_2O_3 - 30\%$  карбамид; 9)  $ZrO_2 - n-ZrO_2 - 20\%$  карбамид, 10)  $ZrO_2 - n-ZrO_2 - 30\%$  карбамид



Рисунок 3 – Образцы фильтрующей керамики в форме дисков на основе диоксида циркония: а) после утильного обжига, б) после окончательного обжига

Исследование характеристик керамики показало, что добавка нанопорошка, увеличивая пористость, в целом снижает прочность. Наибольшую пористость имеют образцы 6 (45,48%) и 10 (40,25%), наибольшую прочность – образцы с добавками нано  $ZrO_2$ : 9(144 МПа) и 10 (87 МПа). Значение как открытой, так и пористой пористости мало изменяется при увеличении давления прессования от 60 до 150 МПа, и резко падает при дальнейшем увеличении удельного давления до 200 МПа. Поэтому оптимальным выбрано значение удельного давления прессования 150 МПа.

#### Список литературы

1. Zhu X.L., Su X.J. Porous ceramics materials. - China Ceram, 2000. -V 36(4). P. 36–39.
2. Хабас, Т.А., Вакалова Т.В., Камышная К.С., Дьяконова Е.В. и др. Пористая кордиеритовая керамика с порообразователями разной природы //Новые огнеупоры . - 2018. - № .5 - С.46-52.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ ОКИСЛЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ВАКУУМНОГО ГАЗОЙЛЯ

*Ю.А. ИОВИК, Е.Б. КРИВЦОВ*

Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия  
E-mail: jiosephe@gmail.com

Высокая стоимость гидрокаталитических процессов, а также их малая эффективность при переработке такого тяжелого высокосернистого сырья как вакуумный газойль, обуславливают всевозрастающий интерес исследователей к поиску альтернативных путей обессеривания нефтепродуктов. К ним относятся окислительные, экстракционные и адсорбционные способы обессеривания, их совместное применение, биодесульфуризация [1].

Селективное выделение сераорганических соединений осложняется близкой полярностью их и углеводородов, в смеси с которыми они находятся [2]. Одним из эффективных способов повышения полярности сераорганических соединений является их окисление до соответствующих сульфоксидов и сульфонов, легко извлекающихся, например, экстракцией либо адсорбцией. Исследования показывают, что предпочтительным способом удаления полученных производных оказывается адсорбция [3].

В ранее проведенных работах [4] комбинацией окисления и адсорбции удалось снизить содержание серы в вакуумном газойле с 2,02 до 0,28 % мас. Поскольку выделенный концентрат окисленных сернистых и ароматических соединений составляет практически 30 % мас. от окисленного вакуумного газойля и содержит 92 % отн. серы, встает вопрос о возможности его переработки, что и является целью данной работы. В качестве объекта исследования выбран вакуумный газойль Новокуйбышевского НПЗ, являющийся высокосернистым (содержание серы 2,02 % мас.).

Окисление вакуумного газойля смесью пероксида водорода и муравьиной кислоты проводили при комнатной температуре в реакторе, снабженном мешалкой (скорость перемешивания - 2500 об/мин) в экспериментально установленных оптимальных условиях: продолжительность окисления 90 минут, мольное соотношение  $S_0:H_2O_2 = 1:5$ . Мольное отношение  $H_2O_2:HCOOH$  составляло 3:4. Водную фазу удаляли декантацией, далее полученные образцы подвергали хроматографическому разделению на силикагеле марки АСК. Отношение массы образца к массе сорбента составляло 1:1. Менее полярные компоненты смывались с силикагеля гексаном, концентрат окисленных ароматических и серосодержащих соединений – спирт-бензольной смесью.

Крекинг полученного концентрата проводили в автоклавах объемом 12 см<sup>3</sup>. Масса навески окисленного вакуумного газойля составляла 7 г. Материальный баланс рассчитывался следующим образом: выход газообразных продуктов соответствует потере массы реактора с образцом после дегазирования. После удаления жидких продуктов реактор промывали хлороформом и взвешивали. Полученная разница между массой реактора до эксперимента и после определялась как масса кокса. Термообработку проводили при температурах 450 и 500 °С, продолжительность процесса составляла 10, 20 и 30 мин.

Вещественный состав продуктов устанавливали по стандартной схеме (СТО 1246-2011): содержание асфальтенов находили «холодным» методом Гольде, содержание масел и смол в полученных мальтенах определяли методом жидкостно-адсорбционной хроматографии в аппарате Сокслета.

Фракционный состав жидких продуктов крекинга определяли в соответствии с ASTM D2887-08. Содержания серы определяли в соответствии с ГОСТ Р 51947-2002 методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектрометрии на приборе «Спектроскан SL».

Анализ сернистых соединений проводили методом газо-жидкостной хроматографии на хроматографе «Кристалл-2000М» с пламенно-фотометрическим детектором. Качественный состав сернистых соединений определяли путём сравнения времён

*Секция 2 – Рациональное использование природного  
и техногенного минерального сырья и водных ресурсов*

удерживания индивидуальных соединений (тиофен, бензотиофен, дибензотиофен) и анализируемых компонентов.

Таблица 1 – Материальный баланс крекинга серо-ароматического концентрата окисленного вакуумного газойля

Продол жит.	Содержание, % мас.							
	Газ	Жидк.	Кокс	Масла	Смолы	Асф	Н.К. –200 °С	200 – 360 °С
10 мин	11,11	84,59	4,30	44,87	26,58	13,14	28,34	13,42

Установлено, что при крекинге концентрата окисленных ароматических и серосодержащих соединений вакуумного газойля в течение 10 мин наблюдается значительное газо- и коксообразование. Полученные жидкие продукты характеризуется высоким содержанием смолисто-асфальтовых компонентов – около 47 % отн. При этом в составе компонентов масел определяется значительное количество дистиллятных фракций, в том числе бензиновой около 63 % отн.

Степень удаления серы после термообработки составляет 56 % отн. (содержание серы снижается с 1,83 % мас., приходящихся на серо-ароматический концентрат, до 0,83 % мас.).

Таблица 2 – Содержание серы в различных типах сернистых соединений вакуумного газойля и продуктах крекинга

Соед.	Содержание, % мас												
	S <sub>общ</sub>	Тиофены			Бензотиофены				Дибензотиофены				
		T	ΣC <sub>1</sub>	ΣC <sub>2</sub>	ΣC <sub>3</sub>	BT	ΣC <sub>1</sub>	ΣC <sub>2</sub>	ΣC <sub>3</sub>	ДБТ	ΣC <sub>1</sub>	ΣC <sub>2</sub>	
ИВГ*	2,02	отс.									0,140	0,106	0,517
10 мин	0,83	0,016	0,121	0,045	0,020	0,000	0,006	0,013	0,017	0,002	0,009	0,012	

\*исходный вакуумный газойль

Поскольку часть сернистых соединений методом ГЖХ идентифицировать не удалось, закономерности превращений сернистых соединений в процессе крекинга представлены на примере тиофена (Т), бензо- и дибензотиофена (БТ и ДБТ) и их гомологов. Термообработка серо-ароматического концентрата окисленного вакуумного газойля приводит к образованию голаядерных тиофена, бензотиофена и их гомологов, предположительно, за счет деструкции нестабильного обрамления соответствующих структур высокомолекулярных серосодержащих компонентов.

#### Список литературы

1. Barbara Pawelec, Rufino M. Navarro. Toward near zero-sulfur liquid fuels: a perspective review // Catalysis Science & Technology. – 2011. – №1. – P. 23–42.
2. J. M. Campos-Martin, M.C. Capel-Sanchez et al. Oxidative processes of desulfurization of liquid fuels // Journal of chemical technology and biotechnology. – 2010. – №7(85). – P. 879–890.
3. Susan Roces, Nathaniel Dugos et. al. Adsorption of benzothiophene sulphone over clay mineral adsorbent in the frame of oxidative desulfurization // Fuel. – 2017. – № 205. – P. 153–160.
4. Иовик Ю.А., Кривцов Е.Б., Головки А.К. Окислительное обессеривание вакуумного газойля Новокуйбышевского нефтеперерабатывающего завода // Труды XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск, 2017. – Т. 2. – С. 317-318.

## ПЕНОСТЕКольНЫЙ МАТЕРИАЛ С УЛУЧШЕННОЙ РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

*М. Р. КАЙМОНОВ<sup>1</sup>, К. В. ДОРОЖКИН<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Томский государственный университет

E-mail: [snoormax01@yandex.ru](mailto:snoormax01@yandex.ru)

Пеностекло – материал, представляющий собой ячеистое стекло, состоящее из множества герметически замкнутых пузырьков сферической или гексагональной формы размером 0,5-0,2 мм, с истинной пористостью до 85-95 %. Основная область применения пеностекла – теплоизоляция. В сравнении с другими теплоизоляционными материалами, например, такими как пенопласт, пеноплекс, минплита, вспененный полипропилен, пеностекло обладает рядом преимуществ. К достоинствам материала относятся негорючесть, химическая и биологическая устойчивость, долговечность, а также простота механической обработки [1, 2]. Помимо данных характеристик, пеностекло, полученное с углеродсодержащим газообразователем, обладает способностью снижать уровень отраженного и проходящего через материал электромагнитного излучения [3]. Однако по эффективности радиопоглощения пеностекло уступает эффективным видам поглотителей. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на улучшение данных характеристик, особенно в крайне высокочастотной области (свыше 100 ГГц), которая относится к малоизученным.

Цель работы – повысить коэффициент поглощения электромагнитного излучения пеностекла в диапазоне крайне высоких частот 120 – 260 ГГц путем введения в его состав многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ).

Выбор МУНТ в качестве модифицирующей добавки обусловлен известными свойствами нанотрубок: прочность, гибкость, проводимость. Данные свойства обеспечивает каркасная структура материала. При взаимодействии электромагнитной волны с МУНТ она равномерно распределяется по всей поверхности материала. В работе использованы МУНТ с удельной поверхностью 300 м<sup>2</sup>/г и диаметром 10 нм, синтезированные в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (г. Новосибирск).

Ранее было установлено, что модификацию пеностекла МУНТ можно осуществлять объемным и поверхностным способом. В случае, когда трубки вводятся в пенообразующую смесь, происходит их частичное выгорание и нарушается равномерность их распределения в материале, достигнутая на стадии приготовления смеси. В данной работе рассмотрен вариант введения МУНТ путем нанесения на пеностекло покрытия, содержащего трубки в количестве 0,5 мас. %. Объектом исследования выбрано промышленное блочное пеностекло, полученное с использованием сажи. Измерения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения образцов проводились на спектрометре терагерцового диапазона СТД-21 «Центра радиоизмерений ТГУ».

Композиция для покрытия готовилась на основе жидкого стекла с добавлением определенных компонентов. Для равномерности распределения трубок в покрытии использована ультразвуковая ванна. Продолжительность ультразвуковой обработки определялась экспериментальным путем и составила 20 минут. Гелеобразная композиция наносилась на образцы пеностекла тонким слоем, с последующей сушкой при комнатной температуре.

По результатам исследования электромагнитных характеристик образцов пеностекла в зависимости от частоты излучения установлено следующее. Максимальное значение коэффициента поглощения имеет образец с покрытием (0,98 от. ед.), причем коэффициент не изменяется во всем исследуемом диапазоне частот, в отличие от пеностекла без покрытия (рис.1). Для образца с покрытием коэффициент поглощения увеличился в 4,75 раз на частоте 120 ГГц и в 1,75 раз на частоте 260 ГГц, а коэффициент прохождения уменьшился в 78 раз на частоте 120 ГГц и в 42 раз на частоте 260 ГГц.

Таким образом, пеностекло с покрытием, содержащим углеродные нанотрубки, обладает улучшенными радиопоглощающими характеристиками. Кроме того, экспериментальным путем для образцов пеностекла определено значение диэлектрической проницаемости, так для пеностекла без покрытия она составила 1,18, а для пеностекла с покрытием – 1,27, также для данного образца измерена микротвердость по Виккерсу, значение которой составило  $H_V \approx 68$ .

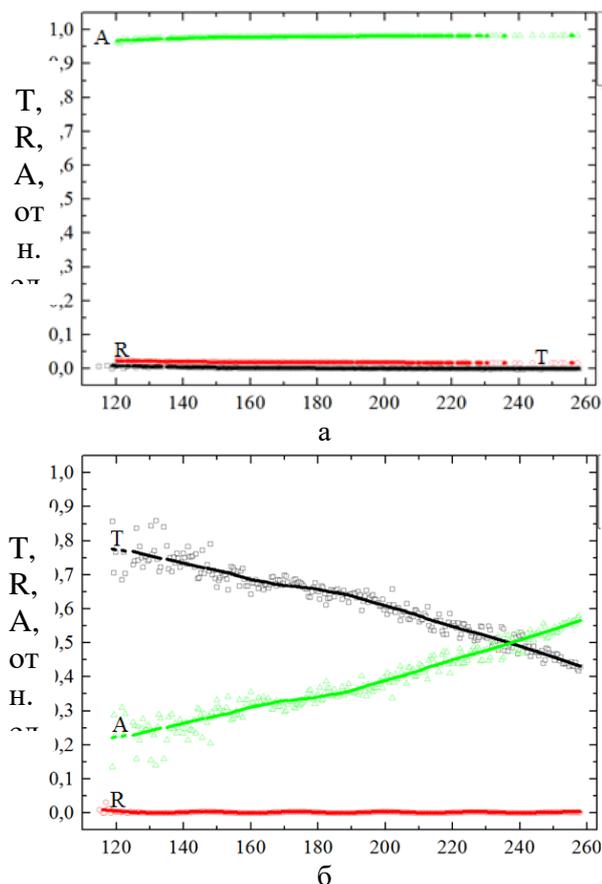


Рисунок 1 – Параметры электромагнитного отклика пеностекла с покрытием (а) и без покрытия (б): Т – коэффициент прохождения; R – отражения; А – поглощения

Проведенное исследование показало, что поверхностная модификация пеностекла МУНТ повышает его радиопоглощающую способность в диапазоне высоких частот 120 – 260 ГГц. Низкая диэлектрическая проводимость стекольной матрицы, пористая структура, а также модификация нанотрубками показывают перспективность использования данного материала в качестве эффективного радиопоглотителя. Учитывая, что исследуемый диапазон частот имеет огромные перспективы использования в медицине для диагностики различных заболеваний, в системах безопасности, для обнаружения взрывчатых веществ, в промышленности для выявления скрытых дефектов в продукции, пеностекло может принести пользу в самых разнообразных сферах.

#### Список литературы

1. Bernardo Enrico, Scarinci Giovanni, Hreglich Sandro // Glass Sci. and Technol.: Internat. Journal of the German Society of Glass Technology (DGG). – 2005. № 1. – С. 7-11.
2. Wu J.P., Voccaccini A.R., Lee P.D., Rawlings R.D. // European Journal of Glass Science and Technology, Part A Glass Technology. – 2007. 48 (3). С. – 133 – 141.
3. Суляев В.И., Казьмина О.В., Семухин Б.С., и др. // Известия высших учебных заведений. Физика.–2012.Т.55. №9/2.–С. 312-314.

## СОСТАВ ПАСТЫ ДЛЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ФАРФОРА

А.С. КУТИЩЕВ, А.А. ДИТЦ

Томский политехнический университет

E-mail: ask92@tpu.ru

Бетатроны получили на сегодняшний день широкое распространение в различных областях. Одним из основных узлов бетатрона является вакуумная камера, которая состоит из нескольких составных узлов: тор – основа, катодный узел, откачной узел [1]. Для сборки этих узлов в изделие, и обеспечения вакуумной плотности и высокой прочности требуется разработать технологию и составы для металлизации фарфора.

В данной работе в качестве основы для создания вакуумных камер и соответственно для нанесения металлизации был использован фарфор, полученный из керамической массы Южноуральского арматурно-изоляторного завода (ОАО «ЮАИЗ»).

Для создания металлизационного покрытия, использовались:

- порошок молибдена марки МПЧ по ТУ 48-19-69-80;
- порошок марганца марки Мн998 по ГОСТ 6008-90;
- в качестве добавки использовался нанопорошок молибдена, полученный электровзрывным способом.

Таблица 1 – Химический состав фарфоровой массы в оксидном выражении в массовых процентах [2]

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Δm <sub>мин</sub>	Сумма
70,51	17,53	0,79	0,29	0,46	0,24	4,14	0,33	5,71	100,00

Для исследования морфологии частиц порошков, изучения структуры керамики на изломе, а также структуры металлизационных слоев был использован растровый электронный микроскоп JEOL JSM 6000.

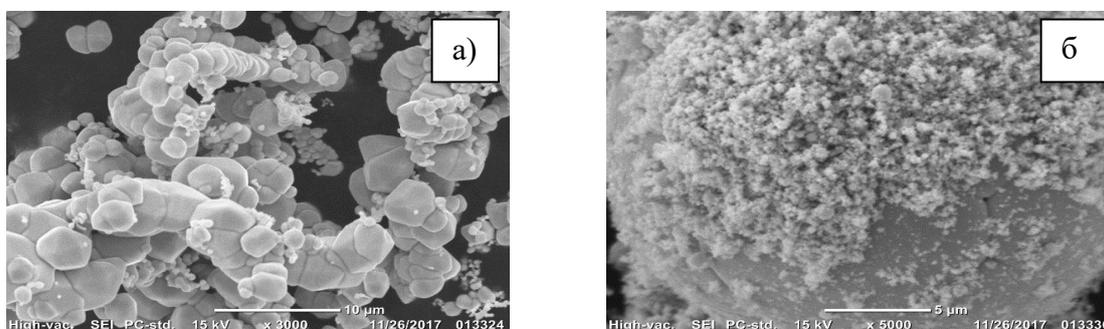


Рисунок 1 – Микрофотографии порошков молибдена  
а) МПЧ, б) нано-порошок

Основой для паст является молибден. Вжигание металлизационных паст на основе молибдена осуществляется в интервале температур от 1150 до 1250 °С и зависит от размера частиц, а также состава стекольной композиции. Марганец в смеси выполняет две функции: окисляясь увеличивает подвижность стеклофазы; защищает молибден от окисления.

В состав композиций металлизационных паст также вводилась добавка в виде нанопорошка молибдена. Нанопорошок молибдена должен увеличить общую площадь перешейков припекаемых частиц, повысив тем самым прочность сцепления металлических частиц друг с другом, что создает разную степень упаковки частиц, и соответственно разную канальную пористость, которая оказывает влияние на движение стекломассы в слое металлизации, регулируя таким образом адгезию металлизации к фарфору.

В качестве основы составов всех металлизационных паст было взято соотношение молибдена к марганцу равное 4:1. Составы композиций представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Составы композиций металлизационных паст

Шифр пасты	Содержание компонента, мас. %		
	Mo	Mn	Нано-Mo
1	80,0	20,0	–
2	75,0	20,0	5,0
3	70,0	20,0	10,0
4	85,0	–	15,0

Вжигание металлизации проводилось при 1200 °С в среде инертного газа.

После проведения вжигания проводили анализ образцов. Микрофотографии аншлифов представлены на рисунке 2.

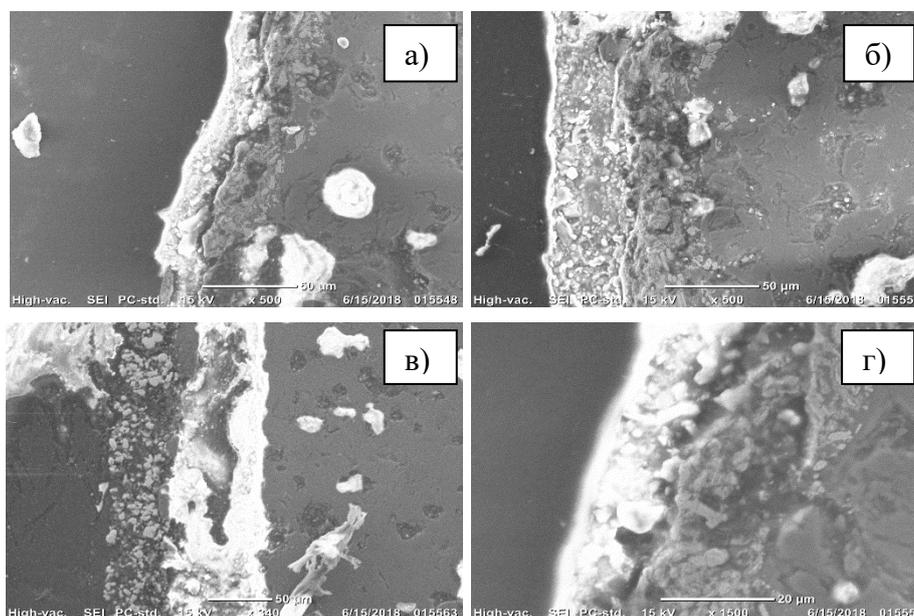


Рисунок 2 – Микрофотографии металлизационных слоев  
а) состав 1; б) состав 2; в) состав 3; г) состав 4

На данных микроскопии, для всех составов хорошо виден слой металлизации, толщина слоя колеблется в интервале 35-45 мкм. Просматривается граница раздела фарфор-переходный слой-металлизация, все слои плотно прилегают друг к другу. Толщина переходного слоя, порядка 20-25 мкм. Металлизационный слой представлен хорошо спеченными частицами, присутствует небольшая пористость. С увеличением количества нанопорошка уменьшается пористость и увеличивается размер зерна.

#### Список литературы

1. Москалев В.А., Чахлов В.Л. Бетатроны: монография / Томский политехнический университет.–Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. –267 с.
2. Колесова Т. В. Выбор компонентов металлизационной пасты для металлизации фарфора / Т. В. Колесова; науч. рук. В. М. Погребенков, А. А. Дитц // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – С. 367-369.

## **РАЗРАБОТКА БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

*Н.Д. МЕДВЕДЕВА, О.Н. МЕДВЕДЕВА*

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

E-mail: isabel16122012@gmail.com

В настоящее время в связи с удорожанием добычи органического топлива в большинстве стран разрабатываются альтернативные источники энергообеспечения различных категорий потребителей, как правило, базирующихся на местных энергетических ресурсах [1]. Как в отечественной, так и зарубежной практике широкое применение находят системы энергообеспечения предприятий и потребителей в сельской местности с использованием одного из альтернативных источников энергии – биогаза, решающего одновременно экологические и агробиологические проблемы. Образование биогаза происходит при переработке отходов в результате анаэробной ферментации органических веществ, при этом одновременно возможно получение эффективных удобрений [2]. Как показывает практика, данный способ энергообеспечения животноводческих предприятий обладает значительными преимуществами.

Производство биогаза из органических отходов дает возможность одновременно решить комплекс задач: энергетическую, агрохимическую (получение удобрений) и экологическую.

Эффективность биогазовых установок зависит от выбора технологической схемы переработки биомассы, способа обогрева и термостатирования специальных емкостей, используемых для анаэробного сбраживания (метантанков). Наличие в составе биогаза вредных и балластных примесей для обеспечения функциональной и эксплуатационной безопасности требует проведения предварительной очистки газа перед использованием. Биоэнергетическая установка используется для переработки отходов сельскохозяйственной деятельности и пищевого производства для выработки экологически безопасных органических удобрений естественного состава, выработки энергии, выработки кормовых добавок, утилизации продуктов производства и жизнедеятельности для сохранения и защиты окружающей среды в агропромышленных зонах. Решение подобных задач является хорошим аргументом в пользу установки экологически безопасных замкнутых циклов активного сельскохозяйственного производства.

На территории Саратовской области было построено два мусороперерабатывающих комплекса в Балаково и Энгельсе, суммарно обслуживающих все левобережье. Правобережье до сих пор не обслуживается ни одним заводом, а потому строительство мусороперерабатывающего комплекса на данный момент является актуальным. Полигоны должны размещаться за пределами городов и других населенных пунктов, размер санитарно-защитной зоны от жилой застройки до границ полигона – 500 м. Кроме того, размер санитарно-защитной зоны должен уточняться при расчете газообразных выбросов [3]. В состав комплекса предлагается включить энергоэффективную биогазовую установку для переработки твердых отходов (рис. 1). Такая установка рассчитывается на определенный объем бытовых отходов от населения. Поскольку для прибыльного функционирования завода требуется спроектированная схема перевозки мусора, следует изучить легитимную схему движения потоков потребления на объекты размещения отходов на территории Саратовской области. Для определения оптимального местонахождения полигона и мусороперерабатывающего завода были решены 18 транспортных задач (одна из разновидностей задач линейного программирования). Предполагается, что издержки при вывозе мусора на оптимально расположенный полигон, равны нулю. Мощность полигона для каждого муниципального образования в каждой задаче представлена без учета отходов, производимых в МО местонахождения полигона, они берутся через подбор данных Симплекс-методом (методом последовательного перехода от одного базисного решения (вершины многогранника решений) системы ограничений задачи линейного

программирования к другому базисному решению до тех пор, пока функция цели не примет оптимального значения (максимума или минимума)).

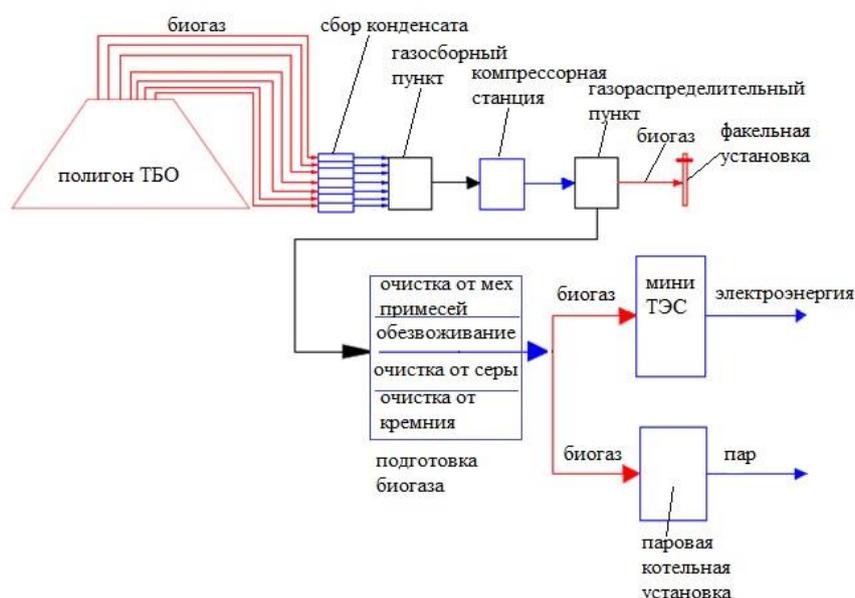


Рисунок 1 – Биоэнергетический комплекс

Выявив оптимальное нахождение для построения завода, включающего в себя биоэнергетическую установку, возможен расчет вырабатываемой энергии для обеспечения населения. Отходы становятся исходным материалом для получения качественной новой продукции. При этом продукция на выходе обладает собственной ценностью и эффективно применяется в последующих этапах всего процесса.

Для определения нагрузки, размеров, теплоизоляции и тепловых потерь реактора удобнее пользоваться специальным программным комплексом, позволяющим определить объемы реакторов по количеству проживающих в населенном пункте жителей. Анализ полученных результатов показывает, что использование биогазовой установки, например, на нужды животноводческих хозяйств позволяет сэкономить порядка 17,6 т.у.т на теплоснабжение, при этом на собственные нужды вырабатывается до 34 % биогаза.

По результатам сравнительного анализа видов анаэробных реакторов были определены факторы, влияющие на анаэробные процессы и разработана модель, определяющая по антропогенной нагрузке объем поступающего сырья для переработки, количество реакторов, их конструктивные и теплоизоляционные параметры, выход метана и разработан алгоритм расчета необходимого количества метана для подогрева субстрата с учетом тепловых потерь.

#### Список литературы

1. Семенова К.А. Количественная оценка биоэнергетического потенциала томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С.179-185.
2. Могилат Г.А. Использование биогазовых комплексов/ Г.А. Могилат, К.Г. Чечко // Инновации. Образование. Энергоэффективность: материалы XI науч.- практ. конф. – Минск: ГАЗ-ИНСТИТУТ, 2017. – С. 76-77.
3. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов: инструкция/ Институт экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина РАМН. – Москва, 1998. – 225 с.

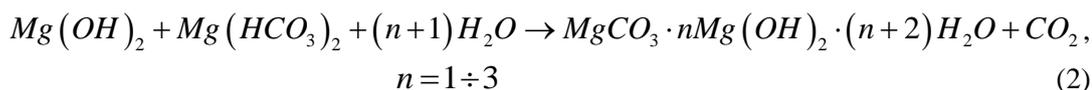
## ТВЕРДЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО В ВОДЕ

*А.В. ОХЛОПКОВА, Н.А. МИТИНА*

Томский политехнический университет

E-mail: annokhl3@yandex.ru

Согласно общепринятой классификации магнезиальное вяжущее относится к воздушным вяжущим веществам, поэтому обладает низкой сопротивляемостью по отношению к воде. Это связано с особенностями фазового состава продуктов твердения. Традиционное магнезиальное вяжущее – это тонкомолотый порошок каустического магнезита MgO, затворенный водными растворами солей хлорида или сульфата магния. При этом в продуктах твердения преобладают кристаллогидраты – гидроксихлориды и гидокисульфаты магния. Обладая высокой прочностью и возможностью создания высокопрочной и плотной структуры, данные вещества растворимы в воде. В связи с этим во влажной среде, а особенно в воде, происходит разрушение сформированной структуры вымыванием хлористых и сульфатных солей. Водостойкое гидравлическое магнезиальное вяжущее отличается наличием в продуктах твердения водонерастворимых соединений – гидрокарбонатов магния, образующихся при затворении каустического магнезиального порошка водным раствором бикарбоната магния (БКМ) [1]. Образование гидрокарбонатов магния протекает в соответствии со следующими реакциями:



с образованием гидрата гидроксокарбоната магния и диоксида углерода, который вступая во взаимодействие с избытком гидроксида магния, образует вторичный бикарбонат магния:



Вторичный бикарбонат магния вновь взаимодействует с гидроксидом магния по реакции (3) с образованием новой порции гидрата гидроксокарбоната магния, который вместе с гидроксидом магния образует первичные продукты гидратации магнезиального цемента. Таким образом, в результате последовательного и циклического протекания реакций (1, 2, 3) в цементном камне образуются две основные кристаллические фазы – гидроксид магния и гидрат гидроксокарбоната магния.

Результатом формирования гидрокарбонат-магнезиальной структуры является способность твердеть и давать прочный кристаллический сросток не только на воздухе, но и в воде. По данным исследований [1], прочность твердеющей в воде композиции превышает прочность при твердении на воздухе. Это связано с процессом непрерывного образования гидроксида магния – обязательной реакционной составляющей системы, а также с ионообменными процессами между твердеющей системой и средой твердения. В результате изменяются свойства среды твердения воды, по которым можно судить об эффективности протекания процессов гидратации и твердения. В связи с этим целью данной работы являлось исследование изменений характеристик водной среды при твердении образцов гидравлического магнезиального вяжущего. В соответствии с целью задачами исследования были определение изменения pH воды и концентрации бикарбонат-ионов  $HCO_3^-$  и карбонат-ионов  $CO_3^{2-}$  в процессе твердения в течение 3 сут.

Для работы были использованы каустический магнезиальный порошок марки ПМК-75 производства ООО «Сибирские порошки» (Иркутская область) и водный раствор бикарбоната магния с концентрацией по бикарбонат-иону 13 г/л. Водотвердое отношение составляло В/Т = 0,46. Сформованные образцы предварительно твердели в течении 24 часов в воздушно-сухой среде без доступа окружающего воздуха. Далее образцы были погружены

в дистиллированную воду на разное время (15 мин, 1 ч, 3 ч, 6 ч, 24 ч и 72 ч). Для предотвращения проникновения окружающего воздуха емкости с водой и образцами герметично закрывались. По достижении контрольного времени образец извлекали и воды, измеряли рН воды и отбирали пробу воды для определения концентрации бикарбонат-ионов  $HCO_3^-$  и карбонат-ионов  $CO_3^{2-}$ . Определение концентрации ионов проводили титрометрическим способом с использованием индикаторов фенолфталеин (на  $CO_3^{2-}$ ) и метиловый оранжевый (на  $HCO_3^-$ ) (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1 – Результаты определения характеристик водной среды твердения

Время нахождения образца в водной среде, ч	рН водной среды	Концентрация бикарбонат-ионов, Сгк, мг/л	Концентрация карбонат-ионов, Ск, мг/л
0	5,70	0	0
0,25	6,40	42,7	0
1	7,57	54,9	0
3	9,08	73,2	0
6	10,25	91,5	0
24	10,00	97,6	12
72	9,53	97,6	30

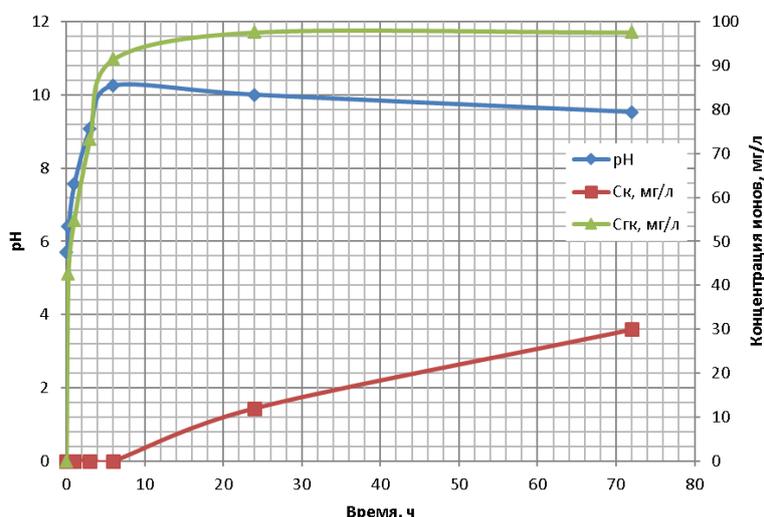


Рисунок 1 – Зависимость изменения характеристик водной среды от времени твердения

Уменьшение рН свидетельствует о повышении концентрации  $H^+$ - ионов, что идет параллельно с появлением карбонат ионов. Предположительно идет реакция:



Карбонат-ионы  $CO_3^{2-}$  взаимодействуя с гидроксида магния, который постоянно образуется при нахождении образца в воде в слабозакристаллизованном высокореакционном состоянии, способствуют появлению новых порций бикарбоната магния (реакция 3). В результате формируется большее количество гидрокарбонатов магния, которые накапливаясь перекристаллизуются, образуя прочную водостойкую гидрокарбонат-магнезиальную структуру.

#### Список литературы

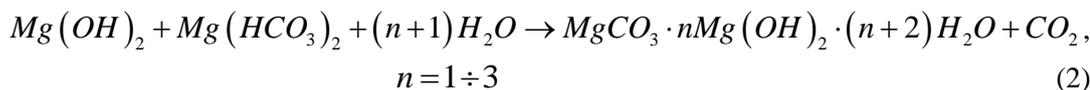
1. Митина Н.А., Лотов В.А. Формирование структуры цементного камня при гидратации и твердении гидрокарбонатного магнезиального вяжущего // Строительные материалы. - 2017 - №. 8. - С. 68-73.
2. Mitina N.A., Revva I.B., Ditts A.A., Simonov D.V. Waterproof Magnesia Binder for Composite Materials Key Engineering Materials. 2016. Vol. 712. - P. 182-187.

## ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА КАУСТИЧЕСКОГО МАГНЕЗИАЛЬНОГО ПОРОШКА НА СВОЙСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МАГНЕЗИАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО

*В.О. ПИЛЬНИКОВА, Н.А. МИТИНА*  
Томский политехнический университет  
E-mail: pilnikova.vic@gmail.com

Уровень свойств композиционных цементных материалов определяется в первую очередь химическим и минералогическим составом применяемого вяжущего. Качественные характеристики минерального вяжущего, порошка цемента обусловлены присутствием и количеством реакционноспособных активных составляющих. Это гидравлически активные минералы портландцементного клинкера, частицы полуводного гипса гипсового вяжущего, активный каустический оксид магния в магнезиальном вяжущем. Гидравлическая реакционная активность минерального состава вяжущего зависит от технологических режимов термообработки. Классическое магнезиальное вяжущее должно характеризоваться большим содержанием активного MgO, получаемого при обжиге магнезиальных пород в температурном интервале 600-800 °С. При этом формирующиеся частицы оксида магния должны обладать определенной степенью кристалличности и размером кристаллов до 35-43 нм [1]. Содержание активного оксида магния близкое к 100 % в магнезиальном вяжущем не желательно в связи с возможностью возникновения трещин при гидратации, так как образование гидроксида магния протекает с большим увеличением объема. Наиболее прочный бездефектный магнезиальный оксихлоридный камень получают при содержании 75-84 % активного MgO и с остатком недоразложившихся частиц карбоната магния с высокодефектной структурой [2].

В отличие от классического оксихлоридного магнезиального вяжущего гидравлический магнезиальный камень получают с применением водного раствора бикарбоната магния (БКМ). Фазовый состав цементного камня формируется в результате протекания следующих реакций [3]:



с образованием гидрокарбонатов магния и гидроксида магния как основных структурных составляющих.

Целью данной работы является установление влияния состава каустических магнезиальных порошков на прочностные свойства гидравлического магнезиального вяжущего. В связи с этим основными задачами исследования является определение количества активного оксида магния в каустических магнезиальных порошках и прочностных характеристик гидравлического магнезиального камня на их основе.

Объектом исследования были каустические магнезиальные порошки производства ООО «Сибирские порошки» Иркутская область и «лежалые» магнезиальные порошки после долгого хранения того же производства, их состав представлен в таблице 1. Содержание активного MgO определялось титриметрическим методом в соответствии с ГОСТ 22688-77.

Для установления влияния содержания активного оксида магния в каустических порошках на свойства гидравлического магнезиального камня, образцы, твердевшие в водных условиях в течение 28 суток, испытывались на прочность при сжатии. Результаты исследований представлены в таблице 2

*Секция 2 – Рациональное использование природного  
и техногенного минерального сырья и водных ресурсов*

Таблица 1 – Химический состав каустического магнезиального порошка

Материал	Содержание оксидов, мас. %							
	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Δ m <sub>пр</sub>	Сумма
Магнезит исходный (порода)	46,88	1,60	0,59	0,85	0,80	0,29	48,29	100
Каустический магнезит	75,64	3,18	0,62	4,24	0,83	0,32	16,85*	100

\*- потери при прокаливании каустического магнезита, обожженного при 800 °С, связаны с наличием неразложившегося MgCO<sub>3</sub> с дефектной структурой.

Таблица 2 – Результаты испытаний каустических магнезиальных порошков

Материал	Содержание активного оксида магния MgO, %	Прочность при сжатии, МПа
Каустический магнезиальный порошок «свежий»	67,8	30,4
Каустический магнезиальный порошок «лежалый»	59,5	35,6

Данные результатов испытаний свидетельствуют, что наибольшую прочность имеют образцы на основе магнезиального порошка с пониженным содержанием активного оксида магния - «лежалый» каустический магнезит. Это объясняется тем, что для формирования гидрокарбонатной структуры гидравлического магнезиального камня необходимо непрерывное образование гидроксида магния Mg(OH)<sub>2</sub> в слабозакристаллизованном состоянии проявляющем большую активность как по отношению к бикарбонатной составляющей магнезиальной вяжущей композиции (реакция 2), так и по отношению к углекислому газу CO<sub>2</sub> воздуха. Поэтому частично прогидратированный за счет влаги воздуха каустический магнезиальный порошок показывает хорошие результаты по прочности. Присутствие недоразложившихся частиц карбоната магния MgCO<sub>3</sub> и частичная карбонизация из воздуха дает при затворении водным раствором бикарбоната магния дополнительные упрочняющие карбонатные фазы в гидравлическом магнезиальном камне. Особенно это проявляется при твердении гидрокарбонатного магнезиального вяжущего в воде. Водная среда благоприятствует постоянному образованию гидроксида магния, обеспечивая реакционную способность системы.

Таким образом, получение прочного водостойкого магнезиального вяжущего не только возможно, но и целесообразно, на основе низкомарочных и «лежалых» каустических магнезиальных порошков.

#### **Список литературы**

1. Черных Т.Н. Свойства магнезиального вяжущего из бруситовой породы и их взаимосвязь с размерами кристаллов периклаза / Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2006. - № 1. – С. 52-53.
2. Зуев В.В., Поцелуева Л.Н., Гончарова Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа свойств твердотельных материалов (включая магнезиальные цементы). – Санкт-Петербург, 2006. – 139 с.
3. Митина Н. А., Лотов В. А. Формирование структуры цементного камня при гидратации и твердении гидрокарбонатного магнезиального вяжущего // Строительные материалы. - 2017 - №. 8. - С. 68-73.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

*А.А. СЕМКЕ, А.С. ПРИМАКОВ, О.В. КАЗЬМИНА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: poltoranina@mail.ru

Предложена одностадийная технология получения пористого заполнителя, основанная на синтезе гидратированных полисиликатов из смеси кремнеземистого сырья с гидроксидом натрия. Опробованы шесть композиций пенообразующей смеси. Выбор исходного кремнеземистого сырья осуществляли с учетом ранее установленных требований: материал должен иметь высокую дисперсность (менее 100 мкм) и достаточное для стеклообразования количество оксида SiO<sub>2</sub> (не менее 70 мас. %) [1, 2]. Этим показателям отвечает природный трепел и отход металлургического производства – микрокремнезем. Трепел отличается от кондиционных кварцевых песков, используемых в стекловарении, пониженным содержанием стеклообразующего оксида SiO<sub>2</sub> и повышенным содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Микрокремнезем соответствует марке песка, который используют для производства пеностекла, стеклотары, изоляторов, труб (табл. 1).

Таблица 1– Химический состав кремнеземистых компонентов

Наименование материала	Содержание оксидов, мас. %					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Δm <sub>пр.</sub>
трепел	76,16	7,52	4,10	1,05	0,75	8,73
микрокремнезем	91,70	0,50	0,40	1,20	-	2,00

Установлено, что природный трепел содержит крупнозернистые частицы, представленные глинистыми агрегатами в количестве 3 – 7 мас %, поэтому материал предварительно сушили и измельчали в шаровой мельнице. Микрокремнезем представлен в основном частицами размером менее 0,5 мкм и не требует дополнительной подготовки. По минералогическому составу трепел представляет собой аморфно-кристаллическое сырье. На рентгенограмме присутствует небольшое аморфное гало и максимумы отражения, отвечающие кремнезему различных модификаций, а также незначительные дифракционные максимумы характерные для альбита. Микрокремнезем является рентгеноаморфным материалом.

Способ получения заполнителя включает смешивание трепела с микрокремнеземом, с последующим добавлением 45 % раствора NaOH в количестве 23 мас. %, в течение двух минут, после чего в гранулятор подавали воду в количестве 7 мас. %, снижали число оборотов вращения и гранулировали еще две минуты. Использование 45 % раствора щелочи в количестве 23 мас. % соответствует минимально возможному содержанию в смеси гидроксида натрия – 10,5 мас. %. Таким образом, эксперименты проводили на составах с минимальным количеством щелочи, которую вводили в смесь через раствор, что обеспечивало более полное протекание реакций силикатообразования в каждой грануле.

Полученные сырьевые гранулы высушивали при температуре 200 °С до конечной влажности менее 1,5 %. Требование ограничения влажности гранул связано с последующим процессом вспенивания. Повышенное содержание воды приводит к неоднородной структуре вспененных материалов, наличию крупных полостей, что сказывается на прочности готового пористого материала. По данным рентгенофазового анализа установлено, что на рентгенограммах, высушенных (до 200 °С) гранул всех составов, присутствуют максимумы отражения, отвечающие силикату натрия. С увеличением в шихте микрокремнезема интенсивность дифракционного максимума дисиликата растет, что указывает на более интенсивное развитие процессов силикатообразования. На рентгенограмме высушенной гранулы, полученной из шихты без микрокремнезема, наблюдаются дифракционные максимумы, отвечающие кварцу и два незначительных рефлекса, характерные для дисиликата натрия. При добавлении в исходную шихту микрокремнезема интенсивность максимального

рефлекса, отвечающего кварцу, снижается, появляются новые рефлексы, соответствующие дисиликату натрия, а также аморфное гало большей площади.

Вспенивание смеси осуществлялось при относительно низких температурах (830-850°C). Количественный рентгенофазовый анализ заполнителя показал, что количество стеклофазы в готовом продукте зависит от содержания в исходной шихте микрокремнезема. С увеличением микрокремнезема от 10 до 20 %, содержание стеклофазы увеличивается с 74 % до 78 % соответственно (табл. 2). Количество микрокремнезема в исходной шихте 30 % приводит к уменьшению стеклофазы до 64 %, а при содержании микрокремнезема 40 и 50 % количество стеклофазы увеличивается до 69 %. Различное содержание стеклофазы в готовом продукте объясняется процессами кристаллизации стекла, протекающими на стадии вспенивания гранул. На рентгенограммах всех образцов присутствуют максимумы отражения, отвечающие кварцу, и появляются новые максимумы отражения, соответствующие кристобалиту. С увеличением в шихте микрокремнезема интенсивность максимумов кристобалита повышается. При условии, что новообразования не являются центрами напряжений, кристаллизационные процессы должны увеличивать прочность готового материала.

Значения прочности гранулированного материала показали следующее. С увеличением содержания в шихте микрокремнезема до 30 % механическая прочность гранул увеличивается до 3,9 МПа, свыше этого количества прочность снижается до 3,3 МПа, но превышает прочность пеностекла без добавок микрокремнезема 1,5 МПа. Прочность материала зависит не только от количества кристаллической фазы в нем, но и от соотношения остаточного кварца и образующегося кристобалита. С увеличением содержания в шихте микрокремнезема интенсивность максимума отражения кристобалита растет, а интенсивность кварца уменьшается. Для образца с микрокремнеземом в количестве 30 % наблюдается одинаковая интенсивность максимумов отражения кварца и кристобалита. Именно эти образцы отличаются повышенной механической прочностью, что обусловлено как растворением остаточного кварца в расплаве, так и кристаллизацией кристобалита.

Таблица 2 – Свойства заполнителя в зависимости от содержания микрокремнезема в шихте

содержание микрокремнезема, %	температура вспенивания, оС	средняя плотность гранул, кг/м <sup>3</sup>	водопоглощение, %	прочность на сжатие, МПа	содержание в заполнителе фазы, %	
					стекло	кристал.
0	860	420	7.2	1.5	71	29
10	860	415	8.2	2.8	74	26
20	840	400	8.2	3.3	78	22
30	820	380	8.3	3.9	64	36
40	820	375	8.4	3.3	69	31
50	820	375	8.5	3.3	70	30

Таким образом, на основе природного и техногенного кремнеземистого сырья получен пористый заполнитель по одностадийной технологии. Роль микрокремнезема заключается в образовании силикатного стекла, что не наблюдается без его участия. Эти исследования показали возможность снижения количества щелочи и использования в качестве одного из компонентов шихты отхода, что позволяет снизить стоимость технологического процесса.

#### Список литературы

1. O. Kazmina, V. Vereshchagin, Physicochemical Modeling of Composition of Foam Glass-Crystal Materials, J. Glass Phys. Chem. 41 (2015) 122–126.
2. O. Kazmina, V. Vereshchagin, A. Abiyaka, Prospects for use of finely disperse quartz sands in production of foam-glass crystalline materials, Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). 65 (9-10) (2008) 319–321.

## РАДИОЗАЩИТНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ С АРСЕНИДОМ ГАЛЛИЯ

*В.И.СТЕБЕНЕВА<sup>1</sup>, К.В. ДОРОЖКИН<sup>2</sup>, Ч.СЫБО<sup>1</sup>, О.В. КАЗЬМИНА<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: stebeneva\_valeriya@mail.ru

Чрезвычайно актуальным является поиск новых направлений, обеспечивающих экологическую чистоту технологии полупроводникового производства, в частности переработки, образующихся GaAs-содержащих отходов, которые относятся к 1 классу опасности. В настоящее время способы переработки данных отходов предусматривают их разделение с целью выделения галлия и мышьяка и являются многостадийными, сложными в аппаратном оформлении [1, 2]. В данной работе предлагается подход, рассматривающий полное использование GaAs-содержащих отходов (без выделения отдельных элементов) в качестве компонента смеси для получения радиозащитного материала [3, 4]. Предпосылкой такого выбора послужили особенности электронного строения арсенида галлия и его электрофизические свойства.

Для лабораторных исследований приготовлены образцы, полученные с применением вспученного перлита, жидкого стекла и отхода. Основные физико-механические характеристики образцов приведены в таблице 1, из результатов которых следует, что с ростом содержания в материале отхода плотность и прочность пористых образцов увеличивается.

Таблица 1–Физико-механические характеристики полученных образцов размером 10×10 мм

№	Компоненты, входящие в состав	Содержание в материале отхода, об. %	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
1	вспученный перлит,	-	330	0,3
2	жидкое стекло, ПАВ,	10	350	1,5
3	отвердитель, отход	20	510	4,7
4		30	560	6,0

Исследование радиопоглощающих свойств осуществляли в диапазоне частот 120 - 260 ГГц с применением радиоспектроскопа типа E8363B. Из результатов измерений (рисунок 1) следует, что образцы обладают свойством поглощать электромагнитное излучение, так как значения коэффициента отражения и прохождения минимальны. Коэффициент поглощения, в свою очередь, при увеличении содержания отхода до 30 об. % увеличивается на частоте 120 ГГц 2,2 раза, а на частоте 260 ГГц в 1,5 раза. Коэффициент прохождения при этом закономерно снижается. Так, на частоте 120 ГГц наблюдается разница в 11 раз, а на частоте 260 ГГц в 5 раз, по сравнению со значениями для образца, полученного без отхода. Следовательно, исследуемый композит проявляет поглощающие свойства, наиболее ярко выраженные на частоте 120 ГГц.

Также проведены измерения действительной и мнимой диэлектрической проницаемости образцов, значения которой указывают на возможность прохождения электромагнитных волн сквозь исследуемый материал. Мнимая часть в комплексной диэлектрической проницаемости представляет собой величину энергии, которая рассеивается в виде теплоты. Действительная часть указывает на наличие диэлектрических свойств, т.е. чем выше диэлектрическая проницаемость, тем выше полярность вещества [5]. Оценка действительной и мнимой диэлектрической проницаемости композита показала, что при переходе от образца без содержания отхода к образцу с максимальным содержанием добавки (30 %) наблюдается снижение мнимой диэлектрической проницаемости с 0,1 отн. ед. до 0 отн. ед. Действительная составляющая также уменьшается с 2 отн.ед. до 1,4 отн. ед.

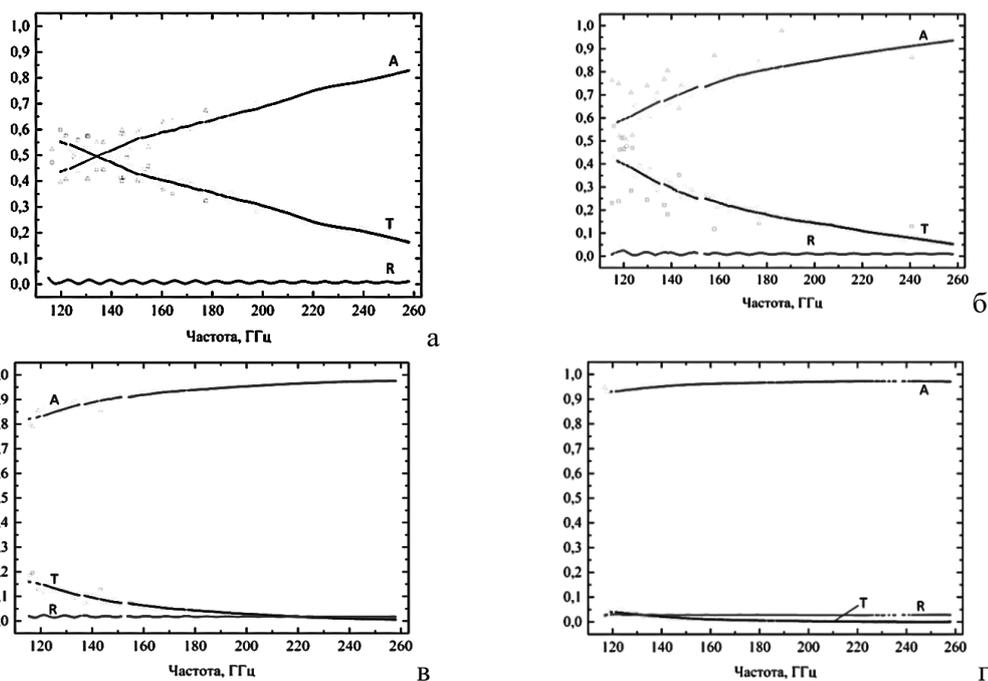


Рисунок 1 - Параметры электромагнитного отклика композита, содержащего отход:  
а) 0 %; б) 10 %; в) 20 %; г) 30 %. Коэффициенты, отн. ед.: Т – прохождения; R – отражения; А -  
поглощения

На основе проведенных исследований сделан вывод о том, что использование отхода арсенида галлия в количестве 30 об. % положительно сказывается на способности материала поглощать электромагнитное излучение в диапазоне крайне высоких частот 120 – 260 ГГц. Дальнейшее увеличение количества отхода в готовом материале отрицательно сказывается на его физико-механических характеристиках. Направление использования GaAs-содержащих отходов полупроводникового производства в качестве компонента для получения радиопоглотителя считаем перспективным и рекомендуем для облицовки безэховых камер.

#### Список литературы

1. Наумов А.В., Гринберг Е.Е., Быков И.С., Беляев В.В. Особенности физических и химических методов для экологичной регенерации отходов производства электронной промышленности // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2010. № 1. С. 57-63.
2. Кольцов В.Б., Ларионов Н.М., Слесарев С.А., Баркинхоева Т.А. Выделение галлия из многокомпонентной эвтектики при утилизации технологических отходов // Известия вузов. Электроника, 2016, т. 21 № 6, с. 537 - 542
3. Латыпова А.Ф. Калинин Ю.Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 6. – С. 70–76.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №5. С. 7–17.
5. Ковнеристый Ю.К. Лазарева И.Ю., Раваев А.А. М. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения: Наука, 1982. - 164 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

*Р.В. ТАРНОВСКИЙ, А.А. ДИТЦ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: tarnovskiy@tpu.ru

**Введение.** Одним из перспективных направлений электроники и электротехники является производство высокотеплопроводных материалов и изделий на основе нитрида алюминия. Нитрид алюминия обладает рядом уникальных свойств по сравнению с другими материалами, применяемыми в микроэлектронике [1]. Применение нитрида алюминия в качестве основы при изготовлении мощных светодиодов требует нанесение на него токопроводящих паст. Разработанные в большом количестве низкотемпературные серебряносодержащие пасты рассчитаны на оксидные материалы, и поэтому имеют низкую адгезию к нитриду. Увеличить адгезию металлизационных паст к нитриду алюминия можно за счет введения в их состав стеклосвязки [2], которая бы хорошо смачивала нитрид алюминия при низких температурах. Цель данной работы: разработать состав стеклосвязки, смачивающий нитрид алюминия в диапазоне температур до 700-900 °С.

**Эксперимент.** В работе были использованы образцы в виде дисков из нитрида алюминия, спеченные до относительной плотности более 98%. Для определения угла смачивания была собрана установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

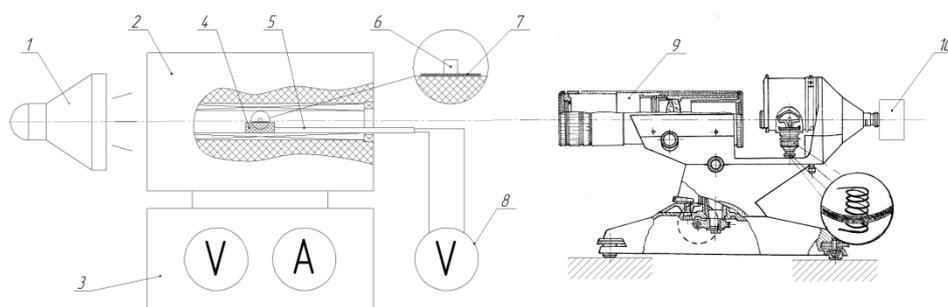


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки

Установка состоит из: 1 осветительной системы; 2 – трубчатой печи с регулируемой скоростью нагрева; 3 – системы контроля и управления нагревом; 4 – подставки для образцов; 5, 8 – термопары для контроля температуры образца; 6 – образца стекла; 7 – подложки (диска) из AlN; 9 – оптической системы; 10 – цифровой камеры с выводом изображения на дисплей компьютера. С помощью данной установки было исследовано несколько стёкол боросиликатного состава на адгезию к нитриду алюминия.

Для дальнейших исследований было решено выбирать составы стёкол только для металлизационных паст на основе серебра. В качестве основы для исследуемых составов стёкол был выбран боросиликатный состав вида (45%<sub>мол</sub> SiO<sub>2</sub>; 20%<sub>мол</sub> B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 5%<sub>мол</sub> CaO; 20%<sub>мол</sub> Na<sub>2</sub>O (Li<sub>2</sub>O); 10%<sub>мол</sub> Me<sub>n</sub>O<sub>n</sub>).

В соответствии с задачами исследования, было решено разделить исследуемые составы на две группы:

- 1) Стёкла, взаимодействующие с нитридом алюминия;
- 2) Стёкла, не взаимодействующие с нитридом алюминия.

В связи с этим, в основе для стёкол, не взаимодействующих с нитридом алюминия, было решено оксид натрия Na<sub>2</sub>O заменить на оксид лития Li<sub>2</sub>O, поскольку Na<sub>2</sub>O относится к оксидам, взаимодействующим с нитридом алюминия. В качестве модификаторов для стёкол, взаимодействующих с нитридом алюминия, были выбраны оксиды K<sub>2</sub>O, Cu<sub>2</sub>O, CuO, PbO,

*Секция 2 – Рациональное использование природного  
и техногенного минерального сырья и водных ресурсов*

NiO, CdO, CoO, FeO, ZnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MoO<sub>3</sub>, так как значения ΔG<sub>0</sub> для реакций данных оксидов с нитридом алюминия в интервале температур от 0 до 1400 °С отрицательны. Следовательно, данные оксиды относятся к оксидам, взаимодействующим с нитридом алюминия. В качестве модификаторов для стёкол, не взаимодействующих с нитридом алюминия, были выбраны не взаимодействующие с нитридом алюминия оксиды: BaO, SrO, MgO, BeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>.

Также были проведены расчёты свойств стёкол выбранных составов с помощью программы SciGlass. Результаты расчётов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчётные свойства стёкол выбранных составов

Основа	Модифи- катор (10%мол)	Температура размягчения T <sub>f</sub> , °С	КТР α, К <sup>-1</sup>	Диэлектрическая проницаемость ε, Тл	Поверхностное натяжение при T= T <sub>f</sub> σ, Н/м	Плотность ρ, г/см <sup>3</sup>
45% мол SiO <sub>2</sub> ; 20% мол B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 5% мол Na <sub>2</sub> O CaO; 20% мол Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	765,6	1,31E-05	7,572	0,2285	2,548
	K <sub>2</sub> O	785,4	1,39E-05	7,772	0,2163	2,532
	Cu <sub>2</sub> O	755,7	9,13E-06	?	0,2185	2,742
	CuO	801,6	1,06E-05	6,732	0,2414	2,682
	PbO	795,7	1,09E-05	7,492	0,2239	3,213
	NiO	816,5	1,00E-05	7,062	0,2386	2,713
	CdO	845,7	1,08E-05	7,362	0,2436	2,895
	CoO	816,4	1,00E-05	7,012	0,2386	2,691
	FeO	816	1,10E-05	7,312	0,2376	2,688
	ZnO	830,5	1,03E-05	6,912	0,241	2,68
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	938,7	9,47E-06	?	0,2569	2,68
	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	771,7	1,11E-05	7,062	0,233	3,003
	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	772,2	1,28E-05	6,862-?	0,2234	2,605
	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	749,4	1,14E-05	8,162	0,1649	3,735
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1011	1,15E-05	?	0,2104	2,448
MoO <sub>3</sub>	857,2	1,12E-05	?	0,2285	2,762	
45% мол SiO <sub>2</sub> ; 20% мол B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 5% мол CaO; 20% мол Li <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	845,2	1,02E-05	6,582-?	0,246	845,2
	BaO	882,9	9,41E-06	7,052	0,2531	882,9
	SrO	894,5	9,29E-06	7,002	0,2547	894,5
	MgO	900,2	8,19E-06	6,422	0,2529	900,2
	BeO	900,7	8,21E-06	6,292	0,2529	900,7
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1065	7,04E-06	6,222	0,2736	1065
	TiO <sub>2</sub>	871,2	7,02E-06	7,352	0,2404	871,2
	SnO <sub>2</sub>	887,3	7,56E-06	?	0,2346	887,3

**Выводы.** Как видно из расчётных данных, представленных в таблице 1, большинство выбранных составов стёкол подходят для металлизационных паст на основе серебра.

**Список литературы**

1. Косолапов А.А., Дитц А.А., Ревва И.Б., Погребенков В.М. Высокотеплопроводные материалы полученные методом прессования. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 5 с.
2. Макаров Н.А. Металлизация керамики: Учебное пособие. М. РХТУ им. Д.И. Менделеева. 204.-76 с.
3. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М «Химия», 1976 232 с.
4. Шило А.Е. Стеклопокрытия для порошков сверхтвёрдых материалов. Киев: Наук. думка, 1988. – 208 с.

## ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ОТ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

*А.В.ХЫШОВ, А.Н. ПОНИК, А.А. МАРТЫНОВА, О.С. ПОНОМАРЁВА*  
АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»  
E-mail: hello159@mail.ru

В производстве высокоэнергетических материалов образуются сточные воды, содержащие нитраты, сульфаты, органические примеси, ионы тяжёлых металлов (никеля и свинца). На практике применяются физико-химические методы очистки сточных вод, образующихся в производстве высокоэнергетических материалов: адсорбционный метод, метод озонирования, метод щелочного гидролиза и др. [1,2] Данные методы имеют ряд недостатков: требуют дорогостоящего, сложного в эксплуатации оборудования, чрезвычайно больших затрат реагентов (активных углей, щелочей, кислот и т.д.), имеют низкую эффективность очистки воды от ионов тяжелых металлов.

В настоящей работе исследовалась принципиальная возможность очистки загрязнённых сточных вод термическим методом.

Содержание загрязняющих веществ в отработанных стоках, образующихся в производстве высокоэнергетических материалов, представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание загрязняющих веществ

Загрязняющие вещества	Содержание, мг/л	ПДК <sub>р.х.</sub> , мг/л
Нитрат натрия	109000	45
Этаноламин	16500	0,2
Этилендиамин	12000	0,2
Глиоксаль	5800	0,5
Формиат натрия	105000	1,0
Оксалат натрия	14000	0,2
Сахара, олигомеры	30000	-
Сульфат натрия	15000	500
Ионы никеля	35000	0,01
Ионы свинца	40000	0,02

Отработанные стоки, образующиеся в процессе синтеза компонентов высокоэнергетических материалов, будут направляться на установку термического обезвреживания, оборудованную системой очистки газов, рисунок 1.

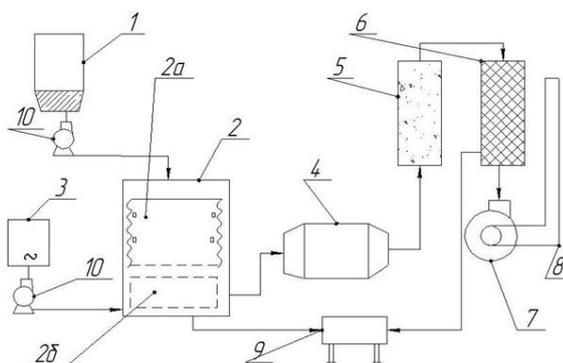


Рисунок 1 – Установка термического обезвреживания: 1 – буферная ёмкость; 2 – циклонная печь; 2а – зона сжигания сточных вод; 2б – зона дожигания дымовых газов; 3 – ёмкость раствора карбамида; 4 – теплообменник-утилизатор; 5 – угольный фильтр; 6 – рукавный фильтр; 7 – дымосос; 8 – дымовая труба; 9 – бункер; 10 – насос

Установка термического обезвреживания производственных стоков представляет собой единую технологическую линию и включает в себя: зону сжигания сточных вод, зону дожигания дымовых газов, узел снижения температуры дымовых газов и систему многоступенчатой газоочистки (угольный и рукавный фильтр). В качестве нейтрализатора окислов азота используют 40 %-ный раствор карбамида.

Экологическая безопасность предлагаемого термического способа обезвреживания сточных вод подтверждается расчётами приземной концентрации загрязняющих веществ, образующихся при сжигании. Для проведения термодинамических расчётов использовались параметры процесса сжигания (температура, давление в реакторе, расход природного газа), конструкционные параметры установки (высота, диаметр, мощность выброса).

Расчёт приземной концентрации загрязняющих веществ проводился по «Методам расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух» [3]. Результаты расчёта ожидаемой концентрации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Данные по расчёту концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

Наименование загрязняющих веществ	Концентрация, доли ПДК		
	Расстояние от источника, м		
	250	500	1000
Гидроксид натрия	0,68	0,30	0,1
Никель	0,02	0,0069	0,0024
Свинец	0,02	0,0077	0,0026

Анализ полученных результатов расчётов рассеивания загрязняющих веществ при термическом обезвреживании сточных вод показывает, что концентрации загрязняющих веществ не превышают предельно допустимых концентраций в приземном слое атмосферы [4].

Представленный термический метод обезвреживания сточных вод, образующихся при производстве высокоэнергетических материалов, обеспечивает полное уничтожение в установке сжигания стоков и эффективную очистку от загрязняющих веществ.

#### **Список литературы**

1. Papodopoulos A., Fatta D., Parperis K. and others. Nickel uptake from a wastewater stream produced in a metal finishing industry by combination of ionexchange and precipitation methods // Papodopoulos A., Fatta D., Parperis K., Mentzis A., Haralambous K.-J., Loizidou M. *Separ. and Purif. Technol.* 2004. Т. 39. №3. P.181-188.
2. Патент RU 2339584 С1 Способ очистки отработанной воды от ионов тяжелых металлов в производстве баллистического пороха. Овсов Ю.Ф., Пономарева О.С., Лунегова Л.Л. и др. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», Федеральное казенное предприятие «Пермский пороховой завод». Заявлен 05.06.2007. Опубликовано 27.11.2008. Бюл. № 33. – 5 с.
3. Методы расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух. Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 № 47734.
4. ГОСТ 17.2.3.02 Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями. – М.: Госиздат, 2014. – 12 с.



**Результаты исследований.** В процессе анализа полученных данных было выделено 3 компонента: 1 короткоживущая и 2 долгоживущие  $\tau_1=373,4\pm 0,2$  пс,  $\tau_2=1494,3\pm 4,1$  пс,  $\tau_3=2757,5\pm 23,8$  пс. Первую компоненту, с относительной интенсивностью  $\sim 80\%$ , можно однозначно связать с аннигиляцией позитронов в твердом теле (целлюлоза, лигнин и т.д.). Компонента  $\tau_2$ , в соответствии с известными литературными данными ассоциируется с ортопозитронием в жидкостях ( $H_2O$ , смолы и т.д.), заполняющими внутри- и меж- клеточные пространства древесины. Третья компонента разложения ассоциируется с аннигиляцией ортопозитрония в газах ( $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  и т.д.), также в внутри- и меж- клеточных пространствах древесины. На рисунке 2 представлены интенсивности разных компонент разложения в зависимости от слоя. Компонента  $\tau_1$ , с интенсивностью  $80\%$ , вносит основной вклад, поэтому характер зависимости среднего времени жизни  $\tau_{avg}$  от слоя совпадает с характером зависимости  $\tau_1$ . Уменьшение среднего времени жизни может свидетельствовать об увеличении плотности при приближении к более «старым» годовым кольцам.

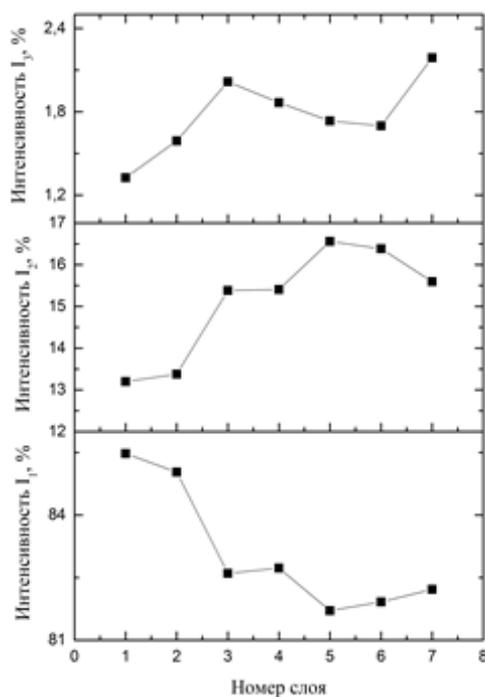


Рисунок 2 – Изменение интенсивности компонент  $\tau_2$ ,  $\tau_1$  и  $\tau_3$  в зависимости от слоя

**Заключение.** Таким образом, ПАС является перспективным методом неразрушающего контроля структуры материалов, применяющимся в разных отраслях науки и техники. Дальнейшее исследование в области ПАС и использование его в связке с другими методами поможет в разработке новых материалов.

#### Список литературы

1. Биоиндикация стратосферного озона // Под общей ред. В. В. Зуева; Рос. акад. наук, Сиб. отд., Институт оптики атмосферы [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 228 с.
2. П.А. Кашулин, Н.В. Калачева, Н.А. Артемкина, С.А. Черноус// Фотохимические процессы в растениях на Севере и окружающая среда. Вестник МГТУ, Т. 12, №1, 2009. С. 137-142.
3. В.И. Гольданский. Физическая химия позитрона и позитрония. М.: Наука, 1968.
4. В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества. Успехи физических наук, 2002, т.172, с.67–83.
5. Р. С. Лаптев. Разработка метода аннигиляции позитронов для контроля дефектной структуры в системах металл-водород : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук— Томск: 2014. — 129 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФТОРИРОВАНИЯ СИЛИКАТА ЦИРКОНИЯ

Ш.М. ШАРАФЕЕВ, В.М. ПОГРЕБЕНКОВ  
Томский политехнический университет  
E-mail: sms4@tpu.ru

Промышленный интерес для получения циркония и его соединений представляют те месторождения, в которых присутствует минерал циркон, представляющий собой природную разновидность силиката циркония ( $ZrSiO_4$ ). Несмотря на значительные запасы циркона на территории России, объемы добычи его недостаточны для обеспечения отечественных предприятий данным сырьем в полной мере, что приводит к их импортной зависимости от поставок циркона со стороны других государств. Исследования в области использования цирконового сырья для производства различных материалов должны стимулировать добывающую отрасль.

Одним из наиболее перспективных сырьевых материалов для получения керамики на основе силиката циркония является продукт распыления цирконового концентрата в струе плазмы, что связано с высоким интересом к использованию его для технологии композиционных материалов  $ZrSiO_4-ZrO_2$  [1]. Плазмодиссоциированный циркон (ПДЦ) представляет собой сфериды, состоящие из тонкодисперсных зерен диоксида циркония, связанных между собой стеклообразным диоксидом кремния, при этом регулирование фазового состава керамики возможно за счет удаления избыточного диоксида кремния из минеральной системы с помощью различных реагентов [2]. Преимуществами использования для этой цели гидрофторида аммония (ГДФА) являются его высокая химическая активность, возможность регенерации фторирующего агента и возможность получения ценных побочных продуктов при переработке образующегося в результате фторирования гексафторосиликата аммония [3].

**Целью работы** являлось установление закономерностей протекания процессов фазообразования при обжиге продуктов фторировании природного циркона и продукта его плазменной обработки.

**Методика проведения работы.** Составы исследуемых смесей приведены в таблице 1. Навески измельченных материалов и ГДФА взвешивались на аналитических весах и смешивались. Фторирование материалов проводилось при температуре 210 °С в течение 1 часа, сублимационная очистка – при температуре 400 °С в течение 4 часов. Полученные материалы подвергались обжигу при температуре 1100 – 1500 °С в печи с хромитлантановыми нагревателями. Образцы исследовались на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, термическом анализаторе NETZSCH STA 449 F3 Jupiter и электронном микроскопе JEOL JSM 6000.

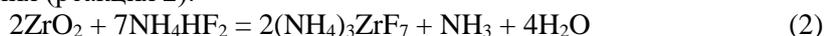
Таблица 1 – Составы исследуемых смесей гидрофторида аммония с цирконом и плазмодиссоциированным цирконом

№, п/п	Мольное отношение ГДФА/минерал, моль/моль	Массовое содержание минерала в шихте, %	Массовое содержание ГДФА в шихте, %
0	0,0	100,00	0,00
1	0,5	86,54	13,46
2	1,0	76,27	23,73
3	1,5	68,18	31,82
4	2,0	61,64	38,36
5	2,5	56,24	43,76
6	3,0	51,72	48,28

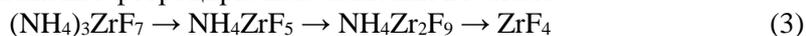
**Результаты.** Установлено, что основным продуктом фторирования циркона и ПДЦ является гексафторосиликат аммония, образующийся в результате реакции 1.



При увеличении концентрации ГДФА в шихте интенсифицируется побочный процесс фторирования циркониевой составляющей минералов, при этом образуется гептафтороцирконат аммония (реакция 2).



В процессе сублимационной очистки материалов от гексафторосиликата аммония происходит ступенчатое разложение фтороцирконата аммония по схеме 3.



В силу своей химической инертности, циркон практически не подвергается действию ГДФА при фторировании, в то же время ПДЦ активно взаимодействует с фторирующим агентом.

При анализе рентгенограмм образцов на основе фторидной активации природного циркона было отмечено, что имеющиеся в концентрате примеси не оказывают значительного воздействия на температуру его диссоциации: при обжиге природного циркона единственной кристаллической фазой в системе является силикат циркония.

Фазовый состав материалов на основе циркона, подвергнутых фторидной активации, после обжига представлен в основном силикатом циркония. Фаза бадделейта фиксируется при температуре 1500 °С для образцов, подвергнутых фтораммонийной обработке в большей степени. Образование фазы диоксида циркония при обжиге свидетельствует об удалении структурного диоксида кремния из циркона в результате фтораммонийной обработки.

Полученные материалы на основе ПДЦ в основном сложены моноклинным диоксидом циркония и силикатом циркония. Особенностью фазообразования материалов с низкой степенью фторидной активации (до 1 моль ГДФА на 1 моль ПДЦ) является резкое увеличение выхода фазы циркона после обжига при 1500 °С, что является следствием скачкообразного возрастания реакционной способности тетрагонального диоксида циркония в диапазоне температур 1400 – 1500 °С [4].

Для образцов с более высокой степенью фторидной активации характерно плавное нарастание фазы циркона при увеличении температуры обжига, при этом преобладающей фазой в материале является моноклинный диоксид циркония вследствие обескремнивания материала.

При обжиге образцов не было зафиксировано образования стекловидной фазы. Характер излома активированных с помощью ГДФА образцов не имеет существенных отличий от характера излома образца неактивированного ПДЦ.

Таким образом, фторидная активация позволяет регулировать фазовый состав керамических материалов на основе продуктов плазменной диссоциации циркона за счет удаления избыточного диоксида кремния из системы при сублимационной очистке продуктов фторирования от фторосиликатов аммония.

#### Список литературы

1. Williamson J.P.H., Lloyd D.E. The characterization of ceramic bodies produced from plasma dissociated zircon // *Journal of Materials Science*. – 1981. – Vol. 16. – P. 1264 – 1272.
2. McPherson R., Shafer B.V., Wong A.M. Zircon-Zirconia Ceramics Prepared from Plasma Dissociated Zircon // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1982. – Vol. 64. – P. 57 – 58.
3. Гузев В.В., Дьяченко А.Н., Уралбаев А.Ш. Фтораммонийный способ разложения циркона // *Известия ТПУ*. – 2002. – Т. 305, вып. 3. – С. 185 – 190.
4. Veytizou C., Quinson J.F., Valfort O., Thomas G. Zircon formation from amorphous silica and tetragonal zirconia: kinetic study and modelling // *Solid State Ionics*. – 2001. – Vol. 139. – P. 315 – 323.

## ***СЕКЦИЯ 3***

# ***ФОТОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СВЕТОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ***

---

## PHOTO-INDUCED EFFECTS IN THE DOPED FERROELECTRIC

*Y.O. PERKOV, Y.M. KARPETS, V.I. IVANOV*

Far Eastern State Transport University

E-mail: valivi@mail.ru

There are a series of nonequilibrium phenomena in ferroelectrics, which do not have a definite theoretical description [1]. In paper [2] the thermovoltaic effect consisting in initiation of the electric voltage between the opposite faces of the semiconductive sample of samarium sulphide (SmS) on heating to 400–500 K is described. The effect has appeared in the presence of the donor impurity concentration gradient directed towards these faces.

In our work [3] the thermally-stimulated quasi-stationary current arising only in the highly-alloyed with iron crystal of lithium niobate with the evaporated electrodes from a pair of different metals was described. A sign of the thermovoltaic response is determined by location of electrodes applied by vacuum evaporation on the opposite faces of crystal and does not depend on orientation of the crystallographic axes of the sample in reference to electrodes.

In this paper the results obtained in experimental studies of the light induced currents in the thin-layer metal-lithium niobate-metal (MLM) structure are presented. This effect is similar to photovoltaic effect, but it includes the thermal contribution. The possible models of the investigated phenomena are discussed.

The samples of doped lithium niobate crystals (iron concentration is equal 0.3 wt%) with different pairs of electrodes were studied. The metal electrodes were applied by vacuum evaporation with thickness varying from 0.1 to 1  $\mu\text{m}$ . The samples with different pairs of electrodes (aluminum (Al) – chromium (Cr), indium (In) – chromium (Cr), aluminum (Al) – copper (Cu), silver (Ag) – aluminum (Al)) were used.

The results obtained in experimental studies of the light induced currents in the thin-layer metal-lithium niobate-metal (MLM) structure are presented. In the nonsymmetrical MLM system is registered the stationary light induced current. The light response has a sharply defined spectral dependence with sign changing about 0.9  $\mu\text{m}$ .

This effect includes the photovoltaic effect and the thermal induced contribution. In the thin-layer metal-ferroelectric-metal system the thermo-voltaic response exists which increases essentially with decreasing the crystal thickness. A sharp increase in the thermally induced current for small thicknesses of crystal (less than 100  $\mu\text{m}$ ) points to the crucial role of the near-contact zones with thicknesses of less than 100  $\mu\text{m}$ .

In this paper the electrets model of the studied phenomenon caused by the field of contact potential difference at the metal-ferroelectric interface was proposed [4]. In the electrets model the thermoinduced changing of the conductivity of the crystal leads to change in the stationary current on the load impedance. All experimental dates are in accordance with the proposed model.

The results obtained can be used for investigating the properties of the sandwiched ferroelectric structures as well as for developing new types of the photo-thermo-electrical energy converters.

### References

1. Serway R. A. Physics for Scientists & Engineers (3rd ed.). – Saunders, 1990.- 1164 p.
2. Kaminskii V. Dynamics of the thermovoltaic effect in SmS // Technical Physics Letters. 2013. – 39. P. 673-677.
3. Ivanov V., Karpets Yu., Marchenkov N., Zdorovtsev G. Thermo-EMF models in LiNbO<sub>3</sub> crystals with different metal electrodes // Proc. SPIE. - 2005. – 5851. - P. 415-419.
4. Ivanov V., Karpets Yu., Perkov Yu. Photo-induced currents in the sandwich metal-ferroelectricmetal structure // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2017. – 168. – P. 012034.

**РЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ МОДУЛЬНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ОРАНЖЕРЕЯ СО  
СВЕТОДИОДНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ**

*Д.В. БЫЛКОВ, С.Б. ТУРАНОВ*

Томский политехнический университет

Инженерная школа новых производственных технологий

E-mail: prototype103faza@gmail.com

По рекомендации всемирной организации здравоохранения, человек должен потреблять 0,4 – 0,5 кг свежих овощей и фруктов ежедневно. Космонавты не получают даже десятой части от нормы т.к. доставка продуктов на МКС стоит 20000\$ за 1 кг. Таким образом, разработка способов выращивания овощей и фруктов в условиях космических станций является важнейшей задачей для современной науки [1,3].

Основной целью данного проекта является разработка подходящей по дизайну и конфигурации установки для выращивания растений в условиях микрогравитации. Для этого была разработана блочно-модульная конструкция (рисунок 1), что позволит максимально повысить эффективность использования поверхности выращивания за счет расположения растений на всех гранях. Полученные кубы можно каскадно компоновать друг с другом, наращивая нужный объем. При этом установка будет использовать меньше места на станции в отличие от имеющихся аналогов [2]. Разработка конструкции велась в программном обеспечении AutodeskInventor.

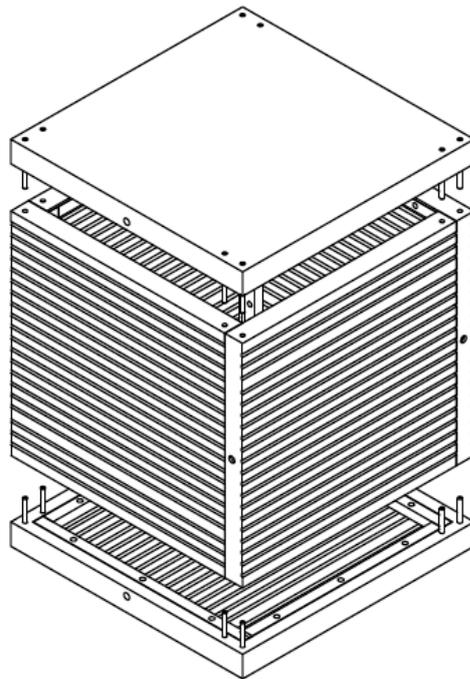


Рисунок 1 – Общий вид установки

Еще одной отличительной особенностью данной установки, является особое расположение светильника, который выполнен в виде двух полусфер, скрепленных вместе, расположенных в центре установки. Данная конфигурация позволит равномерно распределять световую энергию и существенно снизить затраты на облучение. Расчет светораспределения проводился в программном обеспечении DIALux (рисунок 2).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России: государственное задание в сфере научной деятельности № 13.3647.2017/ПЧ.

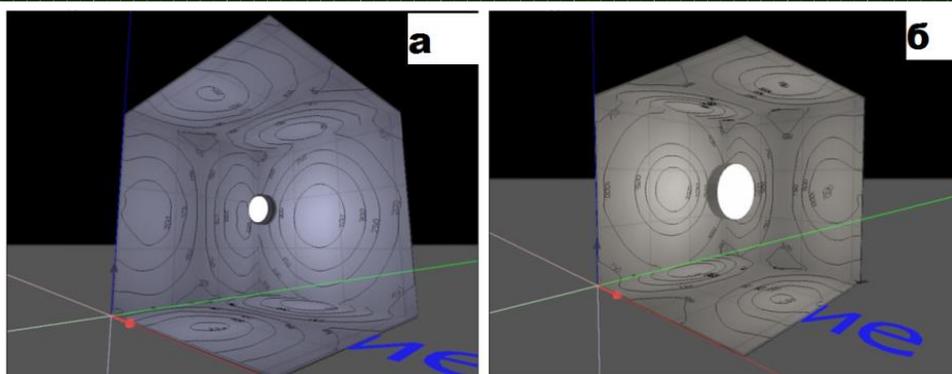


Рисунок 2 – Визуализация светораспределения на примере двух светильников:  
а)  $\Phi = 1150$  лм; б)  $\Phi = 5470$  лм

### Список литературы

1. Б. С. Мошков, Выращивание растений при искусственном освещении, Издательство: Колос, Год: 1966.
2. Fitotron. [электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.fitotron.co.uk/products/standard-growth-chambers/> (дата обращения 22.03.2017).
3. Сельское хозяйство в космосе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nasa.gov/feature/spase-farming-yields-a-crop-of-benefits-for-earth> (дата обращения 20.10.2017).

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ

*Д.В. БЫЛКОВ, С.Б. ТУРАНОВ*

Томский политехнический университет

Инженерная школа новых производственных технологий

E-mail: prototype103faza@gmail.com

Основной целью данной статьи является, исследование в области повышения эффективности работы фотоэлектрических элементов и оптимизация энергетических характеристик солнечных фотоэлектрических батарей на основе оптических концентраторов.

Существуют два принципиально отличающихся вида установок. Фотоэлектрические установки на основе стационарных концентраторов и на основе линз Френеля, рисунок 1[2].

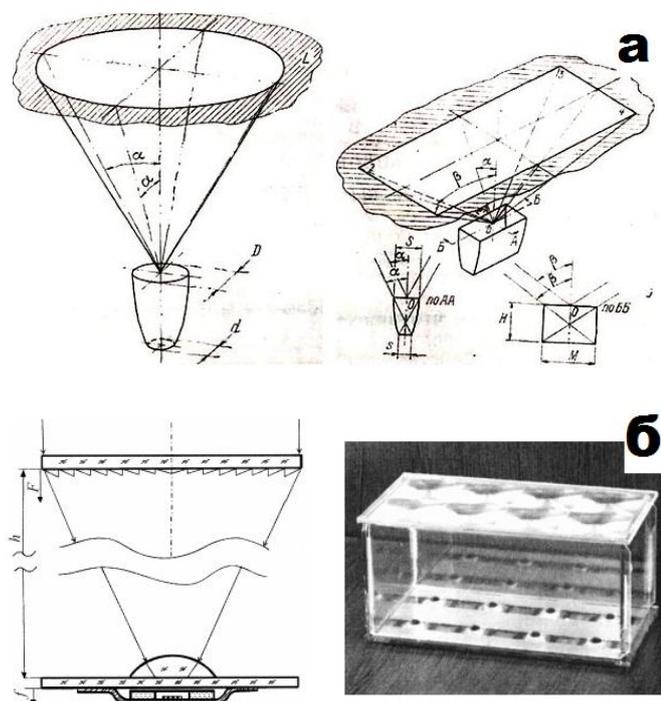


Рисунок 1 – Системы фотоэлектрических установок: а) с применением параболоцилиндрического фоклина; б) с применением линз Френеля и вторичной оптики

Существенными недостатками фоклинов является их глубина, что затрудняет их изготовление и увеличивает материалоемкость, а также для их эффективной работы требуется система слежения за солнцем и неравномерность плотности сконцентрированного солнечного излучения на поверхности фотоэлемента. Недостатком систем фотоконцентрирования на основе линз Френеля является ограниченность в увеличении кратности концентрирования света и необходимость монтирования конических элементов в непосредственной близости от поверхности ФЭП — с минимальным зазором [1-3].

Первым шагом в разработке системы фотоконцентратора является подбор линз с необходимыми параметрами. Также чтобы максимизировать эффективность, необходимо свести к минимуму все потери. Соответственно были проведены работы по просветлению линз (рисунок – 2). Исследование свойств светопропускания линз до просветления и после приводились на спектрофотометре Linza – 150.

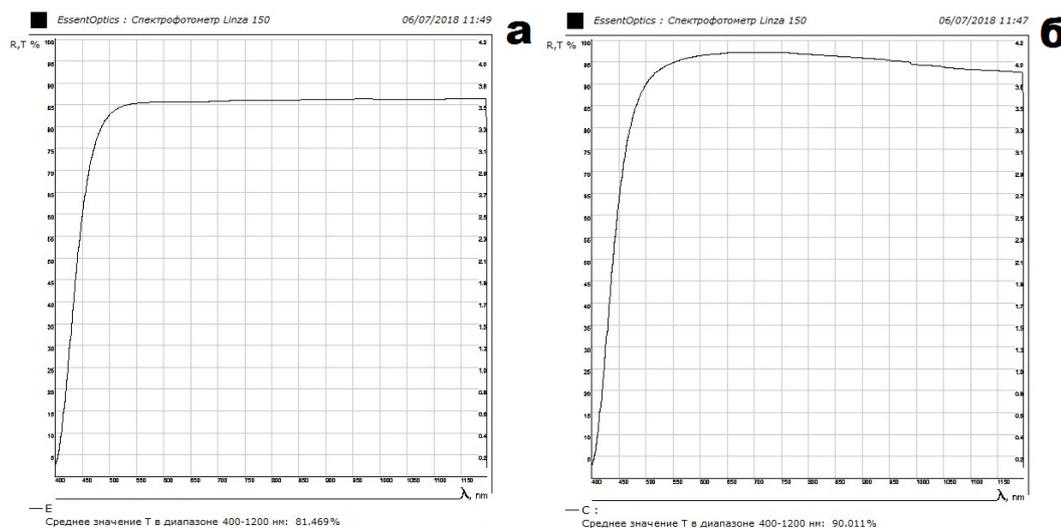


Рисунок 2 – Результаты просветления линз: а) светопропускание линзы без покрытия 81.5%; б) светопропускание линзы с двусторонним покрытием 90 %

Таким образом, можно отметить, что перспективным решением в достижении роста эффективности в использовании солнечной энергии является объединение принципов работы двух видов концентраторов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России: государственное задание в сфере научной деятельности № 13.3647.2017/ПЧ.

#### Список литературы

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
2. Солнечная энергетика, учебное пособие для вузов В.И.Виссарионов, Г.В.Дерюгина, В.А.Кузнецова, Н.К.Малинин. Москва, Издательский дом МЭИ, 2008г.
3. A.F. Ioffe, A.V. Ioffe. Phys. Z. Sov. Un., 7, 343 (1935).

## ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ ИАГ АКТЕВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ТЬ, ТЬ/СЕ

*В.А. ВАГАНОВ, Р.Г. КАЛИНИН, Д.Т. ВАЛИЕВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: vav13@tpu.ru

Изготовление белых СД – одно из перспективных направлений в современной светотехнике [1]. В настоящее время самым эффективным и экономичным способом является метод получения белого света с помощью кристалла синего СД на основе InGaN/GaN и желтого люминофора на основе ИАГ:Се. Однако основным недостатком белых светодиодов, полученных данным методом является отсутствие красной составляющей в спектре люминесценции [2]. Что как следствие приводит к снижению цветопередачи. При этом сторонним наблюдателем данное свечение воспринимается как холодное [3,4].

В настоящей работе приведены результаты исследований спектров оптического возбуждения, фотолюминесценции (ФЛ) и спектров импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) люминофоров на основе ИАГ, активированных различной концентрацией Tb, Се/Tb.

**Материалы и методы исследования.** Образцы были синтезированы методом высокотемпературной твердотельной реакции в атмосфере азота. Исходные компоненты  $Al_2O_3$  (99,99 %),  $Y_2O_3$  (99,99 %),  $CeO_2$  (99,99 %),  $Tb_4O_7$  (99,99 %), смешивались согласно расчетному соотношению  $Y_{3-x}: Al_5: x + CeO_2$  (0.06 Wt.) ( $x>Tb=0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08$  и  $0,1$ ), с добавлением 5 % BaF2 от расчетной массы. Смесь с добавлением спирта перемешивалась в течение 6 часов во вращательном устройстве. Затем образцы порошков подвергались двух стадийной сушке при 120 °С и при 800 °С в течение двух часов. Далее проводилась высокотемпературная обработка в печи при температуре 1600 °С в течение 12 часов, и затем при температуре 550 °С в течение 4 часов. После термообработки все образцы измельчались для придания гомогенности порошку.

Спектры оптического возбуждения и люминесценции люминофоров были измерены нами с использованием спектрофлуориметра «AGILENT CARY ECLIPSE». Интегральные спектры ИКЛ измерялись при возбуждении импульсом потока электронов со средней энергией 250 кэВ, длительностью импульса – 10 нс. Регистрация интегральных спектров свечения ИКЛ осуществлялась оптоволоконным спектрометром AvaSpec-2048 в спектральном диапазоне 200 – 1100 нм. Время интегрирования составляло 100 мс.

**Результаты и обсуждения.** Как при оптическом возбуждении, так и при возбуждении импульсным электронным пучком наблюдается интенсивное свечение люминофоров в видимой области спектра.

Полосы поглощения в области  $\lambda_1 = 340$  нм и  $\lambda_2 = 460$  нм (рисунок 1, а) обусловлены переходами ионов Се с 4f на 5d подуровни. Причем положение двух полос не зависит от состава кристалла носителя, меняется только относительная интенсивность полос. Согласно [5] при фото-возбуждении излучением с  $\lambda_{\text{возб.}} = 440$  нм наблюдается широкая полоса (рисунок 1, а) обусловленная переходами ионов церия из 5d состояния в 4f.

При возбуждении импульсным электронным пучком имеет место быть суперпозиция свечения ионов Се и ионов Tb, что проявляется в виде наложения узких полос на широкополосное свечение ионов Се. Серия узких полос в синей области (рисунок 1, б) обусловлена излучательными переходами  $^5D_3 \rightarrow ^7F_j$  ( $j = 6,5,4$ ) ионов Tb. Полосы с максимумами в области 490, 544, 585, 620 нм соответствуют переходам  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$ ,  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$  в ионе  $Tb^{3+}$  [6].

Отсутствие полос свечения ионов Tb в красной области спектра при фото-возбуждении, возможно, обосновать с переносом энергии между ионами  $Ce^{3+} \rightarrow Tb^{3+}$ , который осуществляется при энергиях возбуждения более 3 эВ. Так же это подтверждается тем, что активация ионами тербия существенно увеличивает интенсивность свечения полосы на 550 нм и приводит к увеличению длительности свечения этой полосы.

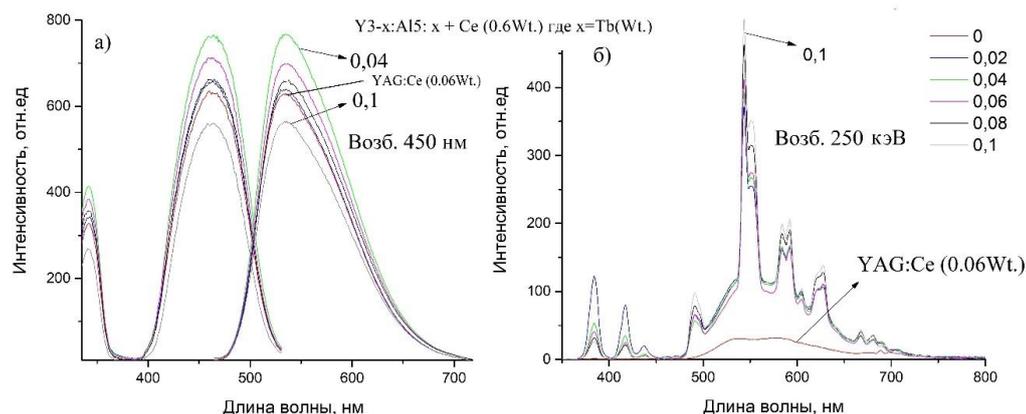


Рисунок 1 – Спектры оптического возбуждения и фотолюминесценции (а), спектры импульсной катодолюминесценции (б) YAG:Ce,Tb люминофоров

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ в рамках научного проекта № 18-43-703014.

#### Список литературы

1. D. Chitnis, N. Thejo kalyani, H. Swart, S. Dhoble, Escalating opportunities in the field of lighting // *Renew. Sustain. Energy rev.* – 2016. – V. 64. – P. 727–748.
2. Ching-Cherng Sun et al. Packaging efficiency in phosphor-converted white LEDs and its impact to the limit of luminous efficacy // *Journal of Solid State Lighting.* – 2014. – V. 1. – Issue19.
3. A.A. Setlur. Phosphors for LED-based solid-state lighting // *The Electrochemical Society Interface.* – 2009. – V. 16. – P. 32–36.
4. C.A. Geiger. Garnet: A key phase in nature, the laboratory, and technology // *Elements.* – 2013. – V. 9. – P. 447–452.
5. Arturas Katelnikovas et al. Photoluminescence in sol-gel-derived YAG:Ce phosphors // *Journal of Crystal Growth.* – 2007. – V. 304. – P. 361–368
6. P. Psuja, D. Hreniak, W. Strek. Low-voltage cathodoluminescence properties of  $Y_3Al_5O_{12}:Tb^{3+}$  nanopowders // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2008. – V. 451. – P. 571–574.

## ДИЗАЙН ЭЛЕМЕНТА УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВОГО СВЕТИЛЬНИКА

*М.О. ВАСИЛЬЕВА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: marrian@sibmail.com

### Аннотация

Дизайнерские бытовые светильники и разработка освещения являются актуальными направлениями, где особое внимание уделяется вопросам эстетики, функциональности, надежности и безопасности использования электротехники. В производстве бытовых светильников не всегда уделяется достаточно внимания вопросам выбора и проектирования элементов управления. В основе представленной дизайн-идеи лежит формообразование светильника декоративного освещения для жилого пространства и обоснование выбора для него типа элемента управления с точки зрения эргономичности. Выявлена значимость эстетики стилевого решения и конструктивного предложения светильника.

**Ключевые слова:** дизайн, проектирование, элементы управления, бытовой светильник.

### Введение

Создавая интерьерное пространство, его концептуальный образ решаются конструктивно-технические, эргономические и художественные задачи. Выбор конструкций осветительных приборов, дизайн освещения базируются на требованиях к их техническим характеристикам, размеру, форме, материалам изготовления, предполагаемого результата светового сценария и элементам управления. Кроме того, светодизайн способен решить проблемы использования традиционных методов и современных технологий света, для решения необходимого освещения в жилых помещениях.

Целью статьи является определение выбора элемента управления в конструкции дизайнерского декоративного светильника.

Для достижения данной цели были выявлены следующие задачи: разработка художественного образа светильника; добавление функциональности в конструкцию светильника; выбор эргономичного элемента управления в светильнике.

### Концепция проектирования бытового светильника и выбора элемента управления

Искусственное освещение способно не только увеличить продолжительность рабочего времени, но и выполнять декоративную функцию. Бытовые светильники, создающие такое освещение незаменимы при организации атмосферы уюта жилого пространства. Предлагаемая конструкция абажура позволяет выстраивать не только гармоничную световую композицию, но и вносить ощущение комфорта для бытовых и рабочих процессов.

Представленное решение торшера было выполнено с помощью использования традиционных методов проектирования в дизайне, составления технического задания, создания эскиза, необходимой документации и 3D визуализации для наглядности (рис 1).



Рисунок 1 – а) Концепт декоративного торшера-трансформера (слева), б) модули светильника (справа). Эскиз Цыгаловой А.В

При создании стилистического образа торшера главной идеей его конструкции было объединение прозрачных модулей в абажуре, через призмы которых проходит свет и проецируется на поверхность плоскостей стен, потолка, мебели и предметов (рис 1, б). Количество элементов в абажуре и разнообразие их цветовой гаммы может регулироваться по желанию комплектации пользователей.

Кроме того, особенностью данного предложения является то, что конструкция стойки торшера смоделирована с учетом регулирования размещения лампы по высоте, при этом он может использоваться как светильник для нижней подсветки.

Основание ножки торшера выполнено в форме «блина» рассчитано на устойчивое положение светильника даже при действиях трансформирования, имеет дополнительный усилитель по весу и снабжен силиконовыми накладками. В форму основания вписывается элемент управления - переключатель для включения/выключения светового потока (рис 2).



Рисунок 2 – Кнопка включения в основании светильника

#### **Выбор элемента управления бытового светильника.**

При рассмотрении эргономических задач проектирования данного дизайн-предложения особое внимание уделялось элементу управления. Были рассмотрены варианты элементов управления: кнопка, диммер, ножная педаль-клавиша.

Выбор основывался на следующих конструктивно-технических особенностях торшера: назначение индивидуального бытового использования; не подразумевает экстренного выключения/выключения; удобство эксплуатации светильника; трансформируемая стойка, изменение размещения лампы по высоте.

Для управления данным осветительным прибором решено использовать ножную педаль включения, располагающуюся на основании стойки торшера. Этот вариант управления представляется простым и удобным в использовании переключателя с точки зрения эргономики так как:

- может управляться ногой и рукой;
- свободно размещение по габаритам в основании стойки;
- легко определяется на поверхности основания стойки тактильно;
- располагается в наиболее статичной части конструкции торшера;
- при трансформации светильника не теряет функциональности.

На последнем этапе моделирования выявлено, что у данной педали есть недостаток в эргономике, в частности, как это видно из рисунка 3, функциональная часть клавиши имеет острые края, что может быть не безопасно для включения босиком. Поэтому, принято решение в доработке дизайнера конструкции элемента управления.

#### **Выводы статьи**

1. В процессе проектирования конструкции декоративного торшера-трансформера была выявлена проблематика эксплуатационных свойств, которые касаются как управления светом, так и механизмами включения, выполняемые переключательной педалью-клавишей, что облегчает свободу управления светом в бытовых условиях.

2. При разработке подобных объектов необходимо учитывать удобство пользователя, практичность включаемых элементов и производственную составляющую.

3. Кроме того, имеются замечания эргономического характера к форме элемента управления: по безопасности и функциональности.

**Список литературы**

1. Голованова М.В., Функционализм как базовый принцип формообразования в дизайне светильников XX в – Изд.: Центр научно-информационных технологий «Астерион», СПб, 2013. – 166-170 с.
2. Ковтун К.В., Ананьева Т.В., Декоративные элементы в дизайне – Изд.: Липецкий государственный технический университет, 2016. – 77-79 с.
3. Соколов А.П., Кухта М.С., Данила К.Г., Анализ процессов формообразования в дизайне декоративных светильников – Изд.: СПб государственный университет технологий и дизайна, 2012. – 10-14 с.
4. Kukhta M. S. , Sokolov A. P. , Krauinsh D. P. , Bouchard C. K. Stylization levels of industrial design objects // Journal of Physics: Conference Series. – 2017 – Vol. 803, – p. 1-5
5. Susan Weinschenk 100 Things every designer needs to know about people. – New Riders, 2012.
6. Бондарев Ю.И., Степанова-Третьякова Н.С. Формообразование как основа дисциплин «дизайн-проектирование» и «рисунок» - М., 2016
7. Sokolov A. P. , Kukhta M. S. , Pelevin E. A. Modern technologies of decorative surface treatment // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems : Proceedings of International Conference. - Tomsk : TPU Publishing House. - 2014. - p. 1-4.

## ИМИТАЦИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА НА ОСНОВЕ LED ТЕХНОЛОГИЙ В ИНТЕРЬЕРЕ С КУПОЛЬНЫМ ПОТОЛКОМ

*М.О. ВАСИЛЬЕВА*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: marrian@sibmail.com

**Аннотация:** До конца XIX века естественные источники света - солнце, свет неба, свет огня являлись обычными способами освещения жилого пространства. Обширный опыт проектных решений конструкций зданий, сооружений, помещений, имеющих купольные потолки демонстрирует использование естественного света как инструмента в дизайн-сценарии освещения внутреннего пространства. В данной статье с помощью методов инженерного проектирования на примере потолочного светильника исследована возможность имитации естественного освещения и предание особого настроения в интерьере современного жилого пространства. Предложена идея конструкции потолочного светильника сочетающий современный стиль и инженерное решение, позволяющее с помощью LED технологий полупроводниковых источников света осуществить имитацию естественного света в помещении.

**Ключевые слова:** искусственное освещение, дизайн-сценарий, купольный потолок в интерьере.

### Введение

Функциональный дизайн жилого пространства направлен на создание комфортных условий для высокоэффективной жизнедеятельности и улучшения качества жизни человека. Дизайн-сценарий света можно создать благодаря искусственному освещению. Предлагаемая дизайн-концепция потолочного светильника направлена на решение создания пространства интерьера благоприятного для восприятия человека. С помощью освещения и специального конструктивного предложения появляется возможность представлять помещение с купольным потолком, тем самым создавать гармоничное жилое пространство. Известно, что от характера направления, интенсивности и температуры света повышается производительность мыслительных процессов возрастает психологический комфорт. Освещение дающее особые формы тени, рассеивание света являются средствами выразительности концептуального образа, помогает выстраивать особое эмоциональное восприятие жилища и тем самым благоприятно воздействовать на психику. Данный потолочный осветительный прибор предназначен в качестве декоративного элемента интерьера с этнической стилистической направленностью.

### Описание конструкции

Конструкция потолочного светильника состоит из осветительной части и абажура. Абажур имеет куполообразную форму, что позволяет усилить иллюзию отверстия, имитируя круглый свод потолка. Помимо установки светильника как самостоятельного устройства, возможно соединение покрытия светильника со стенами помещения, для создания единого подвесного свода. Также возможна установка осветительной части без абажура для монтажа в потолок (рис. 1)



Рисунок 1 – Обычный интерьер со светильником (слева), интерьер с применением подвесной потолочной конструкции (справа)

Осветительная часть оснащена двумя массивами светодиодов, для имитации неба и прямого солнечного света. Имитацию неба создает работа светодиодов, покрытых рассеивателем

со светофильтром, приближающим спектр и направленность излучения к свету от ясного неба. Имитация прямого солнечного света создается путем фокусировки света белых светодиодов на внутренней поверхности абажура вместо создания коллимированного потока света.

Для создания эффекта имитации естественного освещения пространства интерьера по средствам LEDтехнологий проведен выбор источников света и проведен расчет необходимого количества светильников для жилой комнаты. Представлена конструкция потолочного светильника.

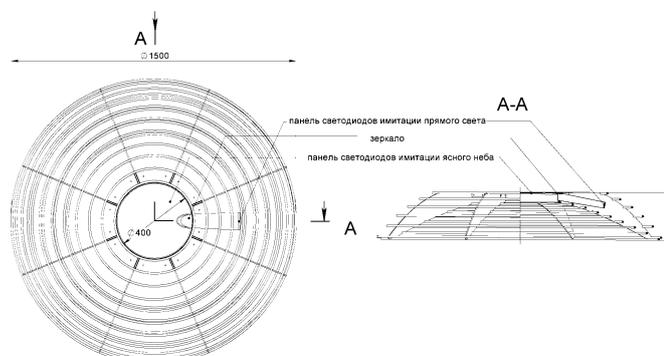


Рисунок 2 – Схематический чертеж светильника

**Выводы.** Предложена конструкция светильника в современном функциональном стиле, способная вписаться в широкий спектр современных интерьерных стилей. Благодаря своему устройству светильник способен передать настроение этнического жилища, не заимствуя при этом этническую стилистику. Исследованы спектры имитируемых источников: неба и солнца и проведено сравнение с используемыми в имитации полупроводниковыми источниками света. В виду особенности восприятия цвета человеческим глазом возможна имитация неба и солнца одним типом светодиодов, однако для имитации неба необходимо использовать светофильтр. Теряемая световая энергия на светофильтре незначительна и легко компенсируется одним дополнительным светодиодом. Приведенные в статье расчеты показывают возможность имитации естественного освещения без особых требований к габаритам и энергосети помещения.

#### Список литературы

1. Wright H.R., Lack L.C. Effect of light wavelength on suppression and phase delay of the melatonin rhythm // *Chronobiol. Int.* Taylor & Francis, 2001. Vol. 18, № 5. P. 801–808.
2. Golden R.N. et al. The efficacy of light therapy in the treatment of mood disorders: a review and meta-analysis of the evidence // *Am J Psychiatry.* 2005. Vol. 162, № 4. P. 656–662.
3. Borisuit A. et al. Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood // *Light. Res. Technol.* 2015. Vol. 47, № 2. P. 192–209.
4. Kukhta, M.S., Sidorenko, E.V., Simutkin, G.G., Khomushku, O.M., Glushkov, G.S. LED-technologies for bright light therapy // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2018 – Vol. 1015, – p. 1-5
5. A Simple Experiment to Analyze Light Sources - Ocean Optics [Electronic resource] // *Ocean Optics.* 2017. URL: <https://oceanoptics.com/simple-experiment-analyze-light-sources/> (accessed: 11.05.2018).
6. Kukhta M. S. , Sokolov A. P. , Krauinsh D. P. , Bouchard C. K. Stylization levels of industrial design objects. // *Journal of Physics: Conference Series.* - 2017 - Vol. 803, Article number 012082. - p. 1-5
7. Perez R., Seals R., Michalsky J. All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation // *Sol. Energy.* 1993. Vol. 50, № 3. P. 235–245.
8. Engineering Tool Box. Illuminance - Recommended Light Levels [Electronic resource] // *Engineering Toolbox.* 2016. URL: [http://www.engineeringtoolbox.com/light-level-rooms-d\\_708.html](http://www.engineeringtoolbox.com/light-level-rooms-d_708.html) (accessed: 11.05.2018).

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ЛАНТANOИДОСОДЕРЖАЩИХ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ТАЛЛИЯ

*А. Ю. ВЯЗОВСКАЯ*

Томский государственный университет  
Санкт-Петербургский государственный университет  
E-mail: alex\_vyaz93@mail.ru

Антиферромагнетики, демонстрирующие сильное спин-орбитальное взаимодействие (СОВ), привлекают огромный интерес, поскольку являются платформой для наблюдения многих необычных явлений. Так, несколько лет назад была сначала теоретически предсказана [1], а позднее экспериментально подтверждена [2] возможность реализации в антиферромагнитном (АФМ) материале процесса переключения намагниченности, индуцируемого электрическим током (spin-transfer torque). Другим ярким примером служит наблюдение аномального эффекта Холла (АЭХ) в антиферромагнетиках. На протяжении долгого времени считалось, что аномальная холловская проводимость пропорциональна намагниченности материала. Однако, недавно было показано, что металлические неколлинеарные антиферромагнетики с сильным спин-орбитальным взаимодействием могут демонстрировать неожиданно сильный АЭХ, сравнимый с АЭХ для ферромагнитно упорядоченных переходных металлов [3–4]. Еще одним примером принципиально нового фундаментального состояния, возможного в системах с сильным СОВ, является АФМ топологический изолятор [5].

Вышеописанные явления основываются на спин-зависимой электронной структуре материалов. Особый интерес представляет электронная структура поверхности таких систем, поскольку спин-орбитальные эффекты значительно более выражены именно на поверхности (например, эффект Бычкова-Рашбы). Тем не менее, поскольку ранее антиферромагнетики не рассматривались в контексте магнетоэлектроники, исследованию их электронной структуры до последнего времени уделялось недостаточное внимание. Одним из классов материалов, сочетающих в себе сильное СОВ и магнетизм являются лантаноидосодержащие дихалькогениды таллия  $TlLnX_2$  ( $Ln = Gd, Eu, X = Se, Te$ ). Целью данного исследования является исследование магнитного упорядочения, магнитокристаллической анизотропии и электронной структуры объема, а также выявление эффектов совместного влияния сильного СОВ и магнетизма на электронную структуру поверхности одного из соединений этого класса –  $TlEuTe_2$ .

В рамках расчетов из первых принципов были проведено исследование магнитного упорядочения, магнитокристаллической анизотропии и электронная структура объема и поверхности  $TlEuTe_2$ . Было выявлено, что внутри каждого слоя атомов Eu наблюдается ферромагнитное упорядочение, тогда как магнитные моменты слоев Eu демонстрируют антиферромагнитное упорядочение. Рассмотрение магнитокристаллической анизотропии позволило показать, что в вышеописанной АФМ фазе магнитные моменты Eu ориентированы вдоль направления  $[\bar{1}100]$ , что обусловлено диполь-дипольным вкладом. По характеру электронной структуры соединение является металлом. Однако, обладает глобальной запрещенной щелью (ширина 1.3 – 1.4 эВ), которая расположена в зоне проводимости.

Исследование электронной структуры толстых пленок соединения  $TlEuTe_2$  позволило выявить на поверхности, оканчивающейся слоем атомов таллия, выраженную особенность: расщепленное по спину состояние в окрестности точки  $\bar{\Gamma}$  в зоне проводимости (рисунок 1 а). В зонном спектре поверхности, рассчитанном для парамагнитной фазы, вышеупомянутые поверхностные состояния демонстрируют спиновое расщепление (так называемое расщепление по типу Бычкова-Рашбы) за счет нарушения инверсионной симметрии вблизи поверхности. Расчеты, проведенные для АФМ фазы, выявили в спектре поверхности легкую асимметрию состояний в окрестности центра зоны Бриллюэна (точки  $\bar{\Gamma}$ ), что объясняется поверхностным характером рассматриваемых состояний в точке  $\bar{\Gamma}$ . Поскольку эти состояния

локализованы вблизи поверхности, они эффективно взаимодействуют только с ближайшим к поверхности слоем атомов Eu, внутри которого наблюдается ферромагнитное упорядочение 4f моментов Eu. На рисунке 1 б изображена зонная структура толстой пленки TlEuTe<sub>2</sub>, рассчитанная для АФМ фазы, на которой одновременно наблюдаются как спиновая текстура, характерная для расщепления по типу Бычкова-Рашбы, так и асимметрия поверхностных зон, обусловленная ферромагнитным упорядочением в слое атомов Eu. Таким образом, дисперсия состояния на поверхности TlEuTe<sub>2</sub> обусловлена совместным действием эффектов спин-орбитального воздействия и магнетизма.

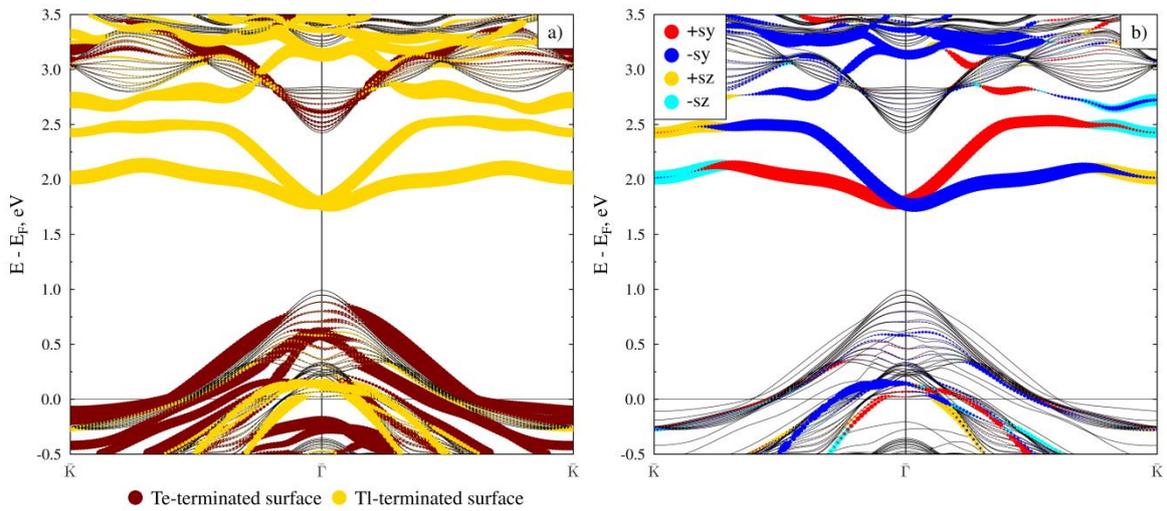


Рисунок 1 – Зонный спектр толстой пленки TlEuTe<sub>2</sub>, рассчитанный для антиферромагнитной фазы вдоль симметричных направлений поверхностной зоны Бриллюэна а) для теллуровой и таллиевой поверхностей; б) с отображением спиновой текстуры зон

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00728.

#### Список литературы

1. Núñez A. S. et al. Theory of spin torques and giant magnetoresistance in antiferromagnetic metals // Physical Review B. – 2006. – V. 73. – №. 21. – P. 214426.
2. Wei Z. et al. Changing exchange bias in spin valves with an electric current // Physical review letters. – 2007. – V. 98. – №. 11. – P. 116603.
3. Chen H., Niu Q., MacDonald A. H. Anomalous Hall effect arising from noncollinear antiferromagnetism // Physical review letters. – 2014. – V. 112. – №. 1. – P. 017205.
4. Suzuki T. et al. Large anomalous Hall effect in a half-Heusler antiferromagnet // Nature Physics. – 2016. – V. 12. – №. 12. – P. 1119.
5. Mong R. S. K., Essin A. M., Moore J. E. Antiferromagnetic topological insulators // Physical Review B. – 2010. – V. 81. – №. 24. – P. 24520.

## СПАРК-ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА YSZ КЕРАМИКИ ДОПИРОВАННОЙ ЕВРОПИЕМ

*П.Д. ЖВАКИНА, А.М. ШРАЙБЕР*

Гомский политехнический университет

Инженерная школа новых производственных технологий

E-mail: zhvakina@yandex.ru

Оптические свойства керамических материалов зависят от размера зерна, размера остаточных пор и наличия дефектов [1]. Чтобы получить керамические материалы с требуемыми оптическими свойствами, необходимо сделать тщательный отбор методов обработки порошка и спекания. Среди многочисленных методов изготовления высококачественной керамики перспективным методом является сухое уплотнение нанопорошков методом спарк-плазменного спекания (СПС). Формирование совершенных межзёренных границ нанометровых масштабов в процессе СПС высокочистых нанопорошков, при равномерном распределении плотности в объеме спекаемой керамики являются условиями получения качественных, конкурентоспособных изделий с комплексом высоких оптических и физико-механических свойств.

Оксид циркония ( $ZrO_2$ ), стабилизированный в кубической фазе, является перспективным фотонным материалом благодаря высокой механической прочности, рекордному показателю преломления, низким оптическим потерям и высокой химической/фотохимической стабильности [2]. Люминесценция  $ZrO_2$ , легированного редкоземельными ионами, изучалась рядом исследователей [3, 4]. Катион иттрия, добавленный к  $ZrO_2$  для стабилизации тетрагональной и кубической фазы, может влиять на люминесценцию редкоземельных ионов. Ионы редкоземельных металлов заменяют ионы  $Zr^{4+}$  в  $ZrO_2$ , и поскольку ион редкоземельного металла является ионвалентным (зарядное состояние  $2+$  или  $3+$ ), для компенсации заряда участвует кислородная вакансия.

В этой работе мы исследовали оптические и люминесцентные свойства керамики из диоксида циркония стабилизированной оксидом иттрия (YSZ) и легированной европием. Поликристаллическая YSZ керамика была консолидирована из нанопорошка методом СПС с использованием установки SPS-515S (Syntex Inc., Япония). Условия СПС были следующими: температура спекания  $T = 1300$  С, вакуум  $P = 10^{-3}$  Па, давление 140 МПа, скорость нагрева  $8^\circ$  С / мин. Продолжительность нагрева составляла 10 минут. Диаметр пресс-форм составлял 14 мм.

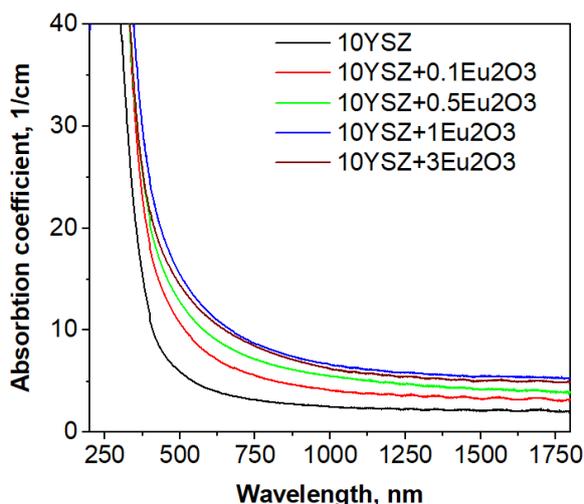


Рис.1. Спектры поглощения YSZ керамики с различной концентрацией европия.

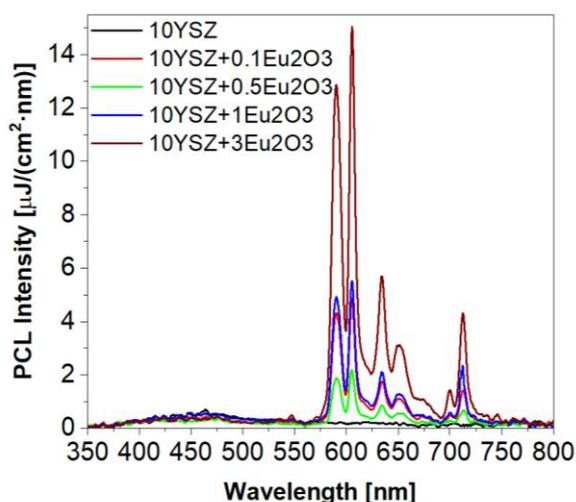


Рис.2. Спектры катодолуминесценции YSZ керамики с различной концентрацией европия.

Оптические свойства спеченной керамики изучались двулучевыми спектрофотометрами LOMO SF-256 UVI и SF-256 ВК в спектральном диапазоне 200-1100 нм и 1100 - 2500 нм соответственно. Интегрированные спектры катодолюминесценции и кинетика распада были исследованы на импульсном оптическом спектрометре на основе сильноточного электронного ускорителя GIN-600 ( $E = 0,25$  МэВ,  $FWHM = 15$  нс,  $W = 23$  мДж /  $см^2$ ) и волоконного спектрометра AvaSpec-2048.

Измерения спектров оптического поглощения YSZ керамик (рис.1) показало, что увеличение концентрации европия приводит к смещению края поглощения в длинноволновую область спектра. Также стоит отметить общий рост поглощения керамик с увеличением концентрации европия.

Анализ проведенных измерений интегральных спектров катодолюминесценции показал, что в спектре катодолюминесценции образцов с европием наблюдаются характерные полосы свечения данного иона. Причем с ростом концентрации европия интенсивность данного свечения в инфракрасной области спектра увеличивается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-13-01233.

#### **Список литературы**

1. C. L. Hardin, Y. Kodera, S. A. Basun, *Optical Materials Express.*, 2013, Vol. 3, pp. 893–903.
2. Z. Xu, L. He, X. Zhong, R. Mu, S. He, X. Cao, *J. of Alloys and Compounds*, 2009, Vol. 478, pp. 168–172.
3. K. Smits, L. Grigorjeva, D. Millers, A. Sarakovskis, A. Opalinska, J. D. Fidelus, W. Lojkowski, *Optical Materials*, 2010, Vol. 32, pp. 827–831.
4. G. Cabello, L. Lillo, C. Caro, G.E. Buono-Core, B. Chornic, M.A. Soto, *J. Non-cryst. Solids*, 2008, Vol. 354, pp. 3919-3928.

**СЦЕНАРИИ ОСВЕЩЕНИЯ ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЁТОМ  
КЛИМАТИЧЕСКИХ И СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ  
ОСВЕЩЁННОСТИ ДЛЯ КУЛЬТУРЫ САЛАТА И ОГУРЦА**

*Е.В. ЖИДОЛОВИЧ, А.А. БАКТЫБАЕВ, А. УАХИ, Т.В. ГРЕЧКИНА*

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет

Инженерная школа новых производственных технологий

E-mail: evz13@tpu.ru

Искусственное освещение в тепличных комплексах одна из основополагающих мер для полноценного роста и развития растений в условиях защищенного грунта. Правильный выбор режима освещения с учетом биологических потребностей растений является ключевым элементом интенсификации технологии светокультуры и получения качественной растительной продукции. Для повышения продуктивности и качества урожая особое значение имеют вопросы оптимизации светового режима овощных культур.

Промышленная теплица в России сегодня – это устоявшееся производство с регламентированными параметрами системы искусственного освещения на основе натриевых ламп. Известно [1,2], что длины волн излучения натриевых ламп высокого давления, в которых сконцентрирована наибольшая часть энергии излучения, совпадают с участками максимальной чувствительности растений. Для основных процессов фотосинтеза растения используют весь видимый диапазон светового излучения, но в синей и красной областях спектра их чувствительность падает. Важно подчеркнуть, что возможности светодиодного облучения в этом аспекте плодотворно развиваются [3-5], где поиск и систематизация данных по рецептам освещения предполагает все более конкретное спектральное применение облучателей для освещения зелёных культур в условиях закрытого грунта. Актуальные световые тенденции, благоприятно влияющие на зарождение и развитие тепличных растений, связывают с развитием технологий светодиодного освещения, как основного источника фотосинтетической активной радиации (ФАР), так и дополнительного источника для досвечивания культур. Светодиодное освещение предлагает большее количество преимуществ для тепличной индустрии [3], включая увеличенную урожайность, раннее цветение, быстрое укоренение/проращивание, лучший контроль за ростом растения и более экономное использование площади. Кроме того, ряд исследований в области агрофотонных технологий направлены на установления рецептов облучения, связанных с применением переменного воздействия [1], нацеленных на совокупный результат по сокращению сроков выращивания рассады овощных культур и повышению качества продукции защищенного грунта.

В настоящей работе проведен анализ экспериментальных и расчетных данных по состоянию освещения (натриевые лампы с зеркальным отражателем ДНаЗ) и обеспечению растений фотосинтетической активной радиацией (ФАР) во время созревания и плодоношения овощных культур. На предприятии ООО «Трубачево» (п.Трубачево Томская область) были проведены измерения по освещённости и плотности фотосинтетического фотонного потока (PPFD) в частности для салатной теплицы №1 и теплицы №4 по выращиванию огурца.

Результаты наблюдений (октябрь 2017г.) и экспериментальных исследований (февраль 2018 г.) проводились для фрагментов теплиц, именуемые Домиком (технический план помещения для огуречной теплицы показан на рис.1). В ходе проведенных исследований выявлен факт воздействия искусственного освещения в порядке трех ближайших рядов световых приборов, вклад остальных рядов светильников в Домике незначительный, особенно для нижних уровней ценоза. Выполнено трехмерное моделирование огуречной теплицы в параметрах Домика (количество световых приборов 74шт). Кроме того, исходя из полученных данных по PPFD, наибольшее количество ФАР распространено по верхним листам вертикального стебля огурца, хотя в фотосинтезе участвуют листья по всей длине стебля, начиная с нижних уровней. Результат полученных

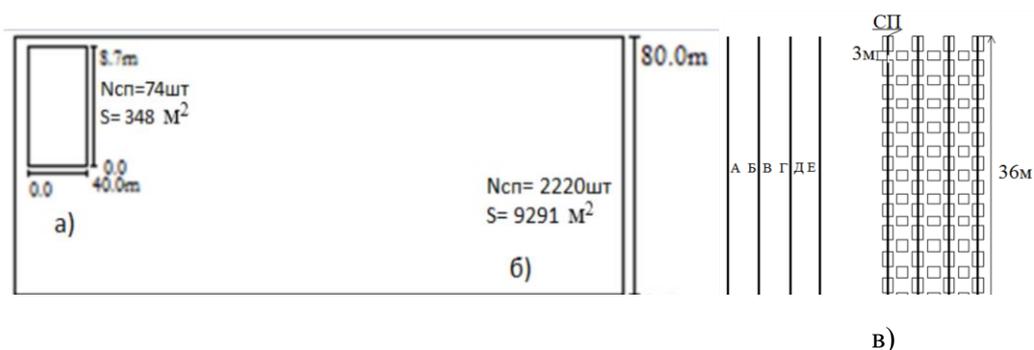


Рисунок 1 – Технический план помещения Домика (а, в) и теплицы (б), где А, Б, В, Г, Д, Е – стороны каждого из рядов растений огурца (вид сверху), СП – световой прибор; Nсп – количество световых приборов, шт; S- площадь помещения, м<sup>2</sup>

данных свидетельствует о рассмотрении новых подходов в освещении растений вертикального роста, для обеспечения равномерного сбалансированного освещения по всей длине растения.

Создание 3D модели объекта салатной теплицы выполнялось по количеству световых приборов в Домике равное 42 шт. и в общем объеме салатной теплицы равное 630шт., результаты представлены в виде расчётных данных и визуализации сцен освещения. Исследование уровня облученности салатной культуры проводилось для двух Домиков (крайнего – вблизи окна и среднего – расположение в глубине теплицы). Результат полученных экспериментальных и расчетных данных привел к обсуждению вопроса уровня и качества естественной освещенности, в том числе в период вегетации растения. В настоящей работе проведен анализ качества светового дня в период с 2017/2018 года в осенне-зимний период. Сценарии освещения, выполненные с учетом климатических сезонных колебаний естественной освещенности в салатной теплице, демонстрируют ее вклад, как в течение дня, так и в течение всего срока вегетации салата, несмотря на короткий световой день. Анализ проведенных исследований в салатной теплице предполагает учет параметров естественной освещенности при планировании систем искусственного освещения, а также обращают внимание на оптимизацию используемого пространства, как многоярусного строения.

#### Список литературы

1. Молчанов А.Г. Энергосберегающее оптическое облучение промышленных теплиц: монография/А.Г. Молчанов, В.В. Самойленко; Ставропольский государственный аграрный университет. - Ставрополь: АГРУС, 2013. – 120с.
2. Аюпов М.Р., Ракутько С.А. О возможности коррекции спектра натриевой лампы с помощью светодиодного источника под требования светокультуры // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 1 (94). С 5-13.
3. Светодиодное освещение Philips для теплиц [Электронный ресурс] URL: [www.lighting.philips.ru/products/horticulture](http://www.lighting.philips.ru/products/horticulture)
4. Energy-efficient LED irradiator for greenhouse cropping [Electronic resource] Энергоэффективный светодиодный облучатель для тепличного растениеводства / Т. V. Grechkina [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. 156: Materials and Technologies of New Generations in Modern Materials Science. — [012044, 5 p. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012044> <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/36550>
5. Тришина Т., Зориков Н. Фитотерапия – светодиодная связь с растениями // Современная светотехника. 2018 №2 С.44-46 [http://www.lightingmedia.ru/netcat\\_files/File/44\(2\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/44(2).pdf)

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ

В.И. ИВАНОВ, О.О. ОВСЕЙЧУК, А.В. МЯГОТИН

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

E-mail: magistrfestu@yandex.ru

Нелинейно-оптические методы диагностики материалов основаны на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических свойств среды [1]. В жидких двухкомпонентных средах нелинейно-оптический отклик может быть связан с концентрационными потоками, обусловленными, например, явлением термодиффузии (эффект Соре) или электрострикции [2-4]. При этом величина и динамика нелинейного отклика определяются кинетическими коэффициентами среды, которые в случае наносuspензий включают в себя параметры наночастиц.

Целью данной работы является анализ метода динамической голографии с учетом вклада концентрационных механизмов оптической нелинейности среды для диагностики параметров наночастиц в жидкости.

Ниже приведен теоретический анализ эффективности записи интерференционной решетки в наносuspензии с учетом как обычной тепловой нелинейности, так с учетом концентрационных механизмов.

Пусть распределение интенсивности падающего излучения в плоскости слоя среды имеет вид (такое распределение возникает при интерференции двух плоских волн)

$$I(x) = I + I \cos Kx, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность световой волны,  $K = 2\pi/\Lambda$  – волновой вектор интерференционной решетки,  $\Lambda$  – ее период,  $x$  – координата в плоскости слоя среды.

Балансные уравнения, описывающие динамику температуры и концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учетом диффузионного и электрострикционного потоков, можно записать в виде [7]:

$$c_p \rho \partial T / \partial t = \operatorname{div} J_1 + \alpha I_0 (1 + \sin Kx), \quad (2)$$

$$\partial C / \partial t = \operatorname{div}(-D \nabla C - D_{thd} C \nabla T - \gamma C \nabla I). \quad (3)$$

Здесь  $T$  – температура среды,  $J_1 = -\chi \nabla T$  – тепловой поток,  $\chi$  – теплопроводность среды,  $c_p$  и  $\rho$  – удельная теплоемкость и плотность среды,  $\alpha$  – коэффициент поглощения среды,  $C(r,t)$  – объемная концентрация дисперсных частиц,  $D$  – коэффициент диффузии,  $\gamma = \beta \mu$ ,  $\mu = (b \pi \eta a)^{-1}$  – подвижность микрочастицы,  $a$  – радиус наночастицы,  $\eta$  – вязкость жидкости,  $\beta$  – поляризуемость наночастицы,  $D_{thd}$  – коэффициент термодиффузии [8].

Считая изменение температуры малым, получаем выражение для амплитуды модуляции температуры среды:

$$T_1 = \sigma \tau_T (c_p \rho)^{-1} [1 - \exp(-t / \tau_T)], \quad (4)$$

где  $\tau_T = \chi (c_p \rho)^{-1} K^{-2}$  – время тепловой релаксации.

Для решения концентрационной задачи предположим, что амплитуда модуляции концентрации также мала по сравнению с начальным значением  $-(C_1/C_0) \ll 1$ :

$$C(x,t) = C_0 + C_1(t) \sin Kx \quad (5)$$

Здесь  $C_0$  – начальная концентрация наночастиц.

Решения линеаризованного уравнения (3) с учетом (4):

$$C_1 = \{\alpha \chi^{-1} C_0 D_T D^{-1} K^{-2} + \gamma I_0 D^{-1} C_0\} [1 - \exp\{-K^2 D t\}], \quad (6)$$

где  $\tau_D = (K^2 D)^{-1}$  – диффузионное время релаксации концентрации наночастиц.

На основании полученных решений тепловой и концентрационной задач найдем эффективность голографической записи. Дифракционной эффективностью голограммы называется отношение [1]  $\eta = I_1/I_0$ , где  $I_0$  — интенсивность падающего на голограмму считывающего луча;  $I_1$  — интенсивность света, продифрагировавшего в первый порядок дифракции.

Для дифракционной эффективности тонких фазовых голограмм имеем выражение [1]:

$$\eta = t_0^2 J_1^2(\varphi_1), \quad (7)$$

где  $t_0$  — амплитудное пропускание слоя среды;  $\varphi_1$  — амплитуда модуляции фазового пропускания,  $J_n$  — бесселева функция  $n$ -го порядка.

Полагая среду прозрачной и амплитуду фазовой модуляции малой, имеем:

$$\eta = \left(2\pi L \Delta n \lambda^{-1}\right)^2, \quad (8)$$

где  $L$  — толщина слоя нелинейной среды,  $\Delta n$  — амплитуда модуляции показателя преломления.

Используя решение (4) и (6), получаем окончательно (в частности, для стационарного режима):

$$\eta = \{2\pi L \lambda^{-1} [\alpha \tau_T (c_p \rho)^{-1} (\partial n / \partial T) + (\alpha \chi^{-1} C_0 D_T D^{-1} K^{-2} + \mathcal{M}_0 D^{-1} C_0) (\partial n / \partial C)]\}^2 \quad (9)$$

Полученное выражение описывает зависимость дифракционной эффективности решетки от параметров среды. В частности, сюда входит концентрация наночастиц, радиус (в т.ч. гидродинамический) наночастиц, показатель преломления материала наночастиц. Дополнительные возможности представляет регистрация динамики образования решетки, поскольку тепловое и концентрационное времена релаксации отличаются на несколько порядков.

### Список литературы

1. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1985. - 240 с.
2. Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Dholakia K., Wright E. Nonlinear optical response of colloidal suspensions// Optics Express. - 2009. - V. 17(12). - P. 10277-10289.
3. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм. - Владивосток: Дальнаука, 2006 – 143 с.
4. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // Philosoph. Mag. B. - 2002. - V. 82. - P. 447-452.
5. Иванов В.И., Карпец Ю.М. Перспективные среды для динамической голографии // Вестник ДВО РАН. - 2003. - №1. - С. 93-97.
6. Myagotin A.V., Ivanov V.I., Ivanova G.D. Transient gratings in the transparent nanoliquid // В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Сер. "Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics". - 2017. - С. 101761Z.
7. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Kirjushina S.I., Mjagotin A.V. The concentration mechanisms of cubic nonlinearity in dispersive media//Journal of Physics: Conference Series. -2016. -V. 735. - №1.-P. 012013.
8. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Кирюшина С.И., Мяготин А.В. Нанодисперсные среды для динамической голографии//Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. – 58. – № 11-3. – С. 153-156.

## СВЕТОЛИНЗОВЫЙ ОТКЛИК В НАНОЖИДКОСТИ

Г.Д. ИВАНОВА, В.И. ИВАНОВ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

E-mail: galigd2015@yandex.ru

Нелинейно-оптическая диагностика наноматериалов основана на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды [1-3]. Одним из классических методов является исследование термолинзового отклика среды, обусловленного наличием поглощения [1]. В прозрачной наногетерогенной среде с различными показателями преломления компонентов на микрочастицы в электромагнитном поле действуют электрострикционные силы, которые могут быть причиной возникновения концентрационных потоков и, следовательно, нелинейного светового отклика [4-7]. В зависимости от знака поляризуемости микрочастицы могут втягиваться (если показатель преломления вещества дисперсной фазы больше, чем дисперсионной среды) или выталкиваться (в обратном случае) из областей с большей напряженностью электрического поля электромагнитной волны.

Целью данной работы является теоретический анализ светового отклика в прозрачной дисперсной среде в однолучевой схеме.

Мы будем рассматривать жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности [4].

Для гауссова пучка распределение интенсивности падающего излучения в плоскости, перпендикулярной оптической оси  $z$ :

$$I = I_0 \left( 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2 \right)^{-1} \exp(-r^2(z)/r_1^2(z)), \quad (1)$$

где  $r_1(z) = r_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi r_0^2} \right)^2}$  - радиус пучка на расстоянии  $z$  от перетяжки,  $r$  - расстояние

от оси пучка,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $r_0$  - радиус пучка в перетяжке,  $I_0$  - интенсивность излучения на оси в плоскости перетяжки пучка.

Балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузионного и электрострикционного потоков ( $J_{el} = \gamma C \nabla I$  - электрострикционный поток), можно записать в виде [4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \text{div}(\gamma C \nabla I). \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $C(r, t)$  - объёмная концентрация дисперсных частиц,  $D$  - коэффициент диффузии,  $\gamma = b\mu$ ,  $b = \frac{4\pi\beta D}{c_0 n k T}$ ,  $\mu = (6\pi\eta a)^{-1}$  - подвижность наночастицы,  $a$  - радиус наночастицы,  $\eta$  - вязкость жидкости,  $\beta$  - поляризуемость частицы,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура среды,  $c_0$  - скорость света в вакууме,  $n$  - эффективный показатель преломления среды.

Далее, используя представление  $C(r, t) = C_0(1 + C'(r, t))$  и полагая изменение относительной концентрации частиц малым  $C'(r, t) \ll 1$ , получим для уравнения (2) начальные и граничные условия:

$$C'(r, 0) = 0, \quad \frac{\partial C'}{\partial r}(r=0) = 0, \quad 0 \leq r < \infty. \quad (3)$$

Используя функцию Грина этой задачи, получаем:

$$C'(r, t) = \delta \frac{r_0^2}{4D} \left[ \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) - \frac{r_0^2}{r_0^2 + 4Dt} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2 + 4Dt}\right) \right]. \quad (4)$$

Для частиц с радиусом, много меньшим длины волны излучения  $\lambda$ , показатель преломления среды пропорционален концентрации частиц [5]:

$$n = n_1(1 + \Phi\delta). \quad (5)$$

где  $\delta = (n_2 - n_1)/n_1$ ;  $n_1$  и  $n_2$  - показатели преломления вещества дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно,  $\Phi = (4/3)\pi a^3 C$  - объемная доля дисперсной среды.

Для расчета светлинзового сигнала используем выражение для линзовой прозрачности кюветы [7]:

$$T = 1 + \frac{2(z_1/l_0)F_{nl}(0)}{(1 + z_1^2/l_0^2)(1 + 3z_1^2/l_0^2)}, \quad (6)$$

где  $F_{nl}(0)$  - нелинейный набег фаз в оптической ячейке на оси пучка.

Используя (4-5), можем получить для значения нелинейного набег фазы:

$$F_{nl}(0) = 0.25n_1 d D^{-1} \Phi_0 \delta^2 r_0^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_0^2 + 4Dt} \right), \quad (7)$$

где  $d$  - толщина слоя жидкости. Полученное выражение с учетом (6) описывает светлинзовый отклик (интенсивность излучения на оси пучка в плоскости фотоприемника).

Таким образом, в работе получено выражение для светлинзового отклика прозрачной наносuspension. Проведенный анализ дает возможность определять по светлинзовому отклику не только концентрацию наночастиц, но и коэффициент диффузии частиц.

Полученные результаты актуальны для оптической диагностики дисперсных жидкофазных сред [4-6], а также для нелинейной оптики таких сред [6-8].

#### Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Термолинзовая спектроскопия двухкомпонентных жидкофазных сред // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2011. - № 4. - С. 39-44.
2. Vicary L. Pump-probe detection of optical nonlinearity in water-in-oil microemulsion // Philosoph. Mag. B. - 2002. - V. 82. - P. 447-452.
3. Lee W., El-Ganainy R., Christodoulides D., Dholakia K., Wright E. Nonlinear optical response of colloidal suspensions// Optics Express. - 2009. - V. 17(12). - P. 10277-10289.
4. Ливашвили А.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Стационарный термолинзовый отклик наножидкости // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. - 2014. - №6. - С. 227-230.
5. Chintamani P., Shalini M., Agnel P., Meera V., Tejas I. H. and Radha S. Non-Linear Optical Studies of Colloidal Nanofluids // International Journal of Chemical and Physical Sciences. - 2014.- 3(5).- P. 44-51.
6. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Okishev K.N. and Khe V.K. Light-induced thermodiffusion in two-component liquid // Proc. SPIE.-2016.- 10035.- P. 100354Y.
7. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // Соросовский образовательный журнал. - 1996. - №5. - С. 85-92.
8. Ivanov V., Ivanova G. and Khe V. Thermal lens response in the two-component liquid layer // Proc. SPIE. - 2015. - 9680.- P. 968042.

## ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ В НАНОСУСПЕНЗИИ

*Г.Д. ИВАНОВА, В.К. ХЕ, В.И. ИВАНОВ*

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

E-mail: galigd2015@yandex.ru

Широко известны химические методов формирования наноструктур (в том числе фотонных кристаллов) из жидкой фазы [1-3]. Однако недавние исследования демонстрируют ряд новых возможностей. Например, в работе [4] показано, как светоиндуцированная термодиффузии латексных микрочастиц в растворе приводит к образованию двумерного кристалла на охлаждающей поверхности в конвективном потоке жидкости. При этом концентрация микрочастиц увеличивалась в зоне светового пучка на несколько порядков. Для наночастиц реализация такого метода затруднена, поскольку коэффициент термодиффузии для них значительно меньше, чем для микрочастиц [5].

В данной работе предлагается использовать силы светового давления для формирования кристаллов из наночастиц в прозрачной наносуспензии.

Рассмотрим прозрачную наносуспензию с малой объемной долей дисперсной фазы, освещаемую потоком лазерного излучения с однородным распределением интенсивности (рис. 1). Установившаяся скорость наночастиц в суспензии под действием светового поля в первом приближении линейно зависит от интенсивности излучения [3]:

$$V = \gamma I, \quad (1)$$

где  $\gamma = \frac{64 \pi^2 a^5}{9 c_0} \frac{n_1}{\lambda^4 \eta} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}$ ,  $I$  - интенсивность света,  $(n_1, n_2$  - показатели преломления

веществ дисперсионной и дисперсной сред соответственно),  $m = n_2/n_1$ ,  $\eta$  - вязкость жидкости,  $a$  - радиус частицы,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $c_0$  - скорость света.

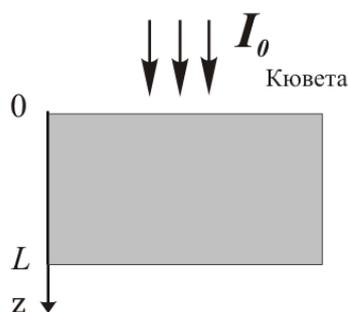


Рис. 1. Схема осаждения наночастиц в световом поле

Динамика изменения концентрации наночастиц описывается уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \text{div}(VC), \quad (2)$$

где  $C(z, t)$  - массовая концентрация дисперсных частиц,  $D$  - коэффициент диффузии.

Решение одномерной задачи (2) с соответствующими граничными условиями на верхней и нижней границах в стационарном решении выглядит как:

$$C(z', I) = C_0 I (\gamma l / D) \frac{\exp(z' \gamma l / D)}{\exp(\gamma l / D) - 1}, \quad (3)$$

где  $C_0$  - начальная концентрация наночастиц,  $l$  – высота кюветы,  $z' = z/l$ .

Как показывают оценки для увеличения относительной концентрации на несколько порядков требуются интенсивности около  $\text{МВт/м}^2$ , что однако для прозрачных наноматериалов вполне достижимо с использованием непрерывных лазерных источников. При этих мощностях объемная доля наночастиц на дне кюветы может достигать единицы, формируя условия для образования кристаллической структуры.

Таким образом, предложен оптический метод формирования кристаллов из наносuspензии. Отличительной особенностью метода является использование сил светового давления, с помощью которых можно осуществлять эффективную седиментацию наночастиц в прозрачной среде [6].

Предложенный метод формирования коллоидного кристалла из разбавленных наносuspензий представляет также интерес для формирования наносит, фотонных кристаллов и химических сенсоров, для увеличения чувствительности диффузионно-ограниченных поверхностных биодатчиков [7]. Результаты могут быть полезны также для развития методов оптической диагностики наноматериалов [8].

#### Список литературы

1. Debra J.D., Lyon L.A. Thermoresponsive photonic crystals // J. Phys. Chem. B. -2000. – 104. – P.6327–6331.
2. Texter J. Polymer colloids in photonic materials // Comptes Rend. Chimie. - 2003. – 6. – P.1425–1433.
3. Zhang F.J., Cheng G.X., Ying X.G. Emulsion and macromolecules templated alginate based polymer microspheres // Reactive Func. Polym. 2006. – 66. - P.712–719.
4. Duhr S., Braun D. Two-dimensional colloidal crystals formed by thermophoresis and convection // Applied Physics Letters. – 2005. – 86. – P. 131921.
5. Рабинович Г.Д. Разделение изотопов и других смесей термодиффузией. - М.: Атомиздат, 1981. - 144 с.
6. KheV.K., Ivanov V.I., Ivanova G.D., Chigrin P.G. Sedimentation of particles by the light pressure in nanosuspension // Proc. SPIE. -2017. – 10466. – P. 104664K.
7. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. - 105 с.
8. Buzzaccaro S., Tripodi A., Rusconi R., Vigolo D., Piazza R. 2008. Kinetics of sedimentation in colloidal suspensions // Journal of Physics: Condensed Matter. -2008. – 20. – P.494219.

## МЕХАНИЗМЫ КОЛЕБАНИЙ МИКРОЧАСТИЦЫ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

*А.А. КАЧАЕВ, В.И. ИВАНОВ*

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

E-mail: nauka-festu@yandex.ru

Известны оптические ловушки, принцип действия некоторых основан на использовании различных светоиндуцированных сил [1]. Оптические ловушки используют в биомедицинских, биологических и нанотехнических исследованиях и разработках. Оптическая ловушка представляет собой энергетическую «яму», попадая в которую, частица может совершать колебания. Такие колебательные эффекты в оптических ловушках изучены мало.

Целью данной работы является анализ различных механизмов возникновения колебаний микрочастиц в оптических ловушках.

В классическом случае электрострикционных градиентных сил [2] микрочастица может совершать колебания в радиальном направлении в поле гауссова пучка. Проведенный анализ показывает, что в маловязкой (например, газовой) среде добротность такой колебательной системы может быть высокой, что обеспечивает достаточную длительность затухающих колебаний.

В жидкофазных средах могут проявляться специфические механизмы колебаний, обусловленные термокапиллярными эффектами. В частности, в работе авторами были обнаружены незатухающие колебания пузырька при освещении кюветы пучком лазера, имеющим вытянутую вдоль той же координаты форму поперечного распределения интенсивности [3]. Возникающие колебания связаны с термокапиллярным механизмом неустойчивости положения равновесия частицы в неоднородном тепловом поле. Проведенный на основе данной модели анализ хорошо описывает экспериментальные зависимости периода колебаний от интенсивности падающего излучения и размера пузырька.

В случае газового пузырька в жидкости существует целый ряд механизмов его колебательных движений, которые могут проявляться в оптической ловушке. Хорошо известны маятниковый механизм (связанный с изменением формы пузырька) и радиальный (который определяется давлением газа в пузырьке). Механизм кратковременных периодических интенсивных возмущений концентрации ПАВ вокруг пузырька были выявлены авторами [4]. Период этих колебаний составлял от нескольких секунд до десятков минут и зависел от времени, толщины слоя, свойств жидкостей, горизонтального диаметра пузырька и начального перепада концентрации.

В данной работе проведен сравнительный анализ описанных механизмов колебаний микрочастиц, рассмотрена их влияние на устойчивость микрочастицы в оптической ловушке и характеристики колебательных процессов в ней.

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации режимов работы оптических ловушек, а также для разработки систем пассивной гомогенизации жидкостей, микросистем охлаждения и теплообмена с использованием в качестве теплоносителя многокомпонентных смесей жидкостей.

### Список литературы

1. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. - 105 с.
2. Эшкин А. Давление лазерного излучения // УФН. – 1973. - т. 110. - С. 101.
3. Kuzin A.A., Ivanov V.I., Ivanova G.D., Karpets Y.M. Light induced mechanism of the bubble clusters formation //Proc. SPIE. - 2017. – V. 10176. – P.101761X.
4. Зуев А.Л., Костарев К.Г. Особенности концентрационно-капиллярной конвекции // Успех физических наук. 2008. – Т. 178. - №10. - С.14-21.

## V-СОДЕРЖАЩИЕ АНТИФЕРРОМАГНИТНЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ

*А.С. КУЗЬМИН<sup>1</sup>, Е.К. ПЕТРОВ<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

E-mail: ifekl@mail.ru

Топологические изоляторы (ТИ) [1], как класс узкозонных полупроводников, в течение последнего десятилетия привлекли к себе пристальное внимание исследователей. Прежде всего, ТИ выделяются тем, что сильное спин-орбитальное взаимодействие в этих материалах приводит к инвертированию энергетической щели и образованию проводящих состояний на поверхности. Снятие симметрии обращения времени магнитным полем и комбинация эффектов спин-орбитального и обменного взаимодействий может позволить наблюдать такой перспективный с прикладной точки зрения эффект, как квантовый аномальный эффект Холла. Поэтому магнитная функционализация топологических изоляторов является чрезвычайно актуальным направлением исследований.

Одним из наиболее многообещающих подходов в этой области является «магнитное продолжение» ТИ: способ намагничивания ТИ, предполагающий рост тонкой магнитной пленки на поверхности. В работах [2, 3] было показано, что осаждение ионов Mn и Se (Te) на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) приводит к тому, что осаждаемые ионы проникают в центр приповерхностного пятислойного блока ТИ и образуют соединение  $\text{MnBi}_2\text{Se}_4$  ( $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ ). Несмотря на перспективность такого подхода, системы, намагниченность которых обусловлена атомами других переходных металлов, еще не исследованы. В рамках описанной выше схемы нами были рассмотрены ванадий-содержащие системы.

Поскольку обсуждаемые свойства ТИ и систем на их основе обусловлены особенностями зонной структуры этих материалов, подходящим инструментом для их исследования является проведение первопринципных (квантово-механических) расчетов электронной структуры. В данной работе был использован метод проекционных плоских волн (PAW), реализованный в программном пакете VASP.

В качестве основы описанной схемы было рассмотрено три ТИ:  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Путем осаждения на их поверхность ионов V и Se (Te), можно получить 3 упорядоченных соединения:  $\text{VBi}_2\text{Se}_4$ ,  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$ . Результаты расчетов показывают, что образование таких соединений энергетически выгодно. Несмотря на то, что описанная выше схема роста таких материалов главным образом подходит для создания двумерных гетероструктур, возможен рост пленок, толщина которых достаточна для образования объемоподобных зон. Следовательно, исследование электронной структуры объема таких соединений является необходимым этапом анализа.

Согласно нашим результатам, в равновесном состоянии  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  кристаллизуются в ромбоэдрической фазе, а  $\text{VBi}_2\text{Se}_4$  в моноклинной. Несмотря на это, мы продолжили исследовать ромбоэдрическую фазу  $\text{VBi}_2\text{Se}_4$ , так как технология роста этих материалов предполагает наличие подложки ТИ, имеющую в данном случае ромбоэдрическую структуру.

Все рассматриваемые соединения в ромбоэдрической фазе характеризуются антиферромагнитным (АФМ) упорядочением I типа. Ось квантования спина лежит в плоскости (0001), причем внутри плоскости магнитная анизотропия отсутствует. В объеме все три соединения являются полупроводниками с энергетической щелью около 55, 332 и 232 мэВ для  $\text{VBi}_2\text{Se}_4$ ,  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  соответственно (рис. 1). Анализ орбитального состава зон, образующих края энергетической щели и расчет топологических инвариантов показали, что энергетические щели в  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  инвертированы.

Прямым следствием этого являются бесщелевые состояния на поверхности. Видно, что на поверхностях (0001)  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  таких состояний присутствуют, имеют близкую к линейной дисперсию и характерную геликоидальную спиновую текстуру,

характерную для поверхностных состояний ТИ (рис. 2). Смещение точки Дирака из точки  $\bar{\Gamma}$  вызвано in-plane намагниченностью. Таким образом,  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  являются топологически нетривиальной АФМ-упорядоченной фазой — АФМ ТИ [4].

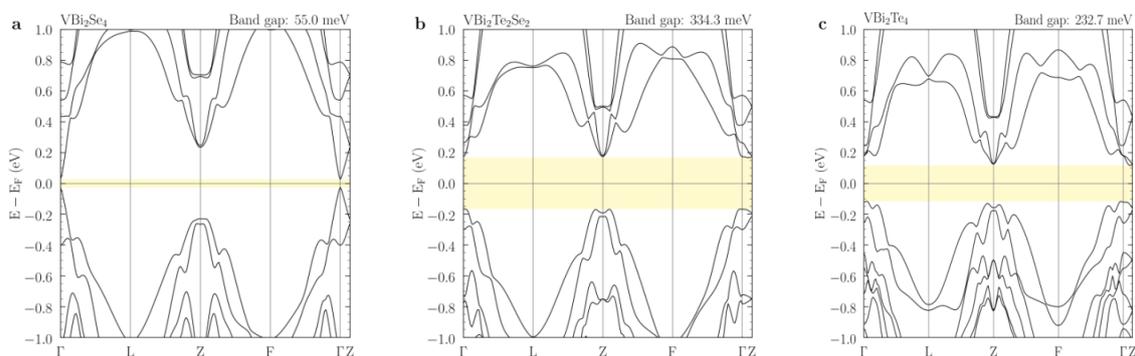


Рисунок 1 – Электронный энергетический спектр объема  $\text{VBi}_2\text{Se}_4$  (а),  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  (б) и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  (с) в ромбоэдрической фазе. Желтым цветом подсвечена энергетическая щель

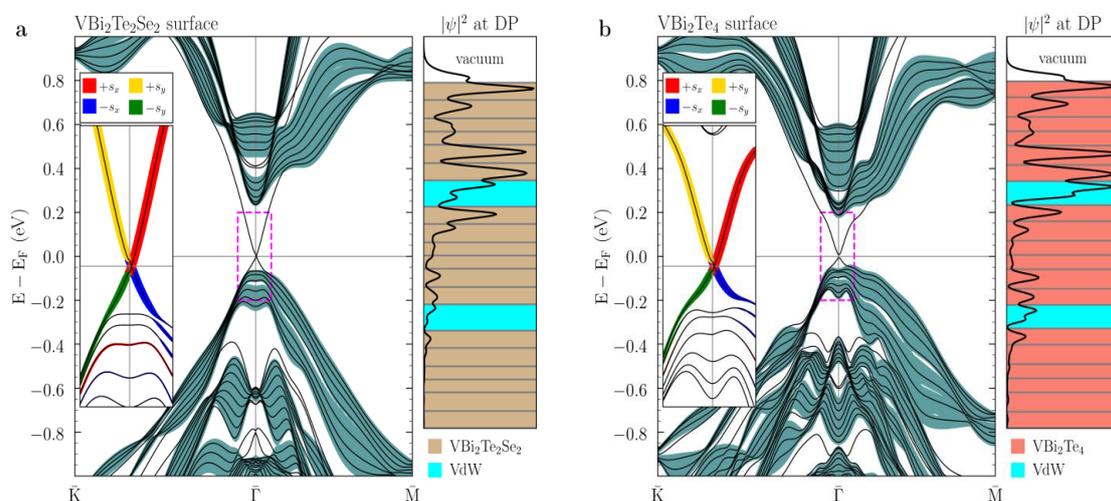


Рисунок 2 – Электронный энергетический спектр поверхности  $\text{VBi}_2\text{Te}_2\text{Se}_2$  (а) и  $\text{VBi}_2\text{Te}_4$  (б). На панели слева показана спиновая текстура поверхностного состояния в окрестности точки Дирака (DP). На панели справа показана зависимость квадрата волновой функции в окрестности точки Дирака от координаты  $z$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00728.

### Список литературы

1. Hasan M.Z., Kane C.L. Colloquium: Topological insulators // *Reviews of Modern Physics*. – 2010. – Vol. 82. – №. 4. – P. 3045.
2. Otrokov M.M. et al. Magnetic extension as an efficient method for realizing the quantum anomalous hall state in topological insulators // *JETP Letters*. – 2017. – V. 105. – №. 5. – P. 297-302.
3. Hirahara T. et al. Large-Gap Magnetic Topological Heterostructure Formed by Subsurface Incorporation of a Ferromagnetic Layer // *Nano letters*. – 2017. – V. 17. – №. 6. – P. 3493-3500.
4. Mong R.S.K., Essin A.M., Moore J.E. Antiferromagnetic topological insulators // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 81. – №. 24. – P. 245209.

## ЯРКОСТЬ ЛЮМИНОФОРОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ПОЛЕ РАДИАЦИИ, СРАВНЕНИЕ С ПРОМЫШЛЕННЫМИ

*Д.А. МУСАХАНОВ<sup>1</sup>, В.М. ЛИСИЦЫН<sup>1</sup>, Ж.Т. КАРИПБАЕВ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет

E-mail: Dos\_f@mail.ru

Люминофоры на основе ИАГ:Се являются наиболее перспективными для использования в светодиодах (СД). Люминофоры представляют собою кристаллические многокомпонентные системы. Синтез их осуществляется обычно с использованием твердофазных реакций. Температуры плавления компонентов – от 2455°С в Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 2075°С в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Поэтому воспроизводимость результатов синтеза низкая: элементный состав микрокристаллов существенно отличается от заложенного в шихту, изменяется состав разных партий люминофора даже при синтезе в одинаковых условиях, и одинакового исходного состава шихты. Изменяются и люминесцентные свойства. Объясняется это сильным влиянием на результат синтеза неконтролируемых отклонений технологических режимов в процессе синтеза. Поэтому постоянно ведутся работы по совершенствованию технологий синтеза [1-2].

В настоящей работе приведены результаты исследований люминофоров, синтезированных в поле радиации. Синтез образцов проводился из шихты, составленной из оксидов иттрия, алюминия, церия и гадолиния. Шихта помещалась в тигель. На шихту в тигле направлялся мощный электронный пучок, генерируемый ускорителем электронов ЭЛВ-6 ИЯФ СО РАН. Синтез в поле радиации очевидно должен способствовать протеканию твердофазных реакций, поскольку в мощном потоке радиации шихта находится в состоянии, близком к плазменному.

Синтезированные образцы представляли собою керамические шарики диаметром 3-6 мм характерного желтого цвета. Для экспресс оценки качества синтезированной ИАГ:Се керамики была измерена яркость образцов керамики в сравнении с яркостью промышленных эффективных люминофоров. Для этого образцы керамики дробились в порошок. Полученные порошки запрессовывались в металлические шайбы толщиной 1мм. В такие же шайбы запрессовывались выбранные люминофоры того же состава. Образцы располагались на пластине, которая могла перемещаться в плоскости, перпендикулярной направлению измерения.

Измерялась яркость люминесценции образцов при возбуждении излучением чипов с  $\lambda$  365 и 460 нм. Сравнение яркостей является объективным способом сравнения эффективности преобразования излучений чипа в люминесценцию. Фотография люминофоров при освещении лампой накаливания приведены на рисунке. На рисунке на шайбе 5 светлым кругом обозначена область люминофора, в которой измерялась яркость во всех люминофорах. Яркость измерялась яркометром CS-200 chroma meter в абсолютных величинах. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значение яркости и координаты цветности при возбуждении излучением чипа с  $\lambda$  460нм

Нумерация, обозначения	Яркость, Кд/м <sup>2</sup>	Координаты диаграммы цветности, x/y
1	57,00	0,3673/0,4810
2	61,06	0,3660/0,4907
3	11,39	0,3571/0,3667
4	241,59	0,4186/0,4995
5	164,72	0,4834/0,4335
6	642,60	0,4635/0,5058

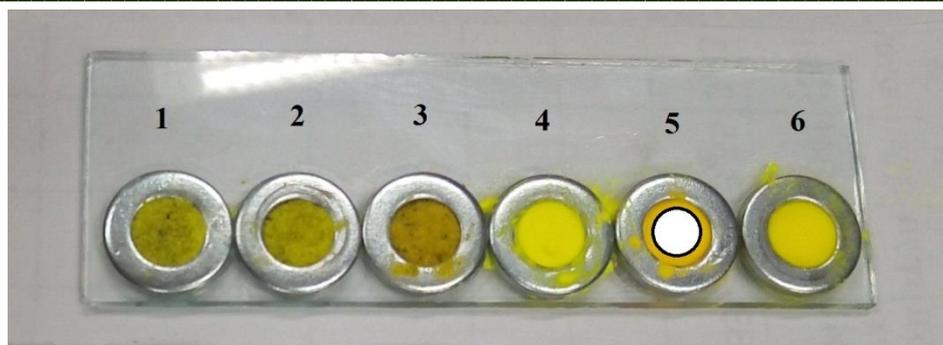


Рисунок 1 – Фотография люминофоров: 1-3 люминофоры синтезированные в электронном пучке, 4 - СДЛ-4000, 5 - СДЛ-2700, 6 - YAG-02.

Яркومتر CS-200 chroma meter имеет функцию измерения координат цветности. Координаты цветности излучения при возбуждении излучением чипа с  $\lambda$  460нм приведены в таблице 1.

Как следует из представленных результатов измерений яркость полученных образцов керамики сопоставима с яркостью промышленных люминофоров. Эти результаты позволяют полагать, что дальнейшая обработка образцов керамики позволит получить приемлемые значения эффективности преобразования излучения чипа в люминесценцию. Обработка заключается в очистке образцов керамики от загрязнений, дроблении керамики до размеров частиц в среднем до 10 мкм и отжиге частиц керамики для получения микрокристаллов люминофора при температуре 1600- 1700 С.

#### Список литературы

1. Д.А. Мусаханов, В. М.Лисицын, М.Г.Голковский, Ю.И.Михайлов Люминесценция синтезированных в поле радиации люминофоров на основе ИАГ, XVI Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике (LLPh-2018), посвященная 100-летию Иркутского государственного университета.
2. Лисицын В.М., Социн Н.П., Янян Цзюй, Степанов С.А., Лисицына Л.А., Тулегенова А.Т., Абдуллин Х.А. Характеристика фотолюминесценции люминофоров разной предыстории на основе иттрий-алюминиевого граната с Се, Gd. Известия высших учебных заведений. Физика. 2017.- №5.-стр.106-112.
3. V. Lisitsyn, L. Lisitsyna, A. Dauletbekova, M. Golkovskii, Zh. Karipbayev, D. Musakhanov, A. Akilbekov, M. Zdorovets, A. Kozlovskiy, E. Polisadova Luminescence of the tungsten-activated  $MgF_2$  ceramics synthesized under the electron beam //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms -2018. -Vol. 435, -P. 263-267.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОНТОГЕНЕЗА КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗОВ УРАЛЬСКОГО ТИПА МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Ю.В. НЕФЕДОВ, В.С. НИКИФОРОВА

Санкт-Петербургский горный университет

E-mail: [yurijnefedov@yandex.ru](mailto:yurijnefedov@yandex.ru)

В качестве особой совокупности алмазов уральского типа принято выделять округлые кристаллы додекаэдрического габитуса. Эти алмазы характеризуются высоким качеством, преобладанием додекаэдров при резко подчиненном количестве комбинационных форм, октаэдров и кубов [2, 3]. Существенный вклад в систематизацию знаний об образовании алмаза внесли онтогенические исследования В. В. Бескрованова, который охарактеризовал историю формирования алмаза в рамках онтогенического цикла – совокупности минералогических событий, включающей зарождение, рост и последующие изменения кристаллов [1]. В кристаллах алмаза им были выделены три онтогенические области: центральная, промежуточная и периферийная, которые обладают специфическими конституционными и анатомическими особенностями.

Для оценки соотношения в алмазах уральского типа промежуточной и периферийной онтогенических областей на одну диаграмму Тейлора были вынесены параметры, характеризующие содержание и формы находений азота в алмазах мантийных ксенолитов, и россыпей изученных нами регионов (рисунок 1).

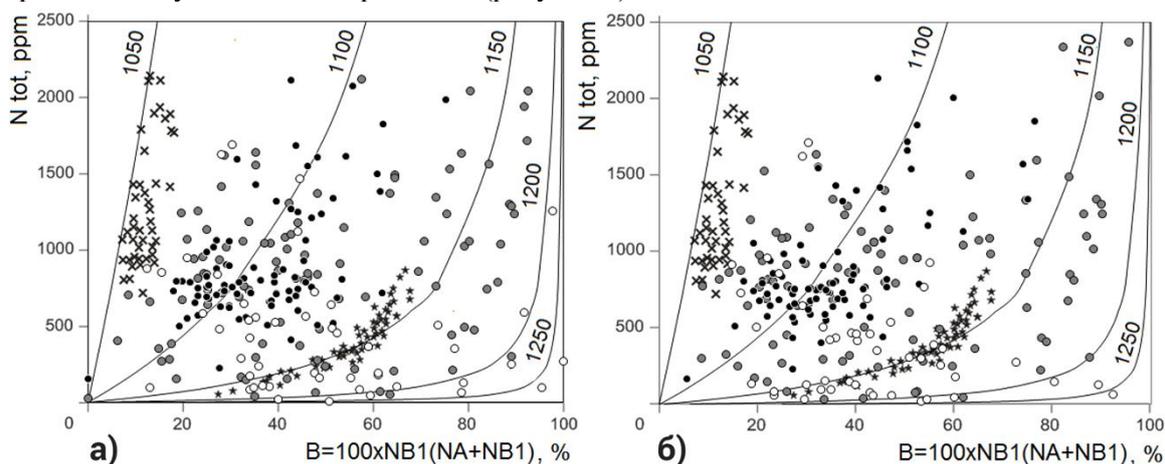


Рисунок 1 – Сопоставление параметров азотных дефектов в алмазах 1-й (★) и 2-й (×) генераций из мантийного эклогитового ксенолита (Степанов и др., 2007) и внутренних – (а) и внешних – (б) зон алмазов изученных россыпей: ● - Урала; ○ – Бразилии; ◐ - Анабаро-Оленекского междуречья

Из ее анализа становится очевидным, что принципиальным отличием всей совокупности кристаллов уральского типа является отсутствие в них кристаллов или отдельных зон, сложенных алмазом, соответствующим по параметрам азотных дефектов периферийной онтогенической области. Следовательно, этой области или не было вообще, или она была в существенной мере растворена на завершающей стадии онтогенеза. Сопоставление алмазов уральского типа с кристаллами из кимберлитовых тел, для которых периферийная зона характерна (рисунок 2), позволяет предположить, что эта зона в какой-то степени все же была проявлена в алмазах уральского типа, но на завершающем этапе их формирования была растворена. Процесс растворения этих алмазов отчетливо проявляется в их анатомии и морфологии [3].

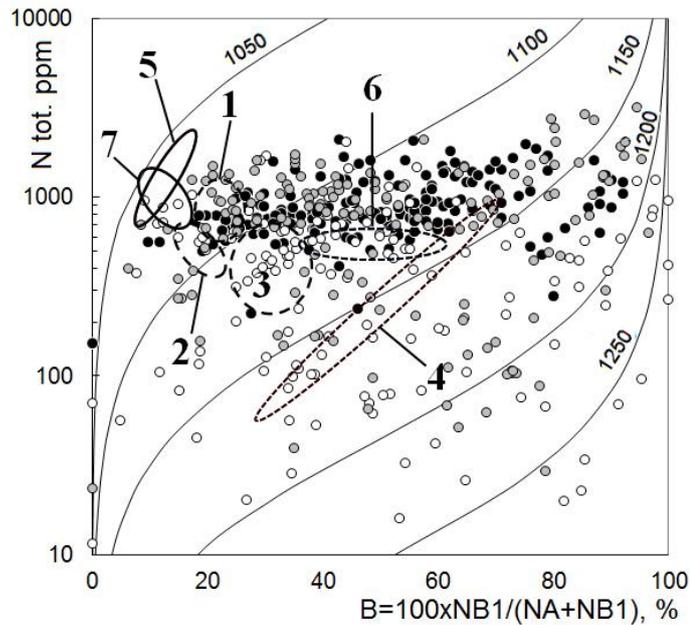


Рисунок 2 – Сопоставление параметров проявления азотных дефектов алмазов различных россыпных регионов: ● – Урал; ○ – Бразилия; ◐ – Анабаро-Оленекское междуречье и коренных источников: 1 – Архангельская провинция; 2 – Мало-Ботубинский район; 3 – Далдыно-Алакитский район [6]; 4 – алмазов первой генерации; 5 – алмазов второй генерации из эклогитового ксенолита [4]; 6 – алмазов первой генерации; 7 – алмазов второй генерации из эклогитового ксенолита [7]

Полученные результаты позволяют утверждать, что алмаз с низкой степенью агрегации азотных дефектов, слагающий кристаллы поздней генерации из эклогитовых мантийных ксенолитов и внешние зоны большей части кристаллов из месторождений кимберлит-лампроитового типа, отсутствует или слабо развит в кристаллах уральского типа.

#### Список литературы

1. Бескрованов В. В. Онтогенез алмаза. – Новосибирск : Изд-во Наука, 2000. – 264 с.
2. Милашев В. А. Морфотипы кристаллов и проблемы коренных источников алмаза в европейской части России // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. – 2003. – С. 235-237.
3. Ракин В. И. Морфология алмазов уральского типа. – Екатеринбург : Издво РИО УрО РАН, 2013. – 396 с.
4. Степанов А. С., Шацкий В. С., Зедгенизов Д. А., Соболев Н. В. Причины разнообразия морфологии и примесного состава алмазов из эклогита трубки Удачная // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – №9. – С. 974-988.
5. Васильев Е. А., Козлов А. В., Нефедов Ю. В., Петровский В. А. Сравнительный анализ алмазов Анабара, Бразилии и Урала методом инфракрасной спектроскопии // Записки Горного института. – 2013. – Т. 200 – С. 167-171
6. Kaminsky F. V., Khachatryan G. K. Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption data // Canad. Mineralogist. – 2001. – V. 39. – P. 1733-1745.
7. Spetsius Z. V., Kovalchuck O. E., Bogush I. N. Properties of diamonds in xenoliths from kimberlites of yakutia: implication to their origin and exploration // Materials of 10th International Kimberlite Conference. – Bangalore. – 2012. – P. 5.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ НА СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ ЛИСТЬЕВ БАЗИЛИКА

*С.А. РОМАНЕНКО, С.Б. ТУРАНОВ*

Томский политехнический университет

E-mail: sofia.romanenko98@gmail.com

Изучение оптических свойств листьев растений необходимо для понимания механизмов, происходящих в них при поглощении солнечной энергии. При выращивании в естественных условиях растения могут недополучать необходимое им фотосинтетически активное излучение. Как результат, это может привести к неравномерной культивации и снижению продуктивности процесса [1]. Таким образом, необходимо создать биологически эффективный искусственный источник света со специальным спектральным составом, благоприятствующим развитию растений в течение всего вегетационного периода. Из всех источников излучения, представленных на светотехническом рынке, наибольшими преимуществами обладают светодиодные источники. Они позволяют точно подобрать необходимые параметры излучения и создать источник света с практически любым спектральным составом в видимом диапазоне [2]. Кроме того, использовать светодиодные излучатели выгодно экономически [3].

Несмотря на активное развитие светодиодов, до сих пор не сформированы научно-технические основы проектирования световых приборов для растений на их основе. Связано это с отсутствием системы обратной связи с облучаемым растением, которая бы показывала, насколько эффективно действует свет на процессы вегетации. Фиксация и анализ изменения спектров отражения облучаемых растений – один из возможных способов реализации такой системы. Для этого нужно провести фундаментальные исследования. Целью работы является изучение влияния параметров облучателя на спектры отражения листьев растений.

**Методика исследования.** Объектом исследования стали 2 разновидности базилика: фиолетовый и зеленый. Данные образцы обладают схожими морфологическими характеристиками, но различаются размерами листьев и пигментным составом.

Эксперименты проводились на разработанной исследовательской установке (ИУ), представляющей собой климатическую камеру с возможностью управления и контроля параметров облучения. Экспериментальные образцы выращивались при одинаковых параметрах микроклимата ( $t = 23 \pm 2$  °С, влажность – 70%), но в разных условиях световой среды (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры облучательной установки в ячейках фитотронов

Параметр	Образец	
	ФТ №1	ФТ №2
PPFD (ФАР), мкмоль/с/м <sup>2</sup>	209,3	210,1

Режимы облучения подобраны таким образом, чтобы суммарный уровень плотности фотосинтетического фотонного потока в ячейках фитотрона был одинаковый (таблица 1), а спектральный состав отличался (рисунок 2).

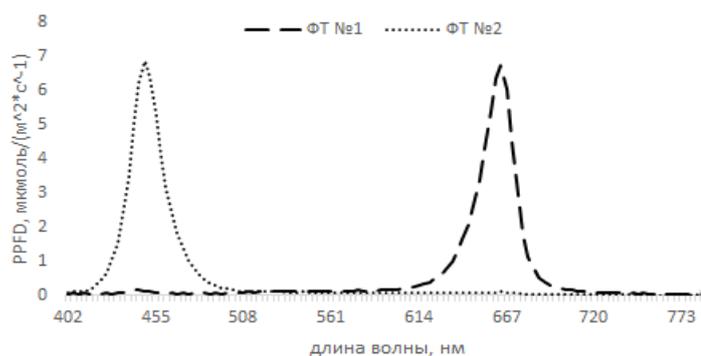


Рисунок 1 – Спектральная плотность облученности в ячейках фитотрона

**Результаты.** С помощью спектрофотометра Avaspec 2048L фиксировались спектры отражения листьев растений. Результаты измерений на 14 день эксперимента представлены на рисунке 2.

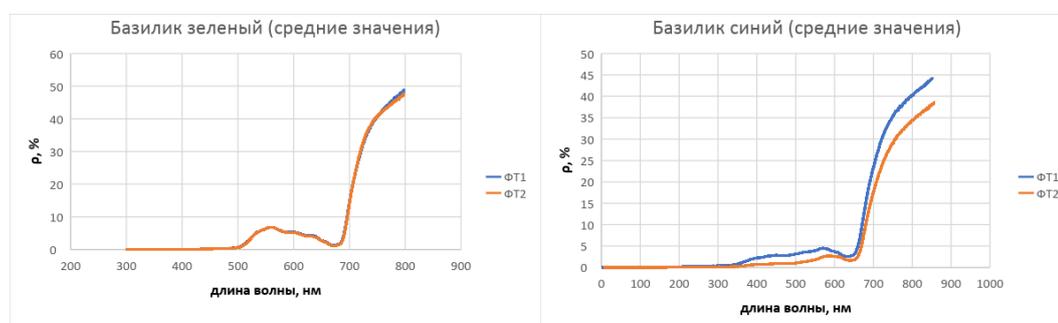


Рисунок 2 – Средние значения спектра отражения

Как видно из рисунков, средние значения спектров отражения для зеленого базилика практически не отличаются друг друга, таким образом параметры облучения не влияют на их изменения, но у синего базилика были обнаружены отличия и в форме спектра и коэффициентах отражения на разных длинах волн. Таким образом результаты эксперимента показывают, что возможно использовать динамику изменения спектров отражения для оценки состояния растения, но для получения объективных данных нужны дополнительные эксперименты.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России: государственное задание в сфере научной деятельности № 13.3647.2017/ПЧ.

### Список литературы

1. Michael J. Kasperbauer. Far-Red Light Reflection from Green Leaves and Effects on Phytochrome-Mediated Assimilate Partitioning under Field Conditions. *Plant Physiology*, 1987, 85(2), 350–354.
2. Бахарев И., Прокофьев А., Туркин А., Яковлев А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // *Современные технологии автоматизации*. — 2010. — № 2. — С. 76–82.
3. Кунгс Я.А., Угренинов И.А. Перспективы внедрения светодиодного освещения в теплицах // *Вестник КрасГАУ*. 2015. №3. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-vnedreniya-svetodiodnogo-osvescheniya-v-teplitsah>.

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА В АКТИВНОЙ СРЕДЕ НА ЛАЗЕРНУЮ ГЕНЕРАЦИЮ В РАСТВОРАХ РОДАМИНА 6Ж С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

*Р.В. РЯМБОВ, А.В. ТРИФОНОВА*

Томский государственный университет

E-mail: ryambovroman@mail.ru

Создание миниатюрных лазерных излучателей является многообещающим направлением развития в современной науке. Одним из таких лазеров является стохастический лазер с безрезонаторной лазерной генерацией. Активная среда для такого лазера, представляет собой композит, составленный из лазерно-активных молекул и наноструктур различных материалов.

Стохастические лазеры широко применимы в области медицинской диагностики, оптической диагностики, систем и устройств оптоэлектроники. А также стохастические лазеры имеют преимущества относительно других лазеров, а именно, более дешевое производство, относительно простые технологии производства, устойчивость к расстройке. Из литературы известно, что использование плазмонно - резонансных наночастиц на длине волны накачки, приводит к увеличению интенсивности вторичного излучения, за счет образования локальных полей высокой плотности мощности вблизи наночастиц.[1] За счет энергии локальных полей количество возбужденных молекул увеличивается, увеличивая при этом количество спонтанных фотонов, затем и фотонов вынужденного излучения, что должно способствовать началу генерации при меньших энергиях накачки. Однако из проделанных нами ранее экспериментов известно, что пороги генерации плазмонно резонансных и не плазмонно резонансных наночастиц приблизительно равны. Плазмонный резонанс приводит к тому, что электроны наночастиц колеблются и, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки передают им часть кинетической энергии, атомы решетки тоже колеблются, передавая энергию окружающей среде, то есть среда нагревается. В связи, с чем мы предполагаем, что увеличение энергии образованной за счет эффекта плазмонного резонанса уходит в нагрев среды. Для подтверждения выдвинутой гипотезы использовались наночастицы золота, обладающие плазмонным резонансом на используемой длине волны накачки и наночастицы серебра не обладающие данным эффектом.

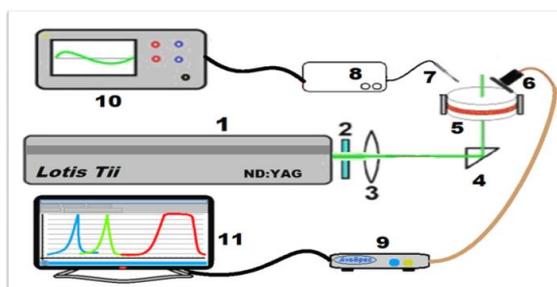


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки: 1 – лазер ( $\lambda = 532$  нм), 2 – фильтр СЗС-25 (для снижения фонового излучения с  $\lambda = 1064$  нм), 3 – фокусирующая линза, 4 – призма полного внутреннего отражения, 5 – кювета, 6 – входное окно приемной системы, 7 – микрофон, 8 – усилитель, 9 – спектрометр, 10 – осциллограф, 11 - ПК

Серия экспериментов была произведена на установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Спиртовые растворы с наночастицами золота и серебра смешивались с раствором красителя Р6Ж с концентрацией  $10^{-3}$  моль/л. Было исследовано пять концентраций наночастиц в смеси красителя и раствора с наночастицами.

На рисунке 2 представлены график зависимости порогов генерации от концентрации наночастиц.

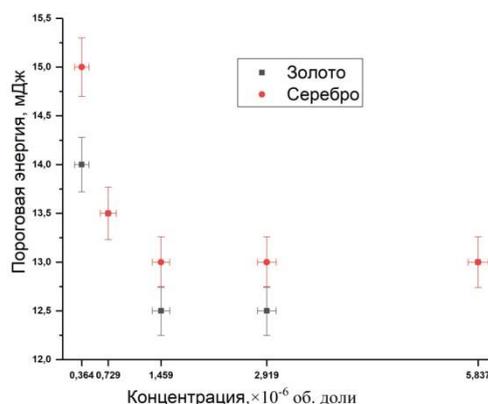


Рисунок 2 - Зависимости пороговой энергии генерации от концентрации наночастиц золота и серебра

Как можно видеть из полученных кривых, пороги генерации для растворов с золотыми и серебряными наночастицами приблизительно совпадают. Несмотря на то, что наночастицы золота обладают плазмонным резонансом на длине волны накачки. Исходя из этого, мы выдвигаем гипотезу, что усиление энергии, полученное за счет эффекта плазмонного резонанса, затрачивается на нагрев наночастиц.

В качестве подтверждения выдвинутой гипотезы на рисунке 3 представлена зависимость амплитуды звукового сигнала от энергии накачки для концентрации 2,919 объемной доли.

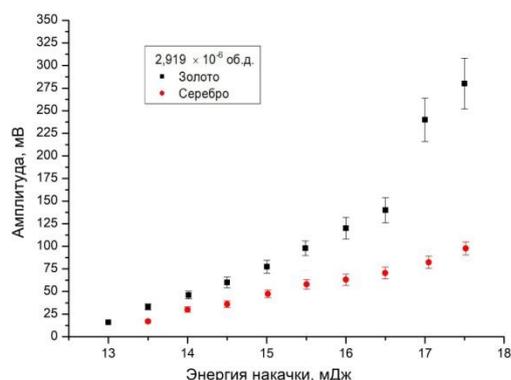


Рисунок 3 - Зависимости амплитуды звуковых сигналов от энергии накачки наночастиц золота и серебра для концентрации 2,919 объемной доли

Из представленной зависимости видно, что значения амплитуд для растворов с плазмонно – резонансными наночастицами золота превосходят значения амплитуд для растворов с наночастицами серебра. Это говорит о том, что наночастицы золота нагреваются сильнее, нагревая при этом раствор. Тем самым подтверждая нашу гипотезу, что энергия, полученная за счет эффекта плазмонного – резонанса не способствует понижению порогов генерации, а уходит в нагрев среды.

#### Список литературы

1. Маркушев В.М., Золин В.Ф., Брискина Ч.М. Порошковый лазер // Журнал полупроводниковых систем – 1986. – Т.45. – С.847-850

## АНАЛИЗ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НАБЕРЕЖНОЙ Г. ТОМСКА

*И.Ю.СУЛТАНОВА, К.П. ТОЛКАЧЕВА*  
Томский политехнический университет  
E-mail: tk@tpu.ru

Каждый город имеет свою уникальную историю, и чтобы узнать об истории и привлекательности города помогают туристические компании. Правильно спланированные экскурсии позволяют привлечь больше туристов и увеличить экономический бюджет города на поддержание объектов истории. Зачастую, экскурсии проходят в дневное время и для увеличения потока туристов, а также разнообразия города для жителей, необходимым является создание его вечернего облика.

В качестве объекта исследования выбрана территория томской набережной. Главные достопримечательности и памятные места километровой набережной присутствуют во всех туристических буклетах местных экскурсионных компаний.

За последние годы в научных работах выявлено комплексное воздействие света на организм человека, которое включает, помимо визуального, также биологическое и психологическое воздействие. Сегодня это необходимо учитывать при составлении концепции освещения.

Система освещения территорий служит для поддержания оптимального уровня освещенности объектов в темное время суток, и эстетической гармонии всей территории в целом.

Для освещения разных зон требуются различные виды светильников. Существующая на данный момент концепция освещения набережной представлена, в основном, двумя типами световых приборов (рис.1):

- 1) пушкинские фонари;
- 2) шары из опалового стекла.



Рисунок 3 – Световые приборы, установленные на набережной г. Томска

В ходе работы были произведены измерения освещенности на определенных участках набережной. Результаты измерений представлены в виде графиков (рис.2).

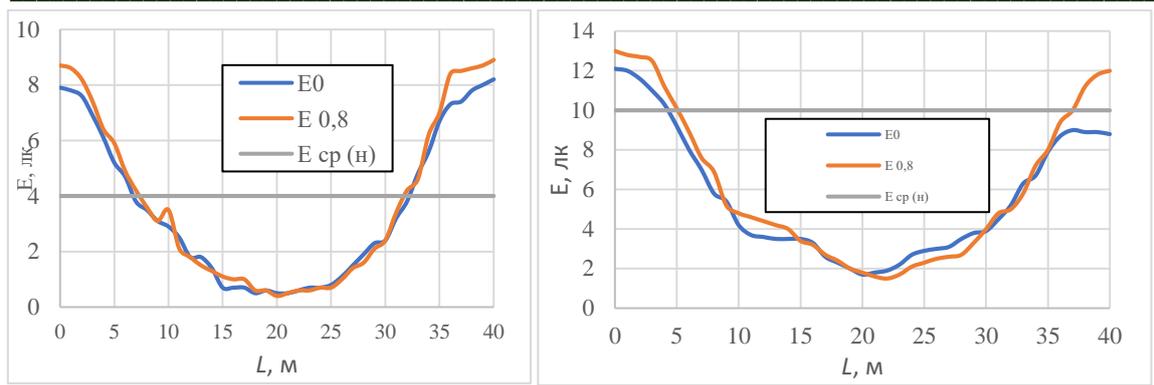


Рисунок 2 – Результаты измеренной освещённости: а) уровень освещенности на пешеходной дорожке, б) уровень освещенности на дороге (класс дороги В2)

На рисунке 2 (а) представлено распределение освещенности на пешеходной дорожке. Для тротуаров, нормируемый уровень освещенности должен соответствовать значению не менее 4 лк. Непосредственно рядом со световыми приборами, уровень освещенности практически в 2 раза превышает нормируемое значение. Однако, по мере отдаления от опоры уровень освещенности снижается. На расстоянии 7 м от опор, нормы все еще выполняются. Самый низкий уровень освещенности отмечен на участке, максимально удаленном от опор (т.е. на отметке 20 м). Уровень освещенности в этой точке в 8 раз ниже нормируемого, и составляет всего 0,5 лк.

На рисунке 2 (б) приведен график освещенности дороги вдоль реки Томи. Для дорог минимальной значимости, нормируемое значение освещенности составляет 10 лк. На рисунке видно, что данное требование выполняется только на пятиметровом участке дороги от осветительной опоры. В центре, между опорами, минимальный уровень освещенности составляет всего 1,8 лк.

## ВЛИЯНИЕ ФАР ОБЛУЧЕННОСТИ НА ПРИРОСТ МИКРОВОДОРОСЛИ ХЛОРЕЛЛА

*О.А. ТРОФИМЧУК, С.Б. ТУРАНОВ, П.В. ПЕТИКАРЬ, С.А. РОМАНЕНКО*

Гомский политехнический университет

Научный руководитель: Яковлев А.Н., к. ф. – м. н., доцент.

E-mail: oat1@tpu.ru

За последнее десятилетие наравне с премиксами, витаминами, биодобавками кормовой рацион сельскохозяйственных животных пополнился водорослями. К ним относится и хлорелла – представитель зеленых микроскопических водорослей [1]. Она является активным продуцентом биомассы и содержит полноценные белки, жиры, углеводы и витамины; входит в категорию «суперпродуктов» [2].

Скорость деления клеток, определяющая выживание популяции микроводорослей, зависит в первую очередь от доступности источников энергии и питательных веществ. Для микроводорослей, как и для всех фототрофов, важнейшим источником энергии является свет, при этом большое значение имеют такие его свойства, как интенсивность и спектральный состав [3].

Длительность эксперимента – 54 часа; в течение всего эксперимента температура держалась в оптимальном диапазоне  $36,5 - 37,5$  °С; начальная оптическая плотность трех образцов: от 0,16 до 0,19 отн. ед.

1 образец: Лампа светодиодная; Установленная мощность – 4 Вт; ФАР облучённость (400..700) нм: PPFД(ФАР) =  $48,6 \mu\text{mol/s/m}^2$

2 образец: Лампа светодиодная; Установленная мощность – 10,5 Вт; ФАР облучённость (400..700) нм: PPFД(ФАР) =  $227,4 \mu\text{mol/s/m}^2$

3 образец: Лампа светодиодная; Установленная мощность – 15 Вт; ФАР облучённость (400..700) нм: PPFД(ФАР) =  $321 \mu\text{mol/s/m}^2$

При проведении эксперимента была поставлена цель - определить влияние ФАР облученности источников излучения на прирост концентрации хлореллы, за счет анализа зависимости повышения концентрации от времени.

В течение всего эксперимента проводилось измерение спектра оптической плотности на спектрофотометре СФ-256 УВИ, с интервалом в три часа три раза в сутки.

Затем по данным таблиц получают зависимость оптической плотности от времени (рис. 1).

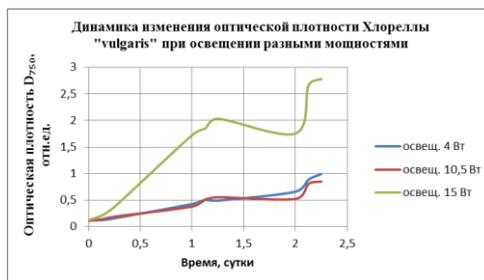


Рисунок 1 – График зависимости оптической плотности на длине волны 750 нм  $D_{750}$  от времени  $t$  для трех источников излучения разной мощности (кувета №1 – 4Вт, кувета №2 – 10,5Вт, кувета №3 – 15Вт)

Снижение оптической плотности в период времени 1,5 – 2 суток объясняется тем, что лампы горели непрерывно, отсутствовал стресс – фактор и некоторая часть клеток отмирала и выпадала в осадок. В дневное время при взятии проб лампы и аэратор отключаются на короткое время, за счет этого возникает стресс – фактор, благодаря которому хлорелла непрерывно растет. Для построения зависимости оптической плотности от длины волны обработка результатов не требуется (рис. 2).



Рисунок 2 – График зависимости оптической плотности  $D$  от длины волны  $\lambda$  трех источников излучения при 54 часах роста (кювета №1 – 4Вт, кювета №2 – 10,5Вт, кювета №3 – 15Вт)

Для выявления зависимости роста концентрации клеток от времени применяется подсчет клеток микроводоросли в камере Горяева. Расчет производится по формуле

$$n = N_{б.кв.} \cdot 2,5 \cdot 10^6, \text{ где}$$

$n$  – количество клеток на мл;

$N_{б.кв.}$  – количество клеток в большом квадрате камеры Горяева.

#### Зависимость роста концентрации клеток $N$ от времени $t$

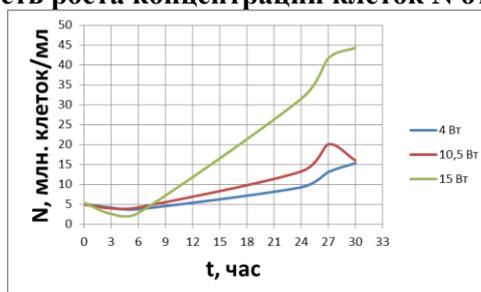


Рисунок 4 – График зависимости концентрации клеток  $N$  от времени  $t$  трех источников излучения при 30 часах роста (кювета №1 – 4Вт, кювета №2 – 10,5Вт, кювета №3 – 15Вт)

Из представленных на рисунках графиков видно, что при облучении суспензии светодиодной лампой с мощностью 15 Вт прирост оптической плотности и концентрации микроводоросли наблюдается максимальный в сравнении с лампами меньшей мощности. Это связано с фотосинтезом микроводоросли – чем идеальнее условия для роста, тем, соответственно, быстрее рост и размножение клеток хлореллы. Из этого следует, что наравне с температурой, питательной средой и подачей  $\text{CO}_2$ , оптимальная освещенность также играет важную роль. При недостаточной освещенности фотосинтез клеток замедляется, что показано на графиках при измерении кювет 1 и 2.

#### Список литературы:

1. Суспензия хлореллы в рационе сельскохозяйственных животных / Н.И. Богданов. – Пенза, 2-е изд. Перераб. и доп., 2007. – 48 с.
2. Культивирование микроводорослей в фотобиореакторе – [электронный ресурс] – Режим доступа. - URL: <http://biofuellab.ru/micro/fito.php> – 27.02.15
3. Р.К. Пузанский, Е.Р. Тараховская, Ю.И. Маслов, М.Ф. Шишова. Влияние экзогенных органических веществ и освещенности на рост микроводорослей // Физиология и биохимия растений. Вестник Санкт – Петербургского университета. – 2011. – Вып. 2, серия 3.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ИАГ ЛЮМИНОФОРА

А.Т. ТУЛЕГЕНОВА

Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: tulegenova.aida@gmail.com

Люминофоры на основе ИАГ являются многокомпонентными, сложные по составу: состоящие по крайней мере из трех элементов при стехиометрическом составе. Синтез порошков микрокристаллов проводятся при высоких температурах, выше 1500 С. Синтез при высоких температурах многокомпонентных систем обычно приводит к нестехиометричности состава полученных кристаллов, и образованию различных видов дефектов решетки, в том числе антидефектов.

В настоящей работе приведена модель энергетической структуры ИАГ люминофора.

Ширина запрещенной зоны ИАГ кристалла равна  $\sim 6,4$  эВ [1]. Следовательно, в широком диапазоне от 4 до 6 эВ оптическое возбуждение приводит к созданию электронных возбуждений, которые передают одинаковым образом энергию центрам свечения. На рисунке 1 приведены спектры возбуждения и поглощения ИАГ люминофора. Показатель поглощения излучения люминофорами в области 4 - 6 эВ в хорошо люминесцирующих монокристаллах и керамике ИАГ:Се превышает  $10^2 \text{ см}^{-1}$ . Столь высокие значения показателя поглощения в широкой области спектра свидетельствуют о существовании большого количества центров поглощения, то есть существовании дополнительной структурной фазы. Такой фазой, вероятно, является совокупность нанодфектов [2]. Тогда энергетическую структуру ИАГ:Се микрокристалла можно представить себе как встроенную энергетическую матричную зонную структуру, зонную структуру нанодфекта с центрами свечения в нем [3]. В широкой области спектра 4-6 эВ люминесценция возбуждается без создания собственных электронных возбуждений. Предполагается, что поглощение и возбуждение люминесценции в области от 4-6 эВ обусловлено инициированием межзонных переходов в нанодфекте.

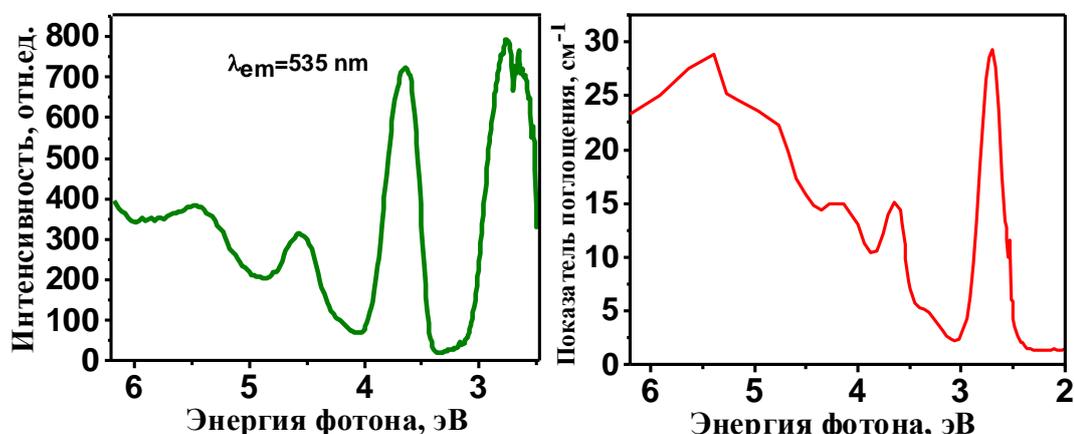


Рисунок 1 – Спектры возбуждения и поглощения ИАГ люминофора

Энергетическая структура кристалла ИАГ с нанодфектами может быть представлена как вложенную в матричную структуру фазу нанодфектов (рисунок 2). Нанодфекты представляет как совокупность, набор всех видов дефекта, то есть в своем составе имеют все химические элементы: Y, Al, O, активатор – Се, другие примеси, а также собственные дефекты: антидефекты, вакансии и междоузлия для компенсации зарядовых и размерных различий. К вводимым собственным дефектам нужно отнести не только вакансии и ионы в междоузлиях, но и все варианты антидефектов. Совокупность нанодфектов представляет собою отдельную новую фазу, которая имеет свою энергетическую и пространственную структуру. Очевидно, что состав нанодфектов в сильной степени зависит от

технологических режимов при синтезе люминофора. Поэтому и энергетическая структура зон нанодфектной фазы может отличаться от люминофора к люминофору.

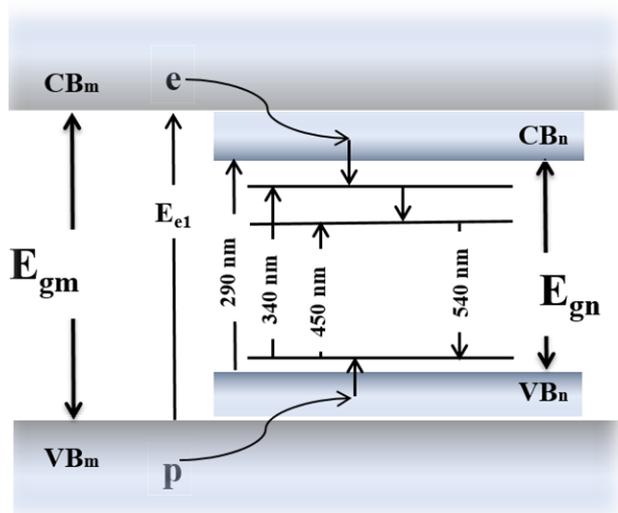


Рисунок 2 – Спектры возбуждения и поглощения ИАГ люминофора

На рисунке 2  $E_{gm}$  и  $E_{gn}$  зона запрещенных переходов в матрице и нанодфекте.  $E_{e1,2..n}$   $E_{l1,2..n}$  -возможные поглотательные и излучательные электронные переходы. Центр свечения является элементом нанодфекта, поэтому энергетические уровни центра свечения расположены в нанодфекте. Нанодфект является эффективной ловушкой для электрона и дырки. Оптическое возбуждение люминофоров в области полос на 340 и 460 нм ( $E_{e3}$ ,  $E_{e4}$ ) приводит к прямому возбуждению центров свечения, которое завершается излучением  $E_{l1}$  в области 540 нм.

#### Список литературы

1. Tomiki T., Akamine H., Gushiken M., Kinjon Y., Miyazato M. [et al.].  $Ce^{3+}$  Centres in  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG) Single Crystals // Journal of the Physical Society of Japan. -1991.-V. 60.-P.2437-2445
2. Lisitsyna L.A., Lisitsyn V.M. Composition Nanodeflects in Doped Lithium Fluoride Crystals // Physics of the Solid State. – 2013.-V.55. - № 11.-P. 2297–2303
3. Тулегенова А.Т., Лисицын В.М., Абдуллин Х.А., Степанов С.А., Гусейнов Н.Р. Нанодфекты в микрокристаллах люминофоров на основе ИАГ: XVI международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике. -Село Аршан, Республика Бурятия, Россия, 2–7 июля, 2018 г.

**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА МОРФОГЕНЕЗ  
ПРОРОСТКОВ ОРХИДНЫХ В КУЛЬТУРЕ IN VITRO**

*Л.В. ХОЦКОВА<sup>1</sup>, Т.П. АСТАФУРОВА<sup>1</sup>, М.С. ЯМБУРОВ<sup>1</sup>, С.Б. ТУРАНОВ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Lenin Avenue 36, 634050, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue 30, 634050, Tomsk, Russia

E-mail: tyrsb@yandex.ru

В условиях светокультуры рост и развитие растений в значительной степени лимитируется спектральными и энергетическими характеристиками искусственных источников освещения, которые не имеют оптимальных соотношений спектральных диапазонов и требуют постоянного совершенствования. Представители семейства орхидных являются важными хозяйственно-ценными растениями, занимающими лидерские позиции цветочной промышленности, широко используются как срезочная и горшечная культура [3,5]. Однако многочисленные представители орхидных характеризуются медленным циклом развития, вступая в генеративную фазу лишь на 7-10 год жизни, что затрудняет их размножение и выращивание традиционными методами, поэтому возникает необходимость регулирования их роста и развития. Методы ускоренного размножения орхидей в культуре in vitro с использованием искусственных источников освещения позволяют преодолеть эти трудности.

Целью нашего исследования являлось выявление особенностей роста и развития проростков орхидей в культуре in vitro на начальных этапах онтогенеза в зависимости от света разного спектрального состава.

В работе использовали гибридные проростки субтропической орхидеи F1 *Cymbidium hybridum* репродукции Сибирского ботанического сада Национального исследовательского Томского государственного университета (СибБС НИ ТГУ) [4]. Источником света в данном эксперименте служили белые и «цветные» люминесцентные лампы (Philips, 30 W). Было испытано четыре световых режима: контроль – белый свет «БС» и три опытных варианта – белый свет с добавлением красного «БС+КС», синего «БС+СС» или зеленого света «БС+ЗС». Интенсивность света люминесцентных ламп во всех вариантах на уровне культуры протокормов была выровнена и составила 9,7 Вт/м<sup>2</sup>, плотность потока квантов для всех ламп равнялась 30 μмоль/м<sup>2</sup>с. Культуры содержались при температуре 23±2оС и относительной влажности 65%, 16-часовом фотопериоде.

Известно, что большое значение для роста и развития растений в условиях in vitro имеет интенсивность и спектральный состав света [6-9]. При выращивании проростков *C. hybridum* F1 на типовой питательной среде Мурасиге-Скуга морфометрические показатели корня, листа и сырая масса проростка возрастали с увеличением длины волны света, в то время как длина стебля была больше на белом свете, смешанным с зеленым светом, а белый свет с добавлением синего приводил к уменьшению длины стебля. Полученные результаты исследования подтверждают закономерность, что усиление доли длинноволнового участка спектра в смешанном светопотоке увеличивает линейные размеры и площадь ассимилирующей поверхности растений, которая была выявлена и другими исследователями на разных видах растений [1,2].

This research was supported by “The Tomsk State University competitiveness improvement programme” grant (№ 8.1.29.2018).

**Список литературы:**

1. Астафурова Т., Лукаш В., Гончаров А., Юрченко В. Фитотрон для светодиодной досветки растений в теплицах и на дому // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 36–38.
2. Головацкая И.Ф., Дорофеев В.Ю., Медведева Ю.В., Никифоров П.Е., Карначук Р.А. Оптимизация условий освещения при культивировании микроклонов *Solanum tuberosum* L. сорта Луговской in vitro // Вестник ТГУ. Биология. 2013. №4 (24). С. 133–144.

3. Коломейцева Г.Л. Крупноцветковые орхидеи в коллекции Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина РАН (Cattleya, Cymbidium, Dendrobium, Paphiopedilum, Phalaenopsis). М.: ГЕОС, 2014. 296 с.
4. Степанюк Г.Я., Хоцкова Л.В. Итоги интродукции некоторых тропических и субтропических орхидей в Сибирском ботаническом саду // Первые международные Беккеровские чтения. Волгоград: Изд-во ТриАС, 2010. Часть 1. С. 199–201.
5. De Lakshman, Pathak, P., Rao, A.N., Rajeevan, P.K. Commercial orchids. Walter de Gruyter GmbH, India. 2015. P. 1-301.
6. Hamada, K., Shimasaki, K., Nishimura, Y., Oyama-Egawa, H., Yoshida, K. Effects of red, blue and yellow fluorescent films on proliferation and organogenesis in Cymbidium and Phalaenopsis PLB in vitro (Conference Paper) // Acta Horticulturae. 2011. P. 381–384.
7. Kong Sik Shin et al. The effect of light quality on the growth and development of in vitro cultured Dendrobium plants // Acta Physiologiae Plantarum. 2008. V. 30. P. 339–343.
8. Mengxi, L., Zhigang, X., Yang, Y., Yijie, F. Effects of different spectral lights on Oncidium PLBs induction, proliferation, and plant regeneration // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2011. V. 106, Is. 1. P. 1–10.
9. Rodrigues S., Joyce, D., Pasqual, M., Rodrigues, F., and de Araujo, A. G. Etiolation and artificial light in native and hybrid orchids under in vitro cultivation // Ciencia Rural. 2010. V. 40. P. 1941–1947.

## ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИАГ ЛЮМИНОФОРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАГРЕВЕ

ЦЗЮЙ ЯНЯН

Томский политехнический университет

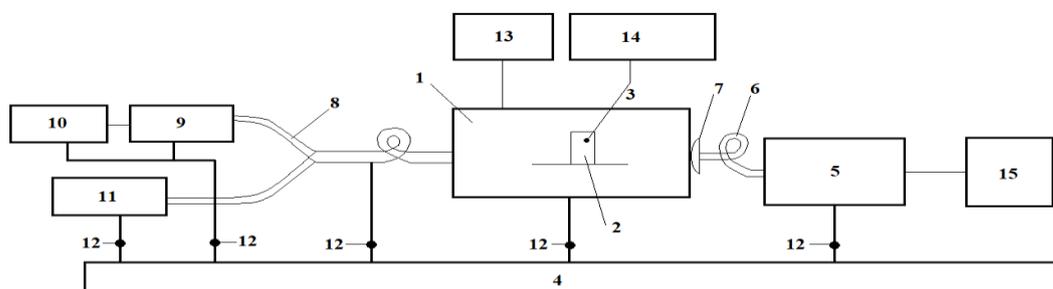
E-mail: czyuy@tpu.ru

Белые светодиоды стали основными источниками света в общем освещении. Белый свет в них получается путем преобразования основной части синего излучения в люминесценцию длинноволновой области спектра. Одна из основных проблем белых светодиодов – снижение их потока света при нагревании. Источниками тепла в светодиоде являются собственно чип, и люминофор. В чипе основная часть подводимой электрической энергии преобразуется в синее излучение, часть выделяется в виде тепла. Нашими предыдущими исследованиями показано, что при преобразовании не менее 25%...30% излучения чипа расходуется на нагревание люминофора. [1,2] Поэтому важно знать величину нагрева люминофора за счет этих двух факторов.

Обычно для измерения температуры люминофора светодиода в рабочем режиме использовались тепловизоры или термопары. Использование тепловизоров затруднено тем, что для измерений требуется знание излучательной способности люминофора, композита на его основе. Измерения термопарой затрудняется тем, что требуется время для достижения теплового равновесия детектором и тестируемым образцом. Оба метода способны определять интегральную температуру люминофорного порошка или композита с порошком. А знать нужно величину нагрева отдельной частицы, микрокристалла люминофора. Для прямой оценки величины нагрева люминофора может быть использован эффект тушения люминесценции с ростом температуры люминофора.

В настоящей работе приведены результаты исследования температурной зависимости тушения люминесценции серии промышленных люминофоров на основе ИАГ:Се (иттрий – алюминиевый гранат, активированный церием).

Методика измерения представляется собой таким образом, Люминофор в кювете размещался в печи с регулируемой температурой нагрева в диапазоне температур от 30 до 200 °С. Температура контролировалась термопарой, размещенной в кювете. Возбуждение люминофора осуществлялось излучением чипа с  $\lambda = 455$  нм и излучением лазера с  $\lambda = 337$  нм, которые через оптическую систему и кварцевый световод направлялись на кювету с люминофором. Люминесценция измерялась через определенные промежутки времени через собирающую линзу, световод и спектрофотометр Avantes 3648. Информация обрабатывалась компьютером. Схема стенда для измерения кинетики затухания люминесценции приведена на рисунке 1.



- 1 – Печь, 2 – Кювета для люминофора, 3 – Термопара, 4 – Оптический рельс,  
5 – Спектрофотометр, 6 – Световод, 7 – Линза, 8 – Световод с делителем,  
9 – Телескопическая система, 10 – Чип, 11 – Лазер, 12 – Стойки крепления (рейтеры), 13 – Система питания, 14 – Мультиметр, 15 – Ноутбук

Рисунок 1– Схема стенда

Для данного исследования были выбраны ИАГ люминофоры серии СДЛ 2700, СДЛ 4000 и СДЛ3500 синтерированных в НПО" Социным Н.П. и др. В процессе синтеза добавляли определенное количество флюса, такого как ВаF2. Поверхностный состав и микроструктура образцов анализировали с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) ESCALAB 250. Элементный состав представляется в таблице 1. Зависимость интенсивности люминесценции от температуры была измерена с помощью управляемого нагрева сопротивления и термопары с использованием источника возбуждения синего светодиода с  $\lambda_{em} = 455$  нм. Чтобы обеспечить точность тестируемой температуры, люминофоры были встроены как можно ближе к наконечнику зонда термопары. Температура нагрева устанавливается в диапазоне от комнатной температуры до более 200 °С.

Таблица 1- Элементный состав

Люминофоры	Y	Al	O	Ce	Gd
СДЛ 2700	9.55	5.06	53.22	11.21	20.98
СДЛ 3500	25.13	4.54	49.00	17.24	4.09
СДЛ 4000	16.6	25.83	57.57		

Видно, что состав люминофоров почти одинаковы, но отличаются люминофоры количественным соотношением. И следует отметить, что концентрация Gd в люминофоре сдл2700 значительно больше, чем в остальных люминофорах сдл3500 и сдл4000.

Результаты кинетика затухания люминесценции исследуемых люминофорах представлены на рисунке 2.

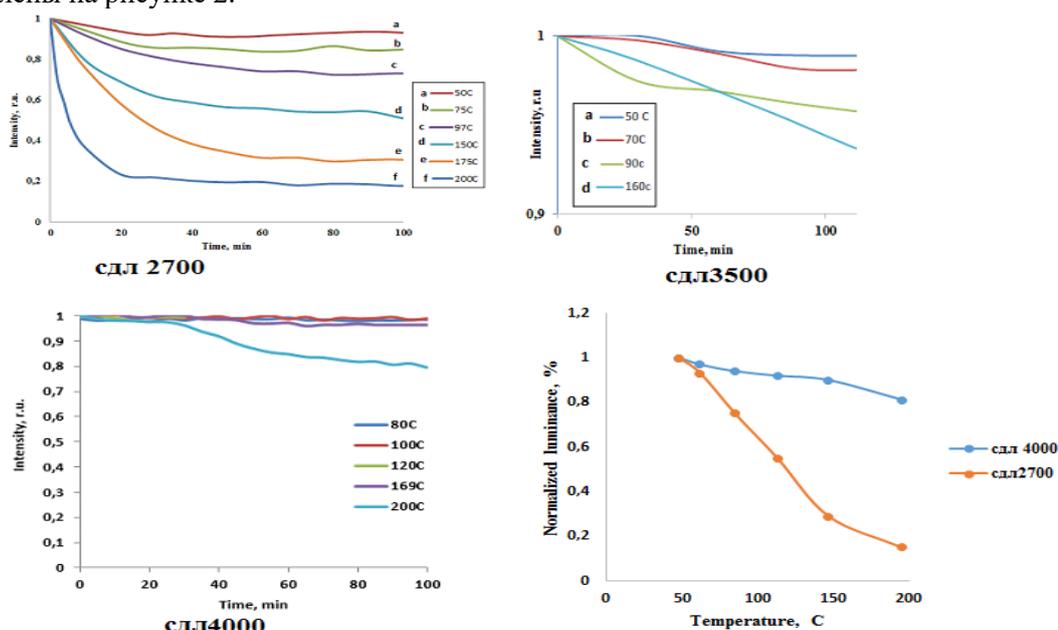


Рисунок 2 – Кинетика затухания люминесценции люминофора СДЛ2700, СДЛ3500, СДЛ4000 при указанных температурах

### Список литературы

1. V.M. Lisitsyn, V.S Lukash , S.A Stepanov, Ju Yangyang. White LEDs with Limit Luminous Efficacy. AIP Conf. Proc. -2016- 1698, 060008-1–060008- 5; 2016 AIP Publishing LLC 978-0- 7354-1345;
2. Yangyang Ju, V.M. Lisitsyn, V.S. Lukash. Losses of Energy in Phosphor of LED at Transformation of Emission Spectrum. 2017 Asia-Pacific Engineering and Technology Conference (APETC 2017) ISBN: 978-1-60595-443-1.

## УСКОРЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА МИКРОЧАСТИЦЫ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ

С.А. ШВЕДОВ, А.А. КАЧАЕВ, В.И. ИВАНОВ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

E-mail: stud-eni@yandex.ru

Светоиндуцированные силы могут использоваться для ускорения микрочастиц до значительных скоростей [1]. Однако систематические исследования скоростных характеристик микрочастиц при оптическом управлении и транспортировке очень малочисленны [2]. Простейшим способом оптического управления микрочастицей является использование гауссова пучка света. При этом кинематические характеристики движения и параметры траектории будут зависеть от параметров лазерного пучка.

Целью данной работы является анализ зависимости кинематических характеристик микрочастицы, движущейся за счет сил светового давления в гауссовом пучке.

Для гауссова пучка имеем следующее распределение интенсивности [3]:

$$I(r, z) = I_0 \exp(-r^2 / r_0^2) \left(1 + (\lambda z / \pi r_0^2)^2\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность гауссова лазерного пучка в перетяжке,  $\lambda$  – длина волны,  $z$  – расстояние от плоскости перетяжки вдоль оси пучка,  $r_0$  – радиус пучка в перетяжке.

Сила светового давления на прозрачную микрочастицу:

$$F_{LP} = 2\pi I_0 a_0^2 q c^{-1} \left(1 + (\lambda z / \pi r_0^2)^2\right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $a_0$  – радиус частицы,  $\rho$  – плотность вещества микрочастицы,  $q$  – безразмерный оптический фактор, определяемый оптическими параметрами микрочастицы [3].

Полученная сила определяет зависимость ускорения микрочастицы от координаты. Используя (1-2), получаем выражение для скорости микрочастицы:

$$v = \{3\pi I_0 r_0^2 (a_0 \rho q c \lambda)^{-1} \ln[\lambda z / \pi r_0^2 + (1 + (\lambda z / \pi r_0^2)^2)^{1/2}]\}^{1/2}. \quad (3)$$

Полученная зависимость (3) показывает, что основной разгонный участок определяется конфокальным параметром гауссова пучка.

В вязкой среде величина светоиндуцированной скорости ограничена возникающей при движении силой трения.

Приравнивая данную силу светового давления к силе сопротивления, определяемой законом Стокса, получим выражение для скорости микрочастицы:

$$v = \pi I_0 r_0^2 a_0 q (3\mu c \lambda z)^{-1}. \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости среды.

Интегрируя (4), получаем зависимость координаты от времени:

$$z = [2\pi I_0 r_0^2 a_0 q (3\mu c \lambda)^{-1} t]^{0.5}. \quad (5)$$

Полученные зависимости показывают, что значительные ускорения микрочастицы и транспортировка на достаточно большие расстояния достижимы при использовании маломощных непрерывных лазерных источников. Таким образом, световое давление является эффективным механизмом ускорения микрочастиц, а также их транспортировки.

**Список литературы**

1. Эшкин А. Давление лазерного излучения // УФН. – 1973. - т. 110. - С. 101.
2. Иванов В.И., Кузин А.А., Окишев К.Н. Оптическая левитация наночастиц: монография. - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. - 2008. - 105 с.
3. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. –М.: Изд-во Московского университета. - 1998. - 656 с.

**YAG:Ce,BaF<sub>2</sub> КЕРАМИКА КОНСОЛИДИРОВАННАЯ  
МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО СТАТИЧЕСКОГО ОДНООСНОГО ПРЕССОВАНИЯ**

*А.М. ШРАЙБЕР, П.Д. ЖВАКИНА*

Томский политехнический университет

Инженерная школа новых производственных технологий

E-mail:ams27@tpu.ru

Неорганические люминофоры, применяемые большинством производителей, являются модифицированными вариантами иттрий-алюминиевого граната, активированного трехвалентным церием (YAG: Ce<sup>3+</sup>) [1, 2]. Эффективность белого светодиода (СД), количественная и качественная, в значительной степени зависят от геометрии размещения слоя люминофора. В случае использования люминофоров на органической основе, проблем формования и повышенного нагрева не возникает, однако данные люминофоры не слишком долговечны и плохо переносят высокие плотности возбуждения, чтобы использоваться в мощных промышленных и бытовых осветительных установках. С другой стороны, в технологиях на основе неорганических люминофоров изготавливают композит (полимерный композит, состоящий из готового люминофора, органической основы и стабилизирующих добавок), который затем наносят на поверхность кристалла. Такой подход существенно усложняет и удорожает процесс получения излучающего прибора. Кроме того, наличие органических ингредиентов приводит к снижению светоотдачи, а высокие температуры, необходимые для полимеризации негативно сказываются на светотехнических характеристиках светодиода [3]. Стоит не забывать - неорганические люминофоры значительно нагреваются при работе (не менее 25 % от потока возбуждения преобразуется в тепло), что ведет к деградации полимера (вплоть до его разрушения) и, следовательно, в лучшем случае к спаду люминесценции, в худшем к выходу из строя.

Одним из последних направлений в области технологии преобразования излучения при изготовлении белых СД является использование люминесцирующей керамики. Используя в качестве преобразователя излучения люминесцентную керамику можно достаточно точно ранжировать светодиоды по цветовой температуре. Это возможно благодаря гораздо более точному дозированию количества люминофора. Другое преимущество керамических материалов заключается в том, что это позволит получать светодиоды с высокой однородностью цвета и повышенной временной стабильностью.

Очевидно, процессы в керамических материалах при радиационном воздействии отличаются от протекающих в хорошо изученных кристаллических материалах. В связи с этим растет интерес к исследованиям электронных процессов передачи энергии возбуждения (оптического и радиационного) активным центрам в таких материалах [4-7]. Целью данной работы является исследование спектрально-кинетических характеристик YAG:Ce,BaF<sub>2</sub> керамик изготовленных на основе синтезированных люминофоров.

Люминофор был синтезирован методом высокотемпературного твердофазного синтеза в восстановительной атмосфере. Данный метод требует повторных циклов нагревания при высокой температуре до 1600 °С для усиления взаимной диффузии и достижения однородного однофазного сплава. Все реагенты были химически чистыми Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99,99%), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99,99%), CeO<sub>2</sub> (99,99%). Более подробно процедура, используемая для синтеза описана в [8]. Для изготовления образцов светопропускающей керамики был использован синтезированный люминофор.

Формование порошка осуществляли методом холодного статического одноосного прессования в стальных пресс-формах на автоматическом прессе ИП-500 АВТО (ЗИПО, Россия). В результате был получен керамический образец цилиндрической формы, высотой 1,1 мм, диаметром 11,5 мм, пропускающий свет. Механическая обработка поверхности образца проводилась при помощи шлифовально-полировальной системы EcoMet 300 Pro (Buehler, Германия) с применением алмазных суспензий MetaDi (Buehler, Германия).

Регистрация интегральных спектров свечения осуществлялась оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648 (спектральный диапазон 200-1100 нм). Для возбуждения люминесценции использовался СД ( $\lambda_{\text{возб}} = 447$  нм, FWHM - 20 нм, поток 16 мВт/см<sup>2</sup>). Время интегрирования составляло 1 секунду. Также были измерены кинетические характеристики затухания люминесценции люминофора и керамики при возбуждении излучением чипа с  $\lambda_{\text{возб}} = 452$  нм. Длительность импульса излучения чипа при импульсном питании составляла 30 нс. Регистрация люминесценции осуществлялась через монохроматор МДР-204 ФЭУ «Hamamatsu 10720-20» осциллографом Tetronix DPO-3033. Временное разрешение системы составляет 2 нс.

В спектре фотолюминесценции (рис. 1) при возбуждении СД ( $\lambda_{\text{ex}} = 447$  нм) образца керамики регистрируются выраженные пики на 440 и 540 нм. Наблюдается изменение интенсивности свечения от концентрации BaF<sub>2</sub>.

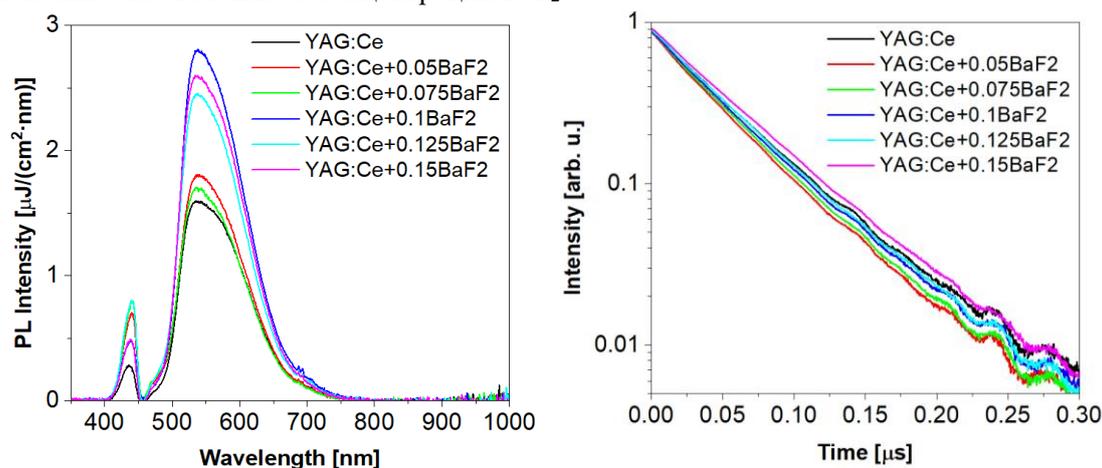


Рисунок 1 – Спектры фотолюминесценции и кинетика затухания люминесценции для синтезированной керамики с различным содержанием BaF<sub>2</sub>

Представленные кинетики затухания люминесценции удовлетворительно описываются одной экспоненциальной функцией. Обнаружена зависимость характеристического времени затухания от концентрации BaF<sub>2</sub>. Характеристическое время затухания составило  $48 \pm 2$  нс для концентрации 0,05 BaF<sub>2</sub> и  $60 \pm 2$  нс для 0,15 BaF<sub>2</sub>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-43-703014 р\_мол\_а.

#### Список литературы

1. M. Nikl, A. Yoshikawa // *Adv. Optical Mater.* – 2015. – V. 3. – P. 463–481
2. Dipti Chitnis, N.Thejokalyani, H.C.Swart, S.J.Dhoble // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – 2016. – V. 64. – P. 727–748
3. X. Luo, R. Hu, S. Liu, K.Wang // *Progress in Energy and Combustion Science* – 2016. – V.56. – P.1–32
4. M. Mori, J. Xu, et al. // *Journal of the Ceramic Society of Japan* – 2016. – V. 124. – P. 569–573
5. J. Pisarska, A. Kos, M. Soltys, L. Zur, W. Pisarski // *Journal of Non-Crystalline Solids* – 2014. – V. 388. – P. 1–5
6. X. Sun, Zi-Piao Ye, Zhi-Jun Zhang et al. // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2015. – V. 98. – P. 781–787
7. F.Zaman, G.Rooh, N.Srisittipokakun, H.J.Kim, E.Kaewnuam, P.Meejitpaisan J. Kaewkhao // *Radiation Physics and Chemistry* – 2016. – V.130. – P. 158–163
8. D. Valiev, T. Han, V. Vaganov, S. Stepanov // *J. Phys. Chem. Solid.* – 2018. – V. 116. – P.1 – 6.

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ТОМАТА

М.С. ЯМБУРОВ<sup>1</sup>, А.А. БУРЕНИНА<sup>1</sup>, Т.П. АСТАФУРОВА<sup>1</sup>, С.Б. ТУРАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: tyrsb@yandex.ru

В настоящее время во многих тепличных хозяйствах широко газоразрядные лампы – ДНаЗ и ДРЛ. Однако современный рынок предлагает потребителям всё новые и новые источники освещения, более экономичные по потреблению энергии, имеющие больший светопоток, а также со спектром излучения, более сбалансированным для выращивания растений (1-4).

Целью данного исследования являлось изучение влияния индукционных люминесцентных ламп на рост и развитие растений томата, по сравнению с типовыми источниками света – ДНаЗ и ДРЛ.

В качестве тест-объекта использовался томат (*Solanum lycopersicum* L.), раннеспелый сорт Карамелька агрофирмы "Семена Алтай". Выращивание растений проводилось в Сибирском ботаническом саду в умеренной тропической оранжерее при дневной температуре 25°C и ночной температуре 22°C. Посев семян осуществлялся в пластиковые культивационные ёмкости объёмом 500 см<sup>3</sup>. Почвосмесь составлялась из нейтрального торфа, вермикомпоста и песка в соотношении 3:1:1. Контейнеры с растениями размещались на стеллаже, оборудованном светильниками с разными типами ламп: индукционная люминесцентная (далее ИЛ), дуговая натриевая зеркальная (далее ДНаЗ), дуговая ртутная люминесцентная (далее ДРЛ). Светильники располагались над растениями на такой высоте, чтобы облученность сеянцев была одинакова. По мере роста растений, раз в 2 недели, лампы поднимали выше, чтобы облученность верхней части побега не менялась. Растения ежедневно досвечивались в течение 12 часов. Спектральный состав измерялся спектрофотометром Avaspec 2048 XL (рисунок 1), а уровень облученности PPFD - спектрофотометром ТКА-ФАР на высоте расположения растений.

Проведенные сравнительные исследования показали, что при одинаковой облученности растения томата, которые выращивались при досвечивании индукционными люминесцентными лампами, имели более высокие морфофункциональные показатели (число, площадь и сухая масса листьев, содержание хлорофилла и индекс азотного баланса) и значительно опережали в развитии растения, выращенные при досвечивании лампами ДНаЗ и ДРЛ. Это может свидетельствовать о том, что спектр излучения индукционных люминесцентных ламп более благоприятный для роста и развития растений томата в условиях светокультуры.

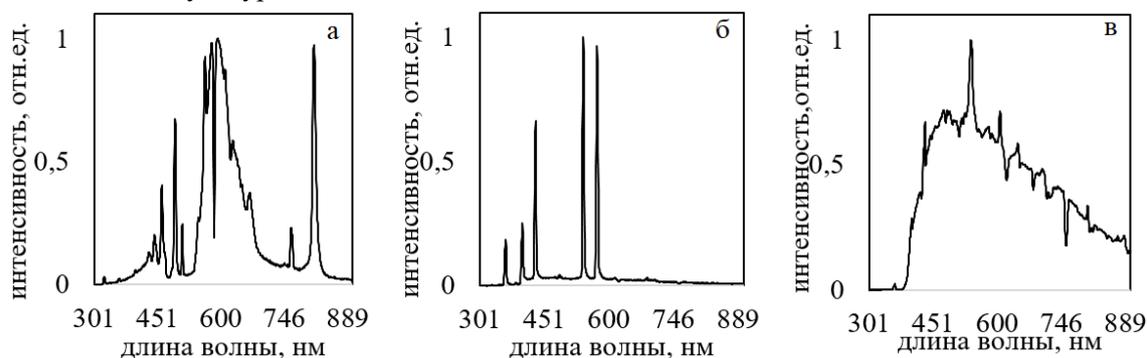


Рисунок 1 - Спектральный состав излучения а) ДНаТ лампы б) ДРЛ лампы в) индукционной лампы №1

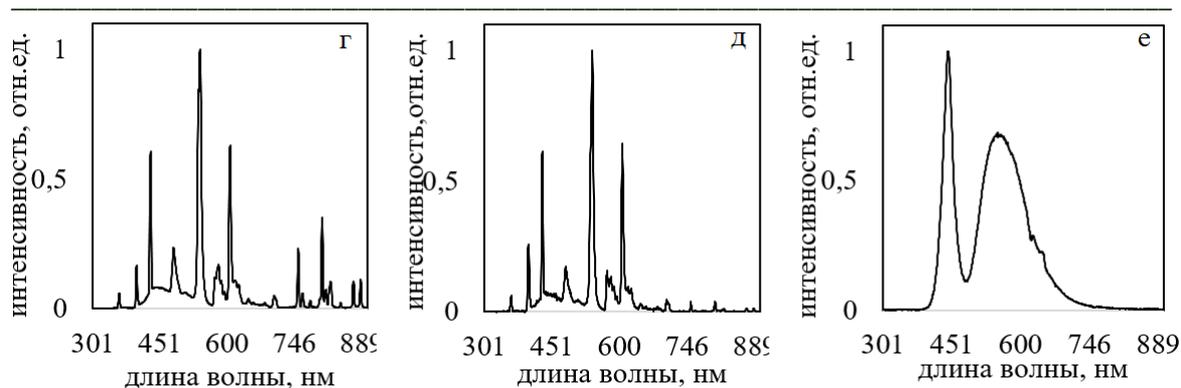


Рисунок 1 – Спектральный состав излучения г) индукционной лампы №2 д) индукционной лампы №3 е) светодиодной лампы

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 37.7810.2017/8.9.

**Список литературы:**

1. Бровка Г.А. Научные и практические основы выращивания овощных культур в зимних теплицах Дальнего Востока. Владивосток: ОАО «Примполиграфкомбинат», 2003. 180 с.
2. Леман В.М. Курс светокультуры растений. М.: «Высшая школа», 1976. 271 с.
3. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Рост и фотоморфогенез петрушки корневой (*Petroselinum tuberosum*) под оптическим излучением различного спектрального состава // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 38. С. 298-304.
4. Аверчева О. В., Бассарская Е. М., Жигалова Т. В., Беркович Ю. А., Смолянина С. О., Леонтьева М. Р., Ерохин А. Н. Фотохимическая и фосфорилирующая активность хлоропластов и мезоструктура листьев китайской капусты при выращивании под светодиодами // Физиология растений. 2010. Т. 57. № 3. С.404-414.

## ВЛИЯНИЕ СВЕТА LED-СВЕТОДИОДОВ НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ САЛАТА

М.С. ЯМБУРОВ<sup>1</sup>, А.А. БУРЕНИНА<sup>1</sup>, Т.П. АСТАФУРОВА<sup>1</sup>, С.Б. ТУРАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: tyrsb@yandex.ru

В настоящее время для освещения растений в промышленных условиях используются натриевые, металлогалогенные или люминесцентные лампы. Эти источники света являются достаточно эффективными для преобразования электрической энергии в энергию фотонного потока в целом, однако спектр их излучения далек от действительной потребности зеленого растения в энергии излучения на различных длинах волн ФАР [1]. Современные светодиоды перекрывают весь видимый диапазон оптического спектра: от красного до фиолетового цвета. Интенсивность излучения светодиода зависит от протекающего через кристалл тока, что легко позволяет управлять интенсивностью излучения светодиодного светильника. Изменяя ток для разных светодиодов, можно получать различные по составу и интенсивности спектры излучения и таким образом подбирать спектр светильника в зависимости от конкретного этапа развития растения [2-4].

Целью данного исследования являлось изучение влияния света LED-светодиодов на морфологические и физиологические показатели листьев салата-латук, по сравнению с другими типами ламп – ДНаЗ и ДРЛ.

В качестве модельного объекта использовался салат-латук (*Lactuca sativa* subsp. *secalina* Alef.) сорт Московский Парниковый, выращенных в контейнерах объемом 7 литров с почвенной смесью, состоящей из нейтрального торфа, вермикомпоста и песка в соотношении 3:1:1 при температуре +22–25°C и влажности воздуха 70–80%. Растения выращивались при 12 часовом фотопериоде, но досвечивались разными источниками освещения. Первая группа досвечивалась светильником со LED-светодиодами. Вторая группа – дуговой ртутной люминесцентной лампой – (ДРЛ, Philips 250 Вт), а третья группа – дуговой натриевой зеркальной лампой – ДНаЗ (Reflax, 150 Вт).

Система на основе LED-светодиодов была настроена на излучение светового потока, равноэнергетического по красной, синей и зеленой областям спектра. Светодиодная матрица состояла из четырех контуров диодов: синего, зеленого и двух красных. Синий контур включал сверхяркие мощные светодиоды 3GR-B-5630. (длина волны – 445-452 Нм) с мощностью излучения - 295-340 мВт при токе 350 мА, 390-420 мВт при токе 500 мА. Зеленый контур состоял из сверхярких мощных светодиодов Cree XPEGRN-L1-0000-00C01 (длина волны – 520-535 нм). Первый красный контур включал сверхяркие мощные светодиоды Cree XPERED-L1-0000-00501 (длина волны – 620 нм). Второй красный контур состоял из сверхярких мощных светодиодов 3GR-R (длина волны - 650-660 Нм) с мощностью излучения - 320 мВт при токе 350 мА, 550 мВт при токе 700 мА. Во всех 3 вариантах опыта источники освещения располагались на такой высоте, чтобы облученность семян была одинаковой.

Сравнительные исследования, проведенные с растениями салата, выращенными при досвечивании LED-светодиодами, имели большинство морфофизиологических показателей листа значительно выше, чем у растений, выращенных при досвечивании лампой ДРЛ, но не отличались по многим параметрам листа, по сравнению с растениями, выращенными при досвечивании лампой ДНаЗ. Учитывая близкие значения ряда признаков листьев растений салата в опытах с лампой ДНаЗ и LED-светодиодами и во много раз большую энергоэффективность последних, можно считать, что LED-светодиоды более перспективны для досвечивания растений в условиях защищенного грунта.

This research was supported by “The Tomsk State University competitiveness improvement programme” grant (№ 8.1.29.2018).

**Список литературы:**

1. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Рост и фотоморфогенез петрушки корневой (*Petroselinum tuberosum*) под оптическим излучением различного спектрального состава // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 38. С. 298-304.
2. Астафурова Т., Лукаш В., Гончаров А., Юрченко В. Фитотрон для светодиодной досветки растений в теплицах и на дому // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 36-38.
3. Бахарев И., Прокофьев А., Туркин А., Яковлев А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // СТА. 2010. № 2. С. 76-82.
4. Прокофьев А., Туркин А., Яковлев А. Перспективы применения светодиодов в растениеводстве // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 5. С. 60-63.

## ***СЕКЦИЯ 4***

# ***ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ***

**DEVELOPMENT OF A THEORETICAL FRAMEWORK FOR INVESTIGATION OF  
COMPENSATION POSSIBILITIES OF DEVIATIONS IN THE SHIP'S PIPING SYSTEM**

*T. M. DO<sup>1,2</sup>, K. N. SAKHNO<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Vietnam Maritime University, 484 Lach Tray, Le Chan, Hai Phong,  
Socialist Republic of Vietnam

<sup>2</sup>Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation  
E-mail: dotatmanh@gmail.com

A modern vessel is a complex technological complex consisting of various types of equipment, mechanisms, structures, for the operation of which the piping systems serve (Figure 1). The labor intensity of manufacturing pipelines and assembly of systems on ships is up to 11-20% of the total laboriousness of work at the shipyard. The technology of manufacturing pipelines is characterized by a variety of operations and a low level of mechanization. This production requires considerable and complex preparation [1-3].

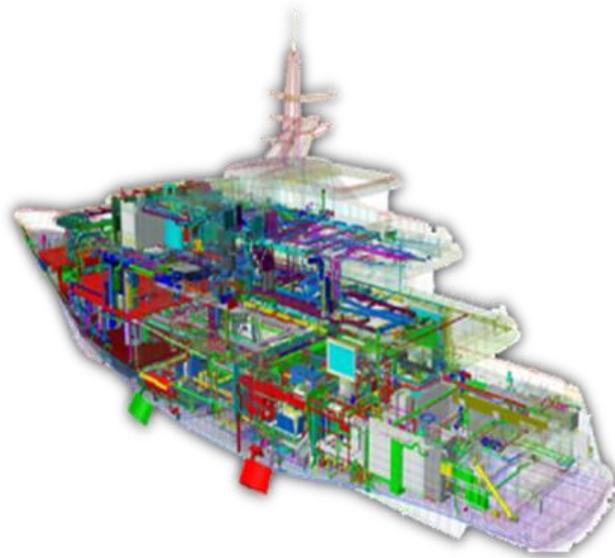


Figure 1 – Modeling of pipelines of ship systems with the help of computer program

In connection with the foregoing, it is important to increase the efficiency of the production of pipelines by introducing new technologies for the production of pipes according to project information without removing dimensions in place [1, 2]. Availability in the project documentation of sufficient information for the production and assembly of pipes allows to combine work on the construction of the vessel and shorten the time of execution of shipbuilding orders [3].

To develop alternative methods of compensation, a hypothesis was put forward on the relationship between the configuration and compensation capabilities of the piping design trajectory. This hypothesis was substantiated in [1, 2]. Its main idea is to use straight and parallel sections with pipe connections to move the piping route. This compensates for the general deviations of rigidly fixed connections that limit this route, and also compensates for errors in the manufacture and installation of pipes, which will ensure the assembly of the route without changing the configuration of the finished pipes.

In this study, we define the equations for determining the path compensation area in the direct problem (when designing the pipeline). In other words, we determine the possibility of compensating deviations of a given route. Consider the piping route, which consists of a sequence of points. Each of them can be either a point of connection of two pipes consisting of a sequence of points  $C(x_c, y_c, z_c)$ ,  $C(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ , ...,  $C(x_{cm}, y_{cm}, z_{cm})$ , without changing the direction of the route, or the bending point  $F(x_{f1}, y_{f1}, z_{f1})$ ,  $F(x_{f2}, y_{f2}, z_{f2})$ , ...,  $F(x_{fn}, y_{fn}, z_{fn})$  without changing the

direction of the path. The last (finite) point A ( $x_A, y_A, z_A$ ). The path must connect the start (C) and end point (A), the exact actual position of which relative to each other at the time of the route design is unknown. When installing the first connection with the skewing of pipes, turning the route in the connection, located on these straight pipes, the end point of the route describes the ball segment (Figure 2).

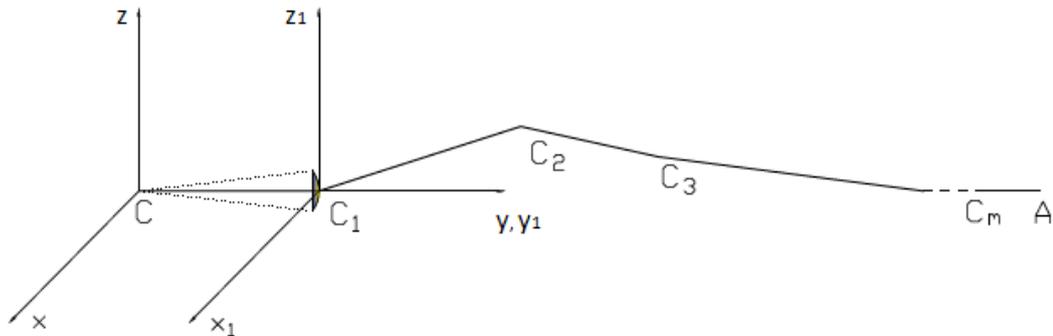


Figure 2 – Axis translation of coordinate systems

Further, when the second connection is installed not perpendicular to the pipe axis, but in parallel, the end point of the path moves along some trajectory [4]. Similarly, if you shift the axes of the following connections, the compensation area is a three-dimensional body. This arc, surface and three-dimensional body determine the compensation area. The task of this study is to develop a mathematical description of the compensation area. To solve the problem it is more convenient

to use spherical coordinate systems instead of the Cartesian system. We get the coordinates of point A in the original system Oxyz:

$$\begin{cases} x_A = x_C + \sum_{i=1}^m r_i \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_i \\ y_A = y_C + \sum_{i=1}^m r_i \cdot \cos\theta_i \\ z_A = z_C + \sum_{i=1}^m r_i \cdot \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_i \end{cases} \quad (1)$$

Equation (1) determines the trajectory of the displacement of the last point of trace A. This trajectory is shown in Fig. 3.

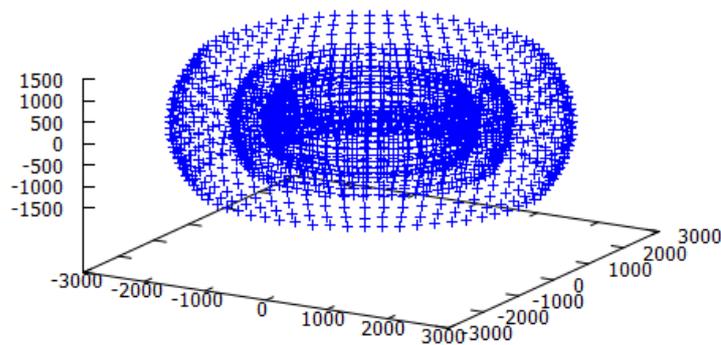


Figure 3 – The trajectory of the displacement of point A when the route is rotated

Thus, as a result of the conducted studies, the following results were obtained: a mathematical description of the compensatory capabilities of pipeline routes was made using straight pipes; 3D models of the compensation area are constructed; The theoretical basis for the creation of an automated program is developed, which will allow determining the areas of compensatory opportunities for pipeline routes; it is possible to replace the measured pipes with the ready pipes, which will help reduce the time for building ships.

#### **References**

1. Sakhno K. N., T. M. Do, and Ch. K. Vo. Issledovanie vozmozhnostei sozdaniya obobshchennogo metoda ispol'zovaniya parallel'nykh uchastkov i pryamykh trub dlya kompensatsii otklonenii sudovykh truboprovodnykh trass // *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal: Molodoi uchenyi.* - Kazan' 6(2016): 181-184.
2. Sakhno K. N. Nauchnye osnovy povysheniya tekhnologichnosti truboprovodov sudovykh sistem na stadii proektirovaniya // PhD diss. Astrakhan': AGTU, 2012.
3. Safa M., Shahi A., Nahangi M., Haas C., Noori H. Automating measurement process to improve quality management for piping fabrication // *Structures*, 2015, vol. 3, pp. 71-80.
4. OST 5.95057-90. "Sistemy sudovye i sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok. Tipovoi tekhnologicheskii protsess izgotovleniya i montazha truboprovodov" // L.: NPO «Ritm», 1991. 2007p.

## KINEMATICAL AND POWER FLOW ANALYSIS OF THE NUTATION SPEED REDUCER

*M. A. JASEM*

Tomsk Polytechnic University  
E-mail: eng.mjase85@gmail.com

Nutation speed reducer with face teeth is a totally innovative gear transmission developed in recent years [1,2], which bases its functioning on the mathematical concept of nutation motion, that is the main feature that characterizes nutation gear from conventional gear. It has unique features which include high reduction ratio in one stage, very high profile contact ratio and an overall higher power density transmission. In addition, the contact is theoretically pure rolling in the gear, the heat generated should be lower and the efficiency higher.

The Nutation Speed Reducer is illustrated in Figure 1. The component names illustrated in Figure 1 are (1) an input shaft which drives the (3) nutator gear via bearings, and meshes with (2) the stator gear and drives (4) the rotor gear and (5) output shaft.

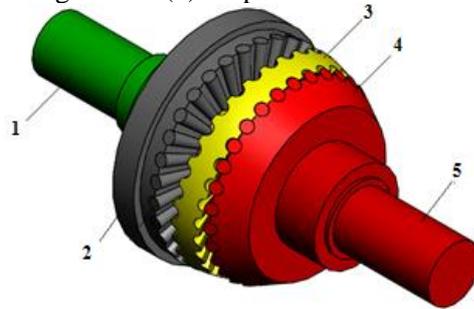


Figure 1 - The Nutation Speed Reducer

The nutator is mounted to the input shaft at a specified nutation angle (Typical range of the nutation angle  $\beta$  is 2-5° from vertical direction) [3]. The nutator design embodies back-to-back face-gears. The numbers of teeth on the stator gear 2 and rotor gear 4 is  $Z_1$ ,  $Z_4$  respectively. The numbers of teeth on the nutator gear 3 meshing with stator gear is  $Z_2$ . The numbers of teeth on the nutator gear 3 meshing with rotor gear is  $Z_3$ .

Due to the mounting arrangement, the nutator gear teeth on both sides are always in mesh with both the stator and the rotor gears. The meshing between teeth 2, 3 prevents the nutator gear 3 from rotating during nutation, so that the meshing between teeth 4, 3 is affected solely by means of the meshing between the nutator gear 3 and rotor gear 4. The nutator gears simultaneously share the tooth loads with high contact ratios as a result of its unique assembly [4]

As illustrated in Figure 2, input shaft, stator gear and rotor gear rotate about the Z-axis of the global fixed-coordinate frame  $S_f$ . The motion of the nutator gear consists of two motions. The first motion is with the rotation of the nutator gear with the input shaft about the Z axis. The second motion is a rotation about the  $z_p$  axis (nutational motion). This second rotation is caused by the meshing engagement with the stator gear. The  $z_p$  axis is fixed to the input shaft; thus, it rotates about the Z axis.

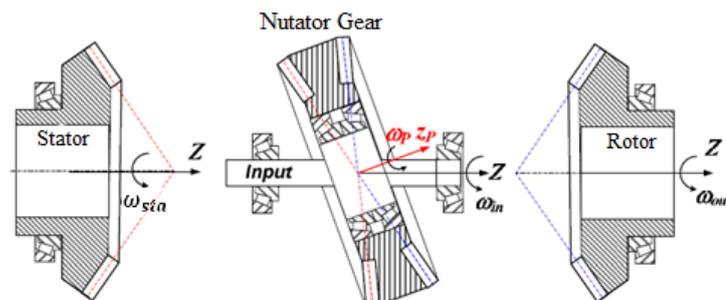


Figure 2 – Motion of the nutator gear

Coordinate relations of the  $S_f$  and  $S_p$  are illustrated in Figure 3. The  $S_f$  and  $S_p$  coordinate frames are coincident at the common origins  $O_f$  and  $O_p$ . The directions of the frames are set according to the right hand rule.

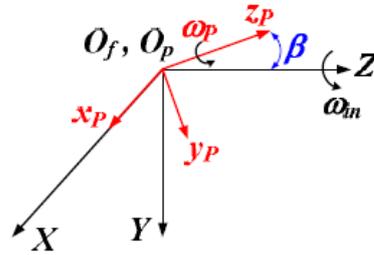


Figure 3 – Coordinate relations of the nutator gear and global frame  
The angular velocity vector of the input shaft is:

$$\vec{\omega}_{in} = \omega_{in} \cdot \vec{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where the symbol  $\vec{K}$  presents unit vector in the Z direction of the  $S_f$  coordinate.

The stator gear angular velocity is:

$$\vec{\omega}_{sta} = \omega_{sta} \cdot \vec{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{sta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $\omega_{sta}$  is the angular speed of the stator gear.

Lastly, the rotor gear angular velocity is:

$$\vec{\omega}_{out} = \omega_{out} \cdot \vec{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{out} \end{bmatrix} \quad (3)$$

The motion of the nutator gear member is in two components as explained before. It is:

$$\vec{\omega}_{PMC} = \omega_{in} \cdot \vec{K} + \omega_p \cdot \vec{k} \quad (4)$$

One of the significant characteristics of the Nutation Speed Reducer is the overall speed reduction ratio ( $i_v$ ). It is the ratio of the input speed to the output speed. The reduction ratio is presented as:

$$i_v = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{1}{1 - \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4}} \quad (5)$$

#### References

1. Lemanski, A., and Monahan, T. J., "Non-Traction Pericyclic CVTs," SAE International, Vol. 40, 5th ser., 2004
2. Nelson C.A., Cipra R.J. :Journal of Mechanical Design, Vol. 127 (2005), pp.269-277.
3. Saribay, Z., and Bill, R., "Design Analysis of Pericyclic Mechanical Transmission System," Mechanism and Machine Theory, vol. 61, pp. 102-122, 2012.
4. Mathur, T., Saribay, Z., Bill, R., Smith, E., and DeSmidt, H., "Analysis of Pericyclic Mechanical Transmission with Straight Bevel Gears," 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, January, 2015.

## THE MORPHOLOGY OF TITANIUM ALLOY AT DIFFERENT CREEP-FEED GRINDING SPEEDS

S.V. NOSENKO<sup>1</sup>, V.A. NOSENKO<sup>1</sup>, L.L. KREMENETSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>Volgograd State Technical University

E-mail: kreleonid@yandex.ru

One reason why titanium alloys are difficult to machine is the high adhesion of titanium to abrasive materials [1]. When machined, the metal sticks to the tips of abrasive grains; thus, abrasive tool wear byproducts are transferred to the machined surface [2]. Measures proposed to make the process more efficient include using high-porosity abrasive tools [3], continuous dressing [4]; optimization of grinding parameters [5] and workpiece feed direction [4, 6]. Besides, the increase of grinding speed was defined as a way to improve the efficiency of creep-feed grinding.

The purpose of the article is to analyze how the speed of creep-feed grinding affect the morphology of machined surface of titanium alloy.

40-mm Ti6Al4V workpieces were machined on an automatic SLS434 profile-grinding CNC machine by in-feed up-grinding. High-porosity 64CF100I12V wheel was used as the abrasive tool. Machining parameters: operating speed  $v$ : 20 m/s, 25 m/s, and 30 m/s; table feed rate: 100 mm/min; grinding depth: 1 mm; dressing roll feed rate: 0.6  $\mu\text{m}/\text{rotation}$ .

The morphology was analyzed in 10 cross-sections evenly distributed along the entire length of workpiece using a Versa 3D twin-beam electron microscope. The first position of scanning was selected at a distance  $l=1$  mm from the edge of the workpiece.

Creep-feed grinding has to be performed with due account of stage-specific peculiarities of formation [7]. Material removal begins at the incision stage. The machined surface is being formed at the stage of constant length of arc (SCLA) as well as at the stage of exit.

At the distance  $l=5,2$  mm from the edge of the workpiece the surface morphology indicates the highly intensive adhesive inter-effect of the abrasive wheel and the titanium alloy. The intensity of metal sticking and smearing on the machined surface is quite high (Fig. 1, a). At the length of up to  $l=22$  mm, the machined surface has approximately the same relief. The stage of exit begins at  $l \approx 22.3$  mm. The actual grain grinding depth and the length of the arc of tool-and-material contact reduced.

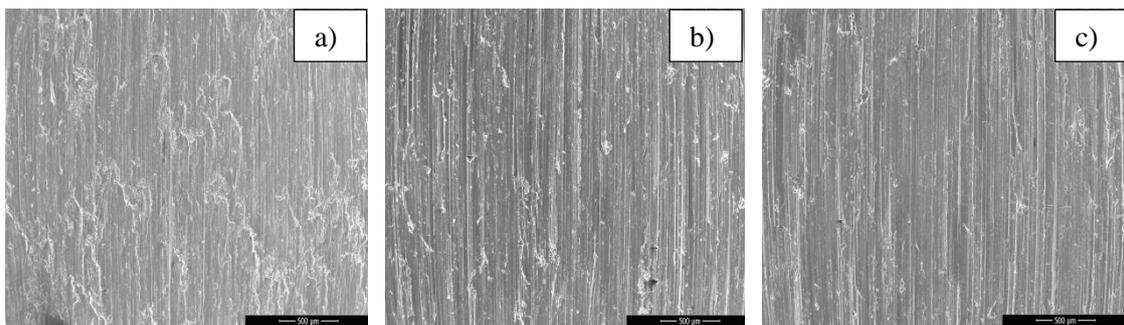


Figure 1 – Surface morphology at grinding,  $v=20$  m/s,  $\times 131$ : a)  $l=5,2$  mm.; b)  $l=26,2$  mm.; c)  $l=34,6$  mm

The relief of machined surface starts to change from  $l \geq 23$  mm. The number of smeared metal areas decrease gradually, edges of isolated adhered metal smooth out (Fig. 1, b). At the distance  $l=6-4$  mm from the edge of the workpiece areas of smeared metal are none, the surface represents a set of individual scratches left by peaks of grains, which corresponds to the morphology typical for conventional grinding (Fig. 1, c).

At higher operating speeds, the number of grain tips passing along a section of the machined surface in a given time is increased. This increases the transfer of metal per unit of machined surface area at the distance  $l=5,2$  mm from the edge of the workpiece (Fig. 2, a). Boundaries between areas of isolated adhered metal become less clear due to increase of density of the adhered metal with the increase of grinding speed. As it was at  $v=20$  m/s the intensity of adhered metal starts to change from  $l \geq 23$  mm (Fig. 2, b).

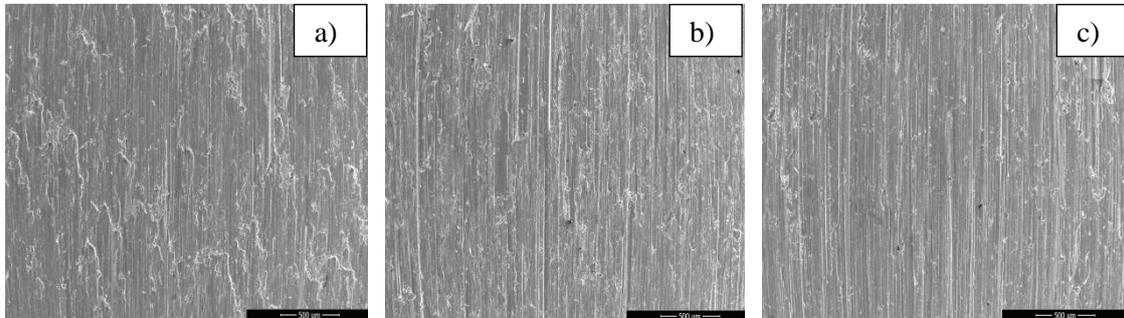


Figure 2 - Surface morphology at grinding,  $v=30$  m/s,  $\times 131$ : a)  $l=5,2$  mm.; b)  $l=26,2$  mm.;  
c)  $l=34,6$  mm

Due to large number of grain peaks at  $v=30$  m/s the relief which can be defined as the same to relief of conventional grinding is forming at  $l \approx 35$  mm (Fig. 2, c). The relief of the surface machined at  $v=25$  m/s was at an intermediate position between those machined at  $v=20$  m/s and  $v=30$  m/s.

#### References

1. Xipeng Xu. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys / Xipeng Xu, Yiqing Yu // *Wear*. – 2003. – Vol. 255, No. 7. – P. 1421–1426.
2. Nosenko S.V. Surface-layer composition of titanium alloy after dry grinding by a silicon-carbide wheel / Nosenko S.V., Nosenko V.A., Krutikova A.A., Kremenetskii L.L. // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Vol. 35, No. 7. – P. 554–557.
3. K. Nadolny. A review on single-pass grinding processes / K. Nadolny // *Journal of Central South University*. – 2013. – Vol. 20, No. 6. – P. 1502–1509.
4. Nosenko V.A. Unidirectional and opposing deep grinding of titanium alloy with periodic wheel adjustment / Nosenko V.A. // *Russian Engineering Research*. – 2010. – Vol. 30, No. 10. – P. 1016–1021.
5. R. Hood. Creep feed grinding of gamma titanium aluminide and burn resistant titanium alloys using SiC abrasive / R. Hood, F. Lechner, D.K. Aspinwall, W. Voice // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47, No. 9. – P. 1486–1492.
6. Nosenko V.A. Mathematical models of operating time and cutting capacity for various stages of flat creep feed grinding of horizontal surface by circle of direct profile / Nosenko V.A., Nosenko S.V. // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2010. – Vol. 39, No. 4. – P. 380–385.
7. Nosenko S.V. The condition of machined surface of titanium alloy in dry grinding / Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L. // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 115–120.

**RESEARCH STEEL TO DIELECTRIC JUNCTIONS BY USING SUBMINIATURE  
EDDY-CURRENT TRANSDUCERS**

*V.N. MALIKOV<sup>1</sup>, S.F. DMITRIEV<sup>1</sup>, L.M. DMITRIEVA<sup>1</sup>, A.V. ISHKOV<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Altai State University

<sup>2</sup>Altai State Agricultural University

E-mail: mirotnas@gmail.com

Today, the issue of accurate and reliable evaluation of technical condition of hazardous production facilities has special importance. In modern control methods such evaluation is mainly based on probabilistic approaches and is performed using actual data on operation modes and existing stresses, deformations and temperatures. Electric steel is applied for manufacturing various electrical products. Magnetic properties of steel are essential for developing effective control and diagnostic methods for their physical and chemical characteristics which largely define reliability, operating life and remaining useful life of critical joints, components, products in various industries..

Eddy-current method is also proved [7, 8] effective for investigation on physico-mechanical properties of steel. This method is a widely used means of non-destructive testing based on analyzing interaction between external electromagnetic field and eddy currents introduced by this field [1,2].

The purpose of this study is to demonstrate the ability to scan steel to dielectric transition for further investigation of steel surface characteristics. In this regard, it is necessary to define the mode of decrease of introduced voltage of eddy-current transducer when distancing from the test object, and the cause of such decrease. Eddy-current transducer represents a transformer with measuring, transmitting and compensation coils and a coil flux guide located inside a cylindrical platform.

Experimental study was performed using two materials located with 1 cm gap between each other. Scanning measurements were initially taken in electric steel of type 1212 (specimen No.1) through a dielectric (paper), and then in steel of type 3414 (specimen No.2). Frequency of signal transmitted to the transmitting coil of the ECC varied within the range of 1000-10000 Hz. For the purpose of detailed study of introduced voltage on the ferromagnetic-dielectric boundary, a dependence curve of introduced voltage amplitude on the gage position was obtained. This curve demonstrates the behavior of introduced voltage amplitude variation while moving the ECC above the steel-dielectric boundary. tly demonstrates the effects occurring on the interface. The experimental results are presented in figure 1

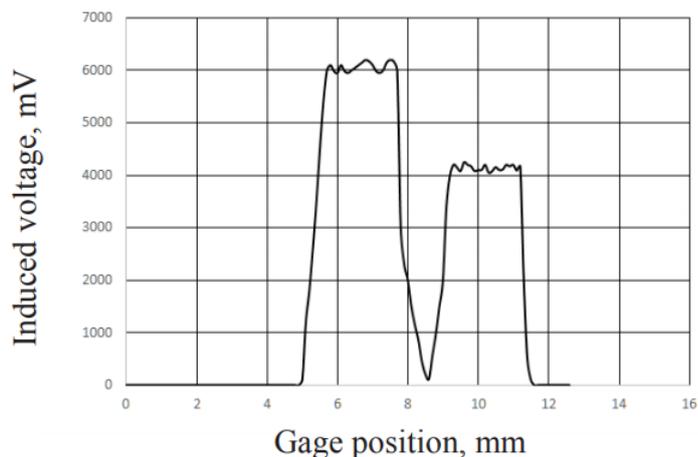


Рисунок 1 – Dependence curve of introduced voltage on the gage position while continuous scanning at 1000 Hz

Difference of peaks of the curves depends on the permeability of electric steel. The curve demonstrates that in the dielectric area the introduced voltage drops from 6000 mV to 2000 mV and then smoothly tends to zero. For more detailed study of introduced voltage drop on the ferromagnetic-dielectric boundary, a curve for discrete dependence of introduced voltage amplitude on the gage position was obtained (figure 2). Discrete scanning of objects was planned within the experiment. Measurements were performed in points located at 0.1 mm from each other. As a result of the experiment the following conclusion can be drawn: on the interface, ferromagnetic response does not drop to zero value, but decreases according to square law (area 1). The minimum value of introduced voltage amplitude is 50 mV. Increase of the signal amplitude when approaching the second steel specimen occurs according to a law similar to exponential one (area 2).

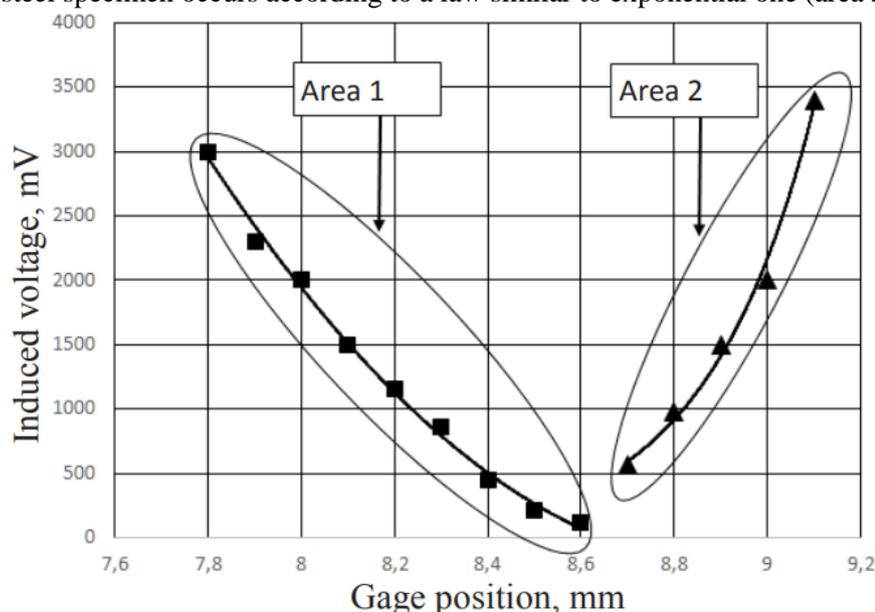


Рисунок 2 – Dependence curve of introduced voltage amplitude on the gage position while discrete scanning at 1000 Hz

Such dependence can be explained by residual voltage in coils of ECC. Continuous field lines are distinguished in the field of electric steel. Therefore, electromagnetic field that prevents occurrence of self-inductance in the measuring coil and is generated by eddy currents will have little effect on introduced voltage. At the same time, the response value will not drop to zero due to ferromagnetic influence on the gage. Such influence is explained by presence of self-magnetic field of steel which is closed on the ECC even at relatively big distance. При этом магнитное поле второго образца влияет на датчик одновременно с магнитным полем первого образца. In such case, magnetic fields of the first and the second specimens affect the gage simultaneously. Exponential growth of introduced voltage amplitude is caused by adding electromotive forces (EMF) of both specimens' fields.

#### Список литературы

1. Ключев В.В. Неразрушающий контроль. Т. 4 – Москва: Машиностроение, 2008. – 232 с.
2. Ghoni R., Dollah M. Defect characterization based on eddy current technique: Technical review // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 5. – С. 1–9.

## ВЛИЯНИЕ МЕХАКТИВАЦИИ НА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ НАВОДОРАЖИВАНИЕ ПОРОШКА НИКЕЛИДА ТИТАНА

Е.В. АБДУЛЬМЕНОВА<sup>1</sup>, О.Ю. ВАУЛИНА<sup>1</sup>, С.Н. КУЛЬКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: eva5@tpu.ru

Проблема хранения водорода существует давно и актуальна по настоящее время. Известно, что в качестве носителя водорода может служить никелид титана, который показывает хорошую аккумулирующую способность для его хранения, высокую электрохимическую активность, устойчивость к коррозии и имеет относительно небольшой удельный вес. В связи с этим существует немало работ, посвящённых изучению системы TiNi - H [1, 2], однако, информация о механизме процесса наводороживания ограничена, особенно для порошкового никелида титана, что затрудняет управление процессом адсорбции / десорбции водорода.

Известно, что механическая активация порошков, в том числе TiNi, увеличивает запасенную энергию системы, что может благоприятно сказаться на увеличении адсорбции / десорбции водорода в процессе гидрирования за счёт дефектов решётки [3, 4, 5].

В работе исследовано влияние механической активации на процесс электролитического наводороживания порошкового никелида титана.

Изучен порошок никелида титана марки ПН55Т45 производства АО «Полема» со средним размером частиц 22.5 мкм (sd=10 мкм). Механическую активацию проводили в планетарной шаровой мельнице «АГО-2». Наводороживание проводили в электрохимической ячейке с графитовым анодом. Электролитом служил 20%-ый водный раствор NaCl с добавкой 1,5 г/л декстрина. Плотность катодного тока в течение всего эксперимента составляла 40-70 мА/см<sup>2</sup>. Фазовый состав изучен с помощью дифрактометра с излучением CuK<sub>α</sub> в режиме сканирования по точкам в интервале углов 2θ от 10° до 130° с шагом 0.05°.

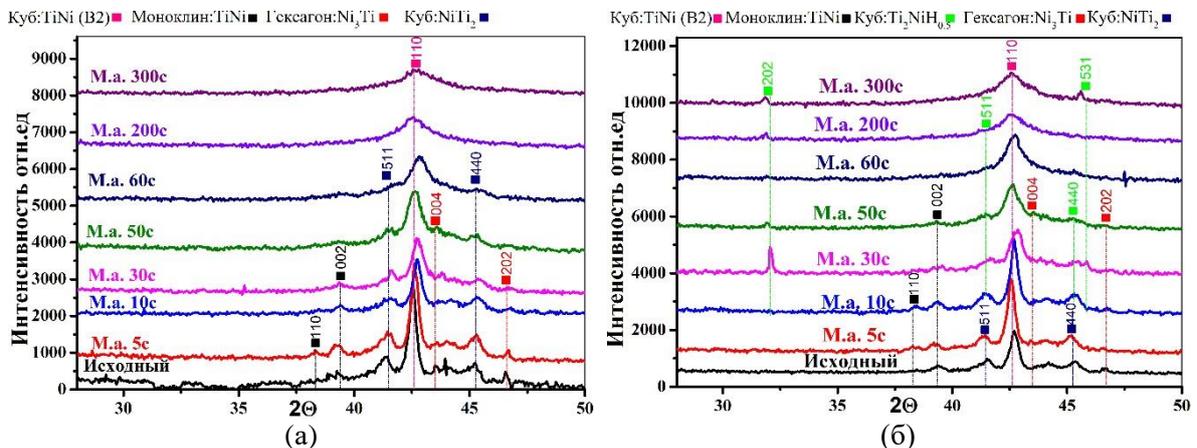


Рисунок 1 – Фрагменты рентгенограмм порошка ПН55Т45 до (а) и после (б) наводороживания в среде 20% водный раствор NaCl с декстрином: в исходном состоянии — и после механической активации: 5 с —, 10 с —, 30 с —, 50 с —, 60с —, 200 с —, 300 с —

После механической активации порошок никелида титана состоит из TiNi (B2) и NiTi<sub>2</sub> (кубическая сингония); TiNi (моноклинная сингония B19') и Ni<sub>3</sub>Ti (гексагональная сингония). В процессе механической активации пики рентгенограмм испытывают уширение вследствие накопления дефектов, рисунок 1 а. После наводороживания фазовый состав исходного порошка не изменился. В процессе увеличения времени механической активации

более 10 с начинает образовываться новая фаза  $Ti_2NiH_x$  (кубическая сингония) на основе фазы  $NiTi_2$ , рисунок 1 б.

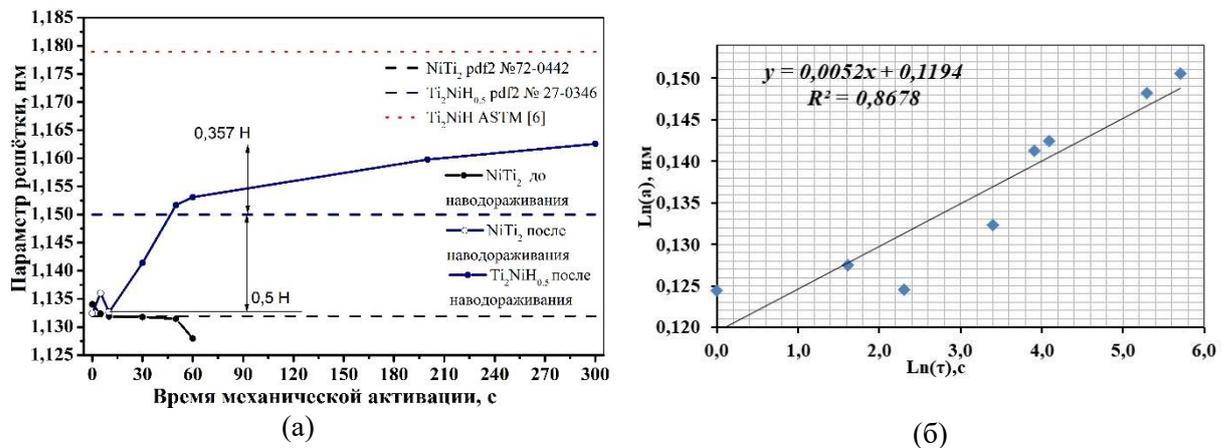


Рисунок 2 – Зависимость параметра решётки (а) фазы  $NiTi_2$  от времени механической активации порошка ПН55Т45 до и после наводороживания (а); аппроксимация зависимости параметра решётки фазы  $NiTi_2$  от времени мехактивации порошка после наводороживания (б)

На рисунке 2 а представлено изменение параметров кристаллической решётки от времени механической активации до и после наводороживания. Из графика видно, существует «мёртвое время», когда процесс гидрирования не протекает. Механическая активация порошка до 50 с приводит к образованию фазы  $Ti_2NiH_x$  на основе фазы  $Ti_2Ni$ , при этом времени 50 сек достаточно для формирования стехиометрии  $Ti_2NiH_{0.5}$ . В этом случае значения параметра решётки после наводороживания соответствует литературным данным [pdf2 №27-0346]. Аппроксимация зависимости параметра решетки от времени активации, рисунок 2 б, позволило получить уравнение  $y=0,1194\tau^{0,0052}$ , с помощью которого было определено содержание водорода, достигнутого в процессе наводороживания – 0,857 H. Соответственно в процессе наводороживания формируется фаза  $Ti_2NiH_{0,857}$ . Экстраполяция этой зависимости показала, что для получения стехиометрии  $Ti_2NiH_1$  с параметром кристаллической решётки [6], необходимо провести мехактивацию в течение 4,5 часов.

#### Список литературы

1. Boris Drenchev, Tony Spassov. Electrochemical hydriding of amorphous and nanocrystallineTiNi-based alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 441. – 2007 – p. 197–201.
2. Xiangyu Zhao, Liqun Ma, Meng Yang, Yi Ding, Xiaodong Shen. Electrochemical properties of Ti–Ni–H powders prepared by milling titanium hydride and nickel // international journal of hydrogen energy. – №35. – 2010. – p. 3076 – 3079.
3. D.R. Arantes, X.Y. Huang, C. Marte, R. Kirchheim, Hydrogen diffusion and permeation in micro- and nanocrystalline nickel, Acta Metall. Mater. 41 (1993) 3215–3222.
4. I. Prochazka, J. Cízek, V. Havranek, W. Anwand, Defect studies of H implanted niobium, J. Alloys Compd. 645 (2015) S69-S71, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.197>.
5. F. Jambon, L. Marchetti, M. Sennour, F. Jomard, J. Chene, SIMS and TEM investigation of hydrogen trapping on implantation defects in a nickel-based superalloy, J. Nucl. Mater. 466 (2015) 120-133, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.07.045>.
6. B. Luan, N. Cui, H. Zhao, H.K. Liu, S.X. Dou. Mechanism of early capacity loss of  $Ti_2Ni$  hydrogen-storage alloy electrode // Journal of Power Sources 55 (1995) 101-106.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ ПРИ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

*Т.Р. АБЛЯЗ, К.Р. МУРАТОВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
E-mail: lowrider11-13-11@mail.ru

Технология копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭЭО) позволяет получать детали сложной формы, из материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

При КПЭЭО в качестве инструмента применяют электроды, изготовленные из материалов с повышенными электроэрозионными свойствами. Наиболее распространенными материалами для изготовления ЭИ являются медь и графит. Традиционный способ получения ЭИ сложного профиля является многокоординатная лезвийная обработка. Низкий коэффициент использования инструментального материала (КИМ) при формообразовании сложнопрофильного ЭИ существенным образом сказывается на себестоимости годного изделия [1,2].

Актуальной задачей является разработка технологических основ создания и внедрения в производственный процесс электродов полученных методами литья, а также технологиями быстрого прототипирования из экономически выгодных материалов с последующим нанесением электроэрозионностойких покрытий [1,2].

Целью работы является – исследование стойкости электрода-инструмента с покрытием при обработке стали 38Х2Н2МА.

В качестве материала основы ЭИ использован алюминиевый сплав марки АК12 (ГОСТ 1583 – 93).



Рисунок 1 – Образцы ЭИ с нанесенным медным покрытием

Нанесение электроэрозионностойкого медного покрытия на ЭИ наносилось гальваническим методом в сернокислом электролите.

Проведено исследование влияния режимов гальванического осаждения на толщину и стойкость медного покрытия.

Образцы ЭИ с нанесенным покрытием представлены на рис. 1.



Рисунок 2 – Образец ЭИ после КПЭЭО:

а) общий вид ЭИ после КПЭЭО на max и min режимах; б) толщина покрытия после 2 часов КПЭЭО на min режиме

Установлено, что для получения равномерного медного покрытия толщиной 300 мкм необходимо использовать плотность тока при гальваническом осаждении 1,3 А/мм<sup>2</sup> при выдержке 5 часов (образец 3 рис.1).

Экспериментальное исследование стойкости покрытия при КПЭЭО стали 38Х2Н2МА показало, что при увеличении силы тока свыше 8А (max режим) происходит выгорание медного покрытия (рис. 2а).

Установлено, что при обработке заготовки с силой тока 2А (min режим) покрытие выгорело на 55% после 2 часов обработки (рис.2б). Полное выгорание покрытия зафиксировано после 5 часов КПЭЭО.

На основе полученных данных изготовлен и направлен на производственные испытания ЭИ для изготовления изделия специального машиностроения типа «Крюк» (рис.3).



Рисунок 3 – ЭИ типа «Крюк»

На основании проведенных исследований, установлено, что ЭИ с нанесенным покрытием на основу из алюминиевого сплава марки АК12 позволяет, обрабатывать сталь 38Х2Н2МА, обеспечивая заданную производительность обработки. Экономическая эффективность применения ЭИ с покрытием составила 35% в сравнении с технологией получения инструмента из цельной медной заготовки.

#### **Список литературы**

1. Любимов В.В., Саломатников М.А. Технология синтеза многослойных систем на полимерных основаниях, полученных методом быстрого прототипирования. Известия ТулГУ. Технические науки. - 2013. - №9. – С. 45-52
2. Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, С.С. Кремлёв Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38Х2Н2МА/ // СТИН. – 2017. - №5. –С.20-21.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ В ПОРОУПРУГОМ  
СОСТАВНОМ ТЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАГОВОЙ ГРАНИЧНО-  
ЭЛЕМЕНТНОЙ СХЕМЫ НА УЗЛАХ МЕТОДА ЛОБАТТО**

*С.М. АЙЗИКОВИЧ, А.Н. ПЕТРОВ*

Донской государственной технической университет

E-mail: andrey.petrov@mech.unn.ru

Изучение распространения волн в пороупругих телах, подвергнутых динамическим нагрузкам, имеет большое значение для инженерных приложений. Результаты таких исследований используются для разработки методов неразрушающего контроля, при структурном анализе грунтов, в сейсмологии. Однако задачи о распространении волн в насыщенных жидкостью и газом средах требуют привлечения развитых численных методов, поскольку даже при существенных упрощениях применение модели пористого материала значительно усложняет вычислительную схему краевой задачи по сравнению с упругой или вязкоупругой постановкой. Пороупругая постановка позволяет учитывать втекание или вытекание наполнителя в любую область, формируемую порами, что особенно важно учитывать при рассмотрении волновых процессов, так вклад динамического поведения жидкости принципиально меняет их картину.

В работе развивается методика моделирования с использованием шаговой по времени схемы метода граничных элементов, соответствующее методическое и программное обеспечение, позволяющее делать выводы о распространении волн как в однородных, так и неоднородных телах. Для описания пороупругой сплошной среды используется математическая модель Био материала, в котором выделяется твердая фаза, представляющая собой упругий формообразующий скелет и воспринимающая основную силовую нагрузку, и две текучих фазы, заполняющие поры. Применение преобразования Лапласа позволяет записать уравнения динамики пороупругой среды в виде краевой задачи относительно неизвестных функций перемещений упругого скелета и поровых давлений наполнителей. Рассматривается кусочно-однородное тело в трехмерном евклидовом пространстве с декартовой системой координат, предполагается, что каждая однородная часть является изотропным телом. Динамическое состояние каждой части тела описывается системой дифференциальных уравнений в обобщенных перемещениях. Общая система собирается из условий контакта областей.

Гранично-элементная методика опирается на использование регуляризованного граничного интегрального уравнения прямого подхода:

$$\int_{\Gamma} (\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s) \mathbf{u}(\mathbf{x}, s) - \mathbf{T}^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{u}(\mathbf{y}, s) - \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s) \mathbf{t}(\mathbf{x}, s)) d\Gamma = 0, \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \Gamma, \Gamma = \partial\Omega, \quad (1)$$

где  $\mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s)$  и  $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, s)$  матрицы фундаментальных и сингулярных решений, соответственно,  $\mathbf{T}^0(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  – матрица, содержащая особенности,  $\mathbf{x}$  – точка интегрирования,  $\mathbf{y}$  – точка наблюдения,  $\mathbf{u}$  – вектор обобщенных перемещений,  $\mathbf{t}$  – вектор обобщенных усилий,  $s$  – комплексный параметр преобразования Лапласа.

Уравнение (1) решается методом граничных элементов. В процессе гранично-элементной дискретизации поверхность  $\Gamma$  разбивается обобщенными восьмиузловыми четырехугольными элементами. Обобщенные граничные функции первого рода аппроксимируются билинейно, а обобщенные граничные функции второго рода принимаются постоянными на элементе. Дискретное представление уравнения (1) строится в узлах интерполяции неизвестных граничных функций (точках коллокации). Коэффициенты дискретного аналога содержат интегралы от компонент матриц фундаментальных и сингулярных решений, умноженных на функции формы. Выбор схемы численного интегрирования определяется типом особенности подынтегрального выражения.

Решение во времени получается с помощью шагового метода численного обращения преобразования Лапласа. В соответствии с методом интеграл

$$y(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2)$$

вычисляется по квадратурным формулам

$$y(0) = 0, y(n\Delta t) = \mathbf{b}^T \mathbf{A}^{-1} \sum_{k=1}^n \omega_k^{\Delta t}, n = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где весовые множители  $\omega_k^{\Delta t}$  определяются с помощью изображения по Лапласу  $\hat{f}(s)$  и многошагового метода, применяемого для решения задачи Коши, возникающей в процессе преобразования интеграла (2). Совместное применение метода граничных и методов Рунге-Кутты в задачах пороупругости рассмотрено в работах [1-2], однако лишь для случая двухфазной среды. Кроме того, авторы использовали только двухэтапные методы семейства Рунге-Кутты.

В настоящем исследовании используются двух и трехэтапные методы Лобатто, записанные в виде таблицы Бутчера. Рассматривается задача о действии нагрузки в виде функции Хевисайда по времени на торец частично насыщенного пороупругого составного тела. Исследуются динамические отклики перемещений, усилий и поровых давлений. Проводится сравнение с решениями, полученными другими авторами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-10056).

#### Список литературы

1. Igumnov L.A., Vorobtsov I.V., Litvinchuk, S.Yu. Boundary Element Method with Runge-Kutta Convolution Quadrature for Three-Dimensional Dynamic Poroelasticity // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Т. 709. – С. 101-104.
2. Igumnov L.A., Litvinchuk S.Yu., Petrov A.N. A numerical study of wave propagation on poroelastic half-space with cavities by use the BEM and Runge-Kutta method // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Т. 28. – № 1-2. – С. 96-100.

**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ КОНСТРУКЦИИ ИЗ  
ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

*А.Н. АНОШКИН, П.В. ПИСАРЕВ, Ю.С. КИРОВА*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: pisarev85@live.ru

В последние годы область применения композиционных материалов существенно увеличилась. В первую очередь за счет широкого использования их в гражданском авиастроении и двигателестроении. Использование композитов позволяет значительно (по ряду деталей в несколько раз) снизить вес, повысить экологические параметры и экономичность самолета. В том числе наблюдается повышенный интерес к использованию композиционных материалов с термопластичными матрицами (ТКМ) при производстве широкого спектра изделий, в том числе и ответственных деталей авиационной техники.

Вместе с тем при автоматизированной выкладке термопластичного препрега существует ряд проблем связанных с выбором параметров технологического процесса, таких как: сила натяжения ленты, температура в области контакта ленты с оснасткой, усилие прижима ленты к оснастке, выбор материала оснастки.

В рамках настоящей работы проведено исследование по выбору режима прогрева ленты термопластичного препрега двух стыковых слоев, размещенных на металлической оснастке. Для определения требуемой скорости движения лазерного источника проводилось численное моделирование процесса прогрева соприкасающихся слоев термопластичного препрега до температуры формования.

В качестве объекта исследования рассматривается лента термопластичного композиционного материала, выполненная из однонаправленного ТКМ. Моделировалось четыре варианта укладки препрега. Для вариантов 1 и 2 общая схема геометрической модели представлена на рисунке 1а, а для вариантов 3 и 4 на рисунке 1б. Построенные геометрические модели, отличались площадью воздействия поверхностного теплового источника.

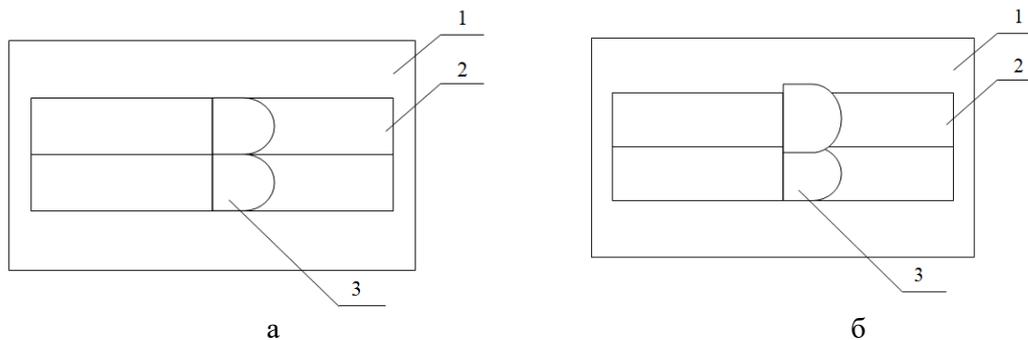


Рисунок 1 – Схема для вариантов расчета где: 1 – оснастка, 2 – лента препрега, 3 – фокусное пятно лазера

В рамках вычислительных экспериментов рассматривалось два термопластичных материала РЕЕК (полиэфирэфиркетон) и PPS (полифениленсульфид). В процессе переработки ленты препрега укладывались на металлическую оснастку. Область соприкосновения между верхним и нижним слоем лент препрега нагревалась движущимся лазерным лучом с температурой контактного пятна на поверхностях ленты препрега для первого материала 420°C и 280°C для второго. Теплофизические свойства анизотропных свойств термопластичного препрега были определены аналитически из свойств и соотношений, представленных в работах [1, 2]. В процессе моделирования было принято допущение, о том, чтобы рассматривать один источник нагрева на два слоя термопласта,

пренебрегая конвекцией между слоями в местах воздействия лазерного пятна, поскольку контакт между телами рассматривается как идеальный.

Для реализации последовательной выкладки лент препрега, с учетом межслоевого теплообмена разработан реализован алгоритм и программный модуль, интегрированный в систему инженерного анализа ANSYS.

По результатам численного моделирования были получены поля распределения температур, для удобства определения прогрева слоев были построены эпюры. Для материала РЕЕК эпюры представлены на рисунке 2.

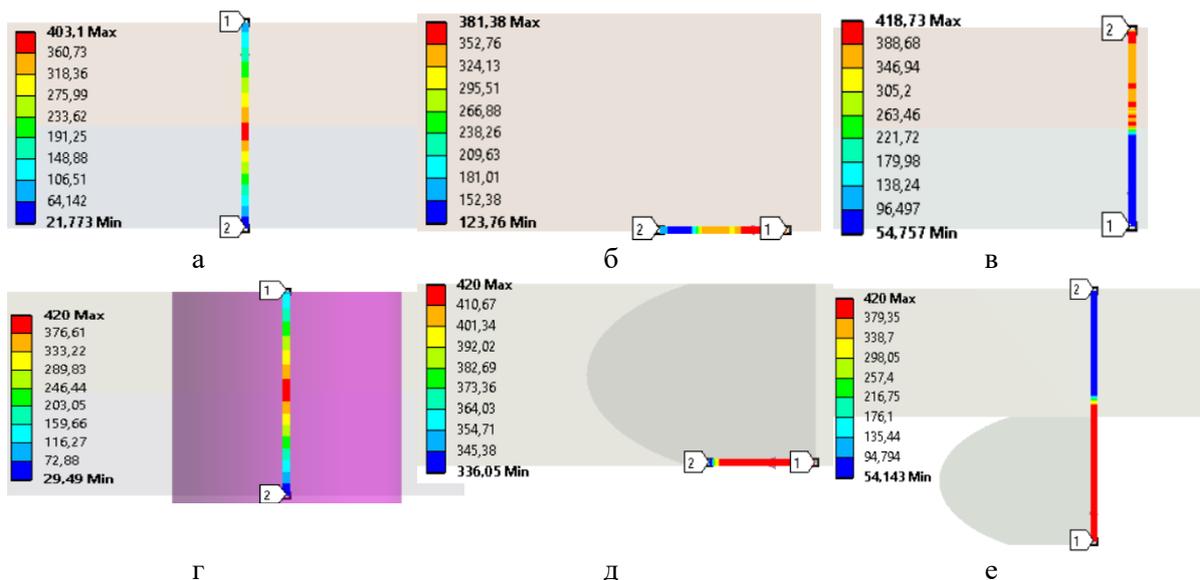


Рисунок 2 - Эпюры распределения температуры и графики зависимости от температуры от высоты, длины, ширины а, г – по высоте двух слоев в точке близкой к стыку двух слоев размещенных рядом; б, д – по границе слоев размещенных рядом на поверхности первого слоя; в, е – пересечение по ширине двух слоев размещенных рядом по поверхности первого слоя

Анализ полученных результатов выявил, что при использовании второго расчетного варианта происходит склеивание слоев препрега на основе РЕЕК и PPS при скорости движения источника 1 м/с.

Таким образом в рамках проведенных исследований разработана математическая модель, которая описывает нестационарные процессы прогрева лент термопластичного препрега, в процессе автоматизированной укладки. Выбрана скорость движения лазерного источника, обеспечивающая температуру формования рассматриваемых материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0261

#### Список литературы

1. Fedulov B.N., Saonov A.A., Kantor M.M., Lomov S.V. Modeling of thermoplastic composites solidification and estimation of residual stresses // COMPOSITES and NANOSTRUCTURES. - 2017. - V.9. - №2. - pp. 102-122.
2. Chukov D.I., Stepashkin A.A., Tcherdyntsev V.V., Olifirov L.K., Kaloshkin S.D. Structure and properties of composites based on polyphenylene sulfide reinforced with Al-Cu-Fe quasicrystalline particles // Journal of Thermoplastic Composite Materials. - 2017.

## ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОАКТИВНОГО СТРУКТУРНОГО ЭЛЕМЕНТА В ДИАПАЗОНЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР

*А.Н. АНОШКИН, П.В. ПИСАРЕВ, Ю.С. КИРОВА*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: pisarev85@live.ru

В последнее время при производстве изделий из композиционных материалов стали применяться SMART – конструкции. Они представляют собой особым образом структурированные системы, состоящие из подсистем считывания внешнего сигнала (воздействия), его обработки, функционального отклика, механизмов обратной связи, самодиагностирования и самовосстановления (в случае обратимости), управления геометрией. В процессе эксплуатации изделий с внедренными SMART-конструкциями возникают температурные перепады. При изменении температуры изменяются свойства компонентов конструкции, что приводит к изменению механических и электромеханических характеристик пьезоактуаторов. Поэтому разработка математических моделей и проведение численного моделирования SMART конструкции должно осуществляться с учетом изменения теплофизических характеристик активных элементов. В рамках настоящей работы проводится численное прогнозирование нелинейных теплофизических свойств актуатора, диапазоне рабочих температур.

В качестве объекта исследования рассматривается модельный образец пьезоактуатора с геометрическими размерами 28\*28\*0,296 мм. представленный на рисунке 1. Свойства компонент (эпоксидное связующее, PZT – волокно, медные электроды, каптон) диапазоне от 47 °С до -33 °С представлены в работах [2, 3].

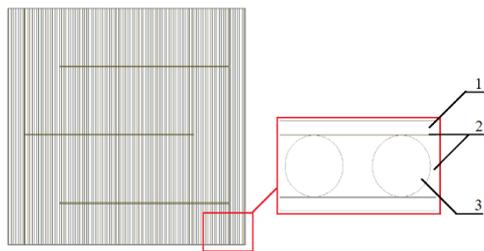


Рисунок 1 –Общий вид геометрической модели пьезоактуатора, где 1 – каптон, 2 – эпоксидное связующее, 3 – PZT волокна

На первом этапе исследования были определены коэффициенты теплопроводности в диапазоне рабочих температур актуатора. Результаты численного моделирования представлены в таблице 1. Анализ полученных результатов выявил, Коэффициент вдоль оси  $y$  имеет наибольшее значение, что объясняется ориентацией PZT- волокна в актуаторе. Для остальных направлений, можно отметить нелинейный рост коэффициентов теплопроводности, при увеличении температуры.

На втором этапе исследования проведено сравнение результатов численного моделирования для моделей прогрева образца композита оснащенного пьезоактуатором. с постоянными (модель 1) и переменными нелинейными теплофизическими свойствами (модель 2) пьезоактуатора. Расчеты проводились для температурного диапазона от 47 °С до -33 °С, рассматриваемое время прогрева 40 с.

По результатам проведенных исследований был получен градиент распределения температур. Ниже на рисунке 2 представлены результаты распределения температуры вдоль оси  $x$ .

*Секция 4 – Проблемы надежности машиностроения  
и машиностроительные технологии*

Таблица 1 – Значение коэффициентов теплопроводности модельного образца пьезоактуатора

Наименование, Вт/м*°С	Значение					
	T=-33°С	T=-13°С	T=0°С	T=20°С	T=27°С	T=47°С
Коэффициент теплопроводности пьезоактуатора вдоль оси x	0,3657	0,3721	0,3796	0,3839	0,3880	0,3926
Коэффициент теплопроводности пьезоактуатора вдоль оси y	2,3011	2,2772	2,2619	2,24	2,2383	2,2338
Коэффициент теплопроводности пьезоактуатора вдоль оси z	0,4326	0,4387	0,4447	0,4527	0,4563	0,4626

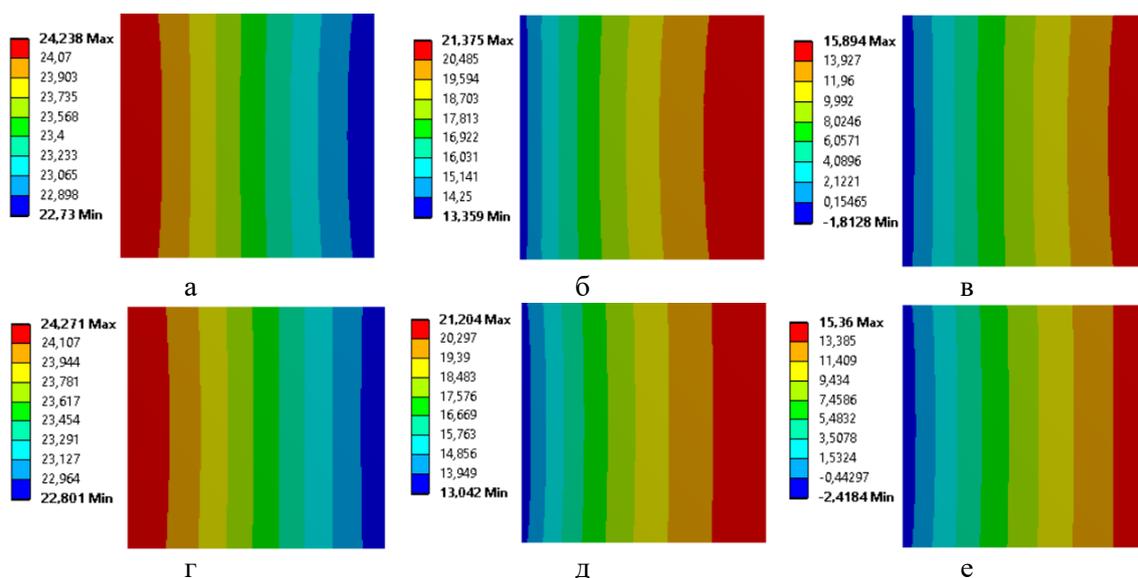


Рисунок 2 – Температурное распределение вдоль оси x в моменты времени: t=40 с. (а, г), t=80 с. (б, д), t=120 с. (в, е)

По результатам численных экспериментов выявлено, что при нагреве тепло распространяется быстрее в модели 2. При охлаждении Охлаждение конструкции происходит быстрее при постоянных свойствах. При расчете и проектировании конструкций содержащих пьезоактивные элементы важно учитывать нелинейность и изменение теплофизических характеристик в зависимости от температуры.

Таким образом, в рамках представленной работы получены анизотропные свойства для модельного образца пьезоактуатора. Проведены исследования по влиянию постоянных и зависящих от температуры свойств на распределения тепла внутри актуатора в диапазоне рабочих температур.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00722).

**Список литературы**

1. SMART MATERIAL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.smart-material.com/index.html>. (Дата обращения 25.07.2018).
2. G. Suchanek, A. Eydam, W. Hu, B. Kranz, W.-G. Drossel, G. Gerlach. Evaluation of polarization of embedded piezoelectrics by the thermal wave method // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. -2012. –Vol. 59. - № 9. –p. 1950-1954.
3. Yutopian Online. Thermal and mechanical properties of эпоху [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yutopian.com/Yuan/prop/Epoxy.html>. (Дата обращения 25.07.2018).

## ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ ТОКА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УПРОЧНЕННОЙ ЗОНЫ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Д.С.БЕЛИНИН, Ю.Д.ЩИЦЫН, С.Д.НЕУЛЫБИН, Е.А.КРИВОНОСОВА*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: 5ly87@mail.ru

Эффективность производства и качество продукции неразрывно связаны с проблемой полного использования возможностей, заложенных в конструкционных материалах и технологиях. В связи с вышесказанным актуальны исследования влияния технологических процессов комплексного воздействия на структуру и свойства рабочего слоя деталей и изделий. Использование плазменных технологий, таких как наплавка и плазменная поверхностная закалка, позволяет в широких пределах регулировать геометрические и прочностные характеристики рабочих поверхностей деталей и изделий [1]. На сегодняшний день большинство технологических процессов плазменной наплавки и поверхностной закалки выполняются на токе прямой полярности [2], что сопровождается рядом трудностей:

- частичный отпуск в местах наложения закаленных полос;
- необходимость зачистки поверхности упрочняемых изделий от различных загрязнений;
- необходимость принудительного охлаждения изделий малого диаметра и малой толщины.

Путем устранения описанных трудностей видится применение плазменной дуги прямого действия обратной полярности (рис.1), однако этот процесс применяется редко.

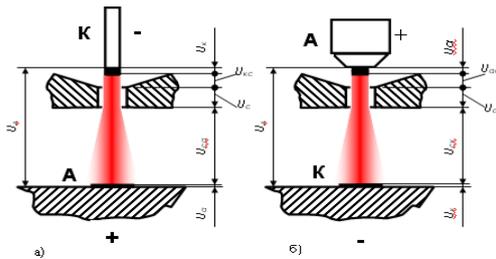


Рисунок 1 – Структурная модель плазменной дуги прямого действия (а – прямая полярность; б – обратная полярность)

Причиной этому является сложившееся мнение, что обработка на токе обратной полярности менее эффективна вследствие более медленных скоростей нагрева и охлаждения по сравнению с прямой полярностью. Кроме того, считается, что плазмотроны при работе на токе обратной полярности испытывают высокие тепловые нагрузки, а эффективный КПД процесса ниже чем при работе на прямой полярности. Однако результаты исследований позволяют предположить высокую эффективность использования плазменной дуги на токе обратной полярности для поверхностной термообработки [3,4].



Рисунок 2 – Внешний вид поверхности подвергнутой плазменной закалке на токе обратной полярности

Использование обратной полярности позволяет, за счет эффекта катодной очистки, проводить активацию поверхности. Также эффект катодной очистки позволяет значительно снизить требования к чистоте обрабатываемой поверхности (рис. 2). Широкие возможности регулирования мощности сжатой дуги и тепловложения в обрабатываемое изделие позволяют избежать необходимости принудительного охлаждения малогабаритных деталей и тонкостенных изделий.

Плазменная поверхностная обработка на токе обратной полярности, благодаря особенностям теплопередачи в изделии [5-7], позволяет получать упрочненные слои достаточной глубины без оплавления и изменения шероховатости рабочей поверхности. При таком варианте термообработки происходит равномерный нагрев по ширине упрочненной зоны и за счет катодных явлений на поверхности изделия, обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения необходимые для проведения закалки поверхности (рис.2).

Замеры микротвердости по глубине упрочненного слоя(рис.3) показывают, что на глубине упрочненного слоя до 0,8 мм при обработке дугой прямой полярности микротвердость закаленного слоя выше. В результате обработки на токе обратной полярности суммарная глубина упрочненного слоя выше чем при обработке на токе прямой полярности и достигает 1,2 – 1,4 мм со схожими значениями микротвердости по глубине упрочненного слоя.

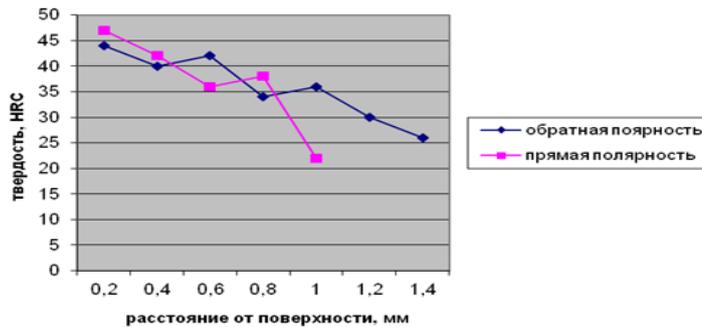


Рисунок 3 –  
Микротвердость по  
глубине рабочей  
поверхности ролика из  
стали 20X13

Таким образом проведенные исследования показывают эффективность применения плазменных технологий к упрочнению малогабаритных изделий. Однако при обработке на токе прямой полярности наблюдается некоторое подплавление поверхности, что не всегда удовлетворяет требованиям по чистоте рабочей поверхности и требует дальнейшей механической, а в ряде случаев и термической обработки. Причем при схожих параметрах режима глубина упрочненного слоя ощутимо меньше чем при обработке на токе обратной полярности.

При обработке на токе обратной полярности без оплавления поверхности удалось получить упрочненный слой малогабаритного изделия глубиной 1,5 мм без видимых следов подплавления и изменения шероховатости поверхности и за счет высокой локализации вводимого тепла со структурой ориентированного мартенсита. При таком варианте обработки получаем резкое изменение структуры и свойств тонкого поверхностного слоя с минимальным нагревом изделия вследствие особенностей теплопередачи в изделие при работе плазмотрона на токе обратной полярности. За счет высокоскоростного нагрева и охлаждения поверхности небольшой глубины образуется ориентированная мелкодисперсная структура мартенситного типа высокой твердости.

#### Список литературы

1. Сафонов Е.Н. Новые материалы и технологические процессы для продления ресурса прокатных валков // Е.Н. Сафонов. – Нижний Тагил: НТИ(ф) УГТУ – УПИ, 2005. – 212 с.
2. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов // Иркутск. Изд-во ИрГТУ. – 2006 – 180 с.
3. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. 2009. №2. С. 42 – 45.
4. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при сварке на обратной полярности. // Автоматическая сварка. 1971. №5. С.27-30.
5. Цветков, Ю.В. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления // Ю.В. Цветков, СЛ. Панфилов. М.: Наука, 1980. - 359 с.
6. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А. Влияние полярности на тепловые нагрузки плазмотрона. // Сварочное производство. 1997. №3. С. 23 – 25.
7. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Струков Н.Н., Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности //Сварка и диагностика. 2010. №3. С. 23 – 25.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ МНОГОГРАННЫМИ РЕЗЦАМИ**

*А.С.БИНЧУРОВ, Н.С.ИНДАКОВ, Ю.И.ГОРДЕЕВ, В.Б.ЯСИНСКИЙ*

Сибирский федеральный университет

E-mail: mehanixs@mail.ru

Необходимым условием для эффективной реализации нового метода ротационного точения многогранными резцами (РТМР) [1, 2] является всестороннее изучение влияния геометрических и кинематических факторов, режимов резания на силы резания действующие на резец при РТМР. Экспериментальные исследования силовых характеристик проводились на токарно-винторезном станке 16К20 с применением специально спроектированного и изготовленного измерительного инструментального узла [3, 4]. Для определения функциональных взаимосвязей между одним из параметров режимов резания и переменной составляющей сил резания проводились серии однофакторных экспериментов. Такие взаимосвязи хорошо отображаются кривыми параболического или гиперболического типа. Их наиболее удобно аппроксимировать степенной функцией вида  $y=Cx^k$  [5]. В качестве независимых переменных были приняты следующие параметры режимов резания:  $S_{np\text{cm}}$  – продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, 0,2...1 мм/об;  $S_{кр}$  – круговая подача заготовки [мм],  $n_3$  – число оборотов заготовки, 315...1000 об/мин;  $n_p$  – число оборотов инструмента, 6000...18000 об/мин;  $t$  – глубина резания, 0,1...0,9 мм (при оптимизированных предварительно геометрических параметрах инструмента). Результаты измерений представлены в графической форме на рисунке 1.

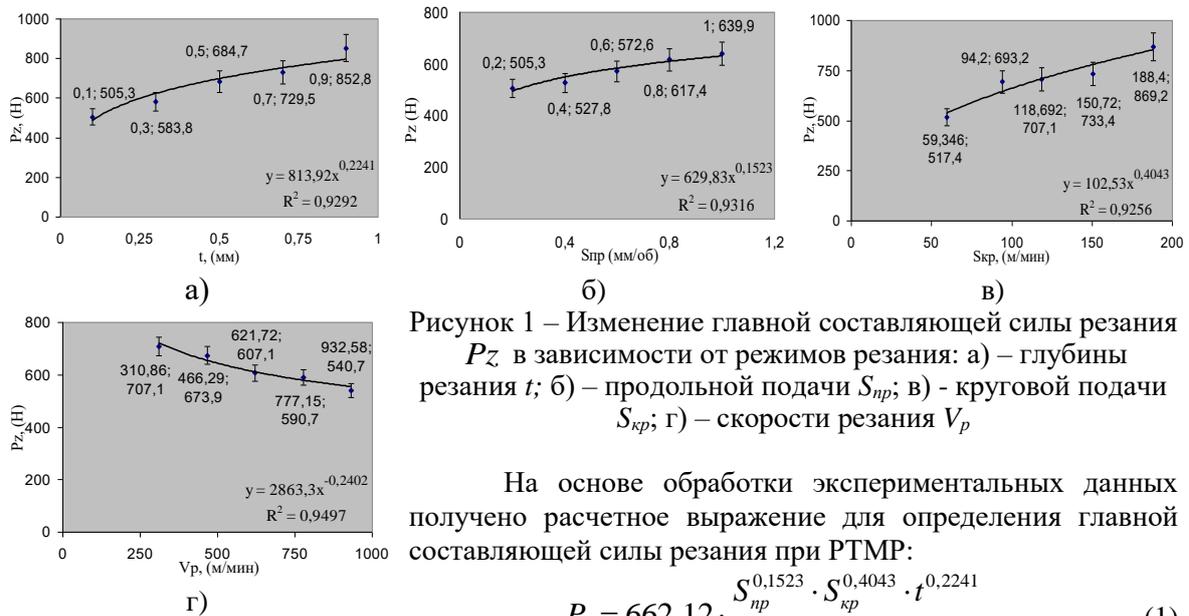


Рисунок 1 – Изменение главной составляющей силы резания  $P_z$  в зависимости от режимов резания: а) – глубины резания  $t$ ; б) – продольной подачи  $S_{np}$ ; в) - круговой подачи  $S_{кр}$ ; г) – скорости резания  $V_p$

На основе обработки экспериментальных данных получено расчетное выражение для определения главной составляющей силы резания при РТМР:

$$P_z = 662,12 \cdot \frac{S_{np}^{0,1523} \cdot S_{кр}^{0,4043} \cdot t^{0,2241}}{V_p^{0,2402}}. \quad (1)$$

Результаты экспериментальных исследований позволили установить характер влияния технологических (глубины резания,  $t$ ; продольной подачи,  $S_{np}$ ; круговой подачи,  $S_{кр}$ ; скорости резания,  $V_p$ ) и конструктивных факторов (геометрических и кинематических параметров инструмента) на главную составляющую силы резания  $P_z$ . Использование полученной полуэмпирической расчетной формулы позволяет устанавливать рациональные режимы резания для повышения производительности процесса РТМР при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности. Одновременно с измерением усилия резания оценивалось

распределение температуры на поверхностях многолезвийного инструмента, стружки и детали бесконтактным методом с помощью тепловизора модели testo 875-1 (рисунок 2).

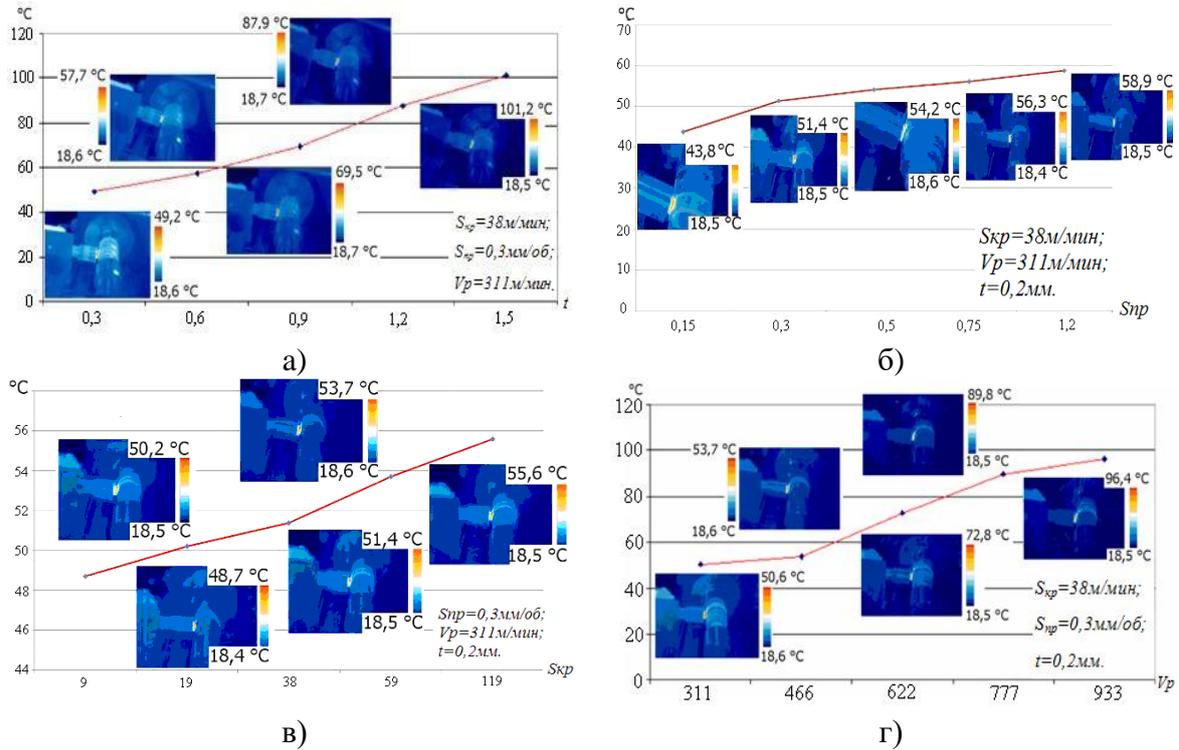


Рисунок 2 – Влияние технологических параметров на температуру в зоне резания:  
а) глубины резания  $t$ ; б) продольной подачи  $S_{пр}$ ; в) круговой подачи  $S_{кр}$ ;  
г) – скорости резания  $V_p$ .

Экстремально низкие значения температур (до  $100^\circ\text{C}$ ) на поверхности инструмента объясняются дискретностью процесса и спецификой формирования нового элементного типа стружки при РТМР. Полученные численные значения температур и усилий резания при РТМР (до 900Н) существенно ниже, чем при точении вершинными резцами (до 4000Н) при аналогичных значениях  $t$  и  $S_{пр}$ . Это является предпосылкой для повышения стойкости инструмента и качества обработки поверхностей.

#### Список литературы

1. Индаков Н.С., Бинчуров А.С. Особенности ротационного точения многогранными резцами // Вестник машиностроения. - 2013. - №10. - С. 56-58.
2. Indakov N.S., Gordeev Y.I., Binchurov A.S. Method of Rotational Turning With Multifaceted Cutters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. – 2016. – Vol.124. – № 1. – p. 012150.
3. Gordeev, Y. I., Indakov, N. S., Binchurov, A. S., Yasinski, V. B., & Lipeshev, A. A. Investigation of cutting temperature and chip formation during rotational turning by multifaceted cutters // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803. – № 1. IOP Publishing, – pp. 012055.
4. Индаков Н. С., Бинчуров А. С. Кинематика ротационного точения многогранными резцами //Высокие технологии в современной науке и технике. – Томск, 2014. – С. 336-339.
5. Dessoly V., Melkote S. N., Lescalier C. Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – № 14. – p. 1463-1470.

---

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЧАСТИЦ  
ПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО  
СПЛАВЛЕНИЯ**

*В.И. БОГДАНОВИЧ, М.Г. ГИОРБЕЛИДЗЕ*

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

E-mail: bogdanovich@ssau.ru

В настоящее время широкое применение цепочки современных программных комплексов автоматизированного проектирования изделий, инженерного анализа и автоматизированного производства в сочетании с новыми технологическими решениями, к которым относятся аддитивные технологии, в частности селективное лазерное сплавление порошковых материалов, фактически формируют новый технологический уклад в современном производстве.

Наряду со значительными преимуществами, которые предоставляет метод селективного лазерного сплавления (СЛС), имеется существенная проблема технологического характера, которая заключается в поиске оптимального режима сплавления отдельных порошковых частиц в слое материала. Решение данной проблемы осуществляется разными путями. Анализ публикаций [1-17] указал на два основных направления поиска оптимального режима – путем математического моделирования значимых этапов процесса и экспериментальных исследований металлографических шлифов материала после лазерной обработки. В публикациях по математическому моделированию следует отметить два подхода к решению поставленной задачи. Первый предполагает представление порошкового слоя в виде сплошного материала, для каждой доли объема которого известны физико-механические свойства. Такая постановка делает возможным решение тепловых задач нагрева, плавления и позволяет учесть изменение размеров такого слоя. Во втором подходе принимается во внимание, что слой состоит из отдельных частиц, отличающихся по размерам. В данном случае на первый план выходит задача определения теплового состояния отдельных частиц и на основе этой информации делаются выводы о растекании материала и образовании или «залечивании» пор. В этих работах делается вывод, что диапазон режима лазерной обработки, при котором формируются требуемый по качеству материал, очень узок и требует значительного объема численных и экспериментальных исследований. Анализ публикаций [1-17] показывает, что потенциальные характеристики материала, получаемого из порошка при его послойном сплавлении, определяются режимом лазерной обработки отдельной частицы. Оптимальный режим обработки должен обеспечивать проплавление нижней части частицы для создания гарантированного контакта с частицами нижнего слоя. Следовательно, при математическом моделировании процесса оценки термического состояния частиц необходимо учесть плавления материала в диапазоне солидуса и ликвидуса и учет их возможного нагрева до температуры испарения поверхности.

В работе проведено численное исследование тепловой трансформации порошковых частиц в процессе СЛС. В работе представлена новая математическая модель, которая учитывает: особенности передачи энергии лазерного излучения частицам с размерами меньшими, но сравнимыми с размером диаметра пятна лазерного излучения; особенности несимметричной постановки нагрева и передачу энергии через верхнюю часть частицы с поглощением излучения в зависимости от угла его падения; процесс испарения материала; зависимость параметров от температуры. Установлены закономерности процесса и показано, что разброс размеров частиц порошковой фракции предопределяет принципиальную возможность выбора оптимального режима для получения более качественного однородного материала после лазерного сплавления. Дана простая аналитическая оценка этого диапазона рассеивания размеров частиц.

### Список литературы

1. Колдоба А.В., Повещенко Ю.А., Попов М.В. Математическое моделирование лазерного спекания двухкомпонентных порошковых смесей // Электронный журнал Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2009. – № 38. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-38> (дата обращения 31.07.2018).
2. Khairallah Saad A., Andy Anderson. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214, Issue 11. – P. 2627-2636.
3. Gusarov A.V., Smurov I. Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – P. 381-394.
4. Foroozmehr Ali, Mohsen Badrossamay, Ehsan Foroozmehr, Sa'id Golabi. Finite Element Simulation of Selective Laser Melting process considering. Optical Penetration Depth of laser in powder bed // Materials & Design. – 2016. – Vol. 89. – P. 255-263.
5. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Enhancing thermal barrier coatings performance through reinforcement of ceramic topcoat // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156 (1), article number 012016.
6. Huang Y., Yang L.J., Du X.Z., Yang Y.P. Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during // International Journal of Thermal Sciences. – 2016. – Vol. 104. – P. 146 – 157.
7. Leitz K.-H., Singer P., Plankensteiner A., Tabernig B., Kestler H., Sigl L.S. Multi-physical simulation of selective laser melting // Metal Powder Report. – 2017. – Vol. 72, Issue 5. – P. 331-338.
8. Francois M.M., Sun A., King W.E., Henson N.J., Tournet D., Bronkhorst C.A., Carlson N.N., Newman C.K., Haut T., Bakosi J., Gibbs J.W., Livescu V., Vander Wiel S.A., Clarke A.J., Schraad M.W., Blacker T., Lim H., Rodgers T., Owen S., Abdeljawad F., Madison J., Anderson A.T., Fattebert J.-L., Ferencz R.M., Hodge N.E., Khairallah S.A., Walton O. Modeling of additive manufacturing processes for metals: Challenges and opportunities // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2017. – Vol. 21, Issue 4. – P. 198-206.
9. Кривелев М.Д., Харанжевский Е.В., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей. – М.: ИПУ РАН, 2010. С. 299-322.
10. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. – СПб.: - Изд-во Питер, 2015. – 348 с.
11. Arisoy Y.M., Criales L.E., Özel T., Lane B., Moylan S., Donmez A. Influence of scan strategy and process parameters on microstructure and its optimization in additively manufactured nickel alloy 625 via laser powder bed fusion // Int. J. Adv. Manuf. Technology. – 2017. – Vol. 90, Issue 5-8. – P. 1393-1417.
12. Boley C.D., Khairallah S.A., Rubenchik A.M. Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54. – P. 2477-2482.
13. Grasso M., Colosimo B.M. Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review // Measurement Science and Technology. – 2017. – Vol. 28. – P. 1-25.
14. Huang Q., Hu N., Yang X., Zhang R., Feng Q. Microstructure and inclusion of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting // Frontiers Mater. Sci. – 2016. – Vol.10. – P. 428-431.
15. Knol M.F. Thermal modelling of selective laser melting.: Phd Thesis. Delft University of Technology, 2016. – 79 p.
16. Popovich V.A., Borisov E.V., Popovich A.A., Sufiiarov V.Sh., Masaylo D.V., Alzina L. Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties // Materials & Design. – 2017. – Vol. 114. – P. 441-449.
17. Zeng K. Optimization of support structures for selective laser melting: Phd dissertation. Louisville, 2015. – 201 p.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ КАПЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ СПЛОШНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

*С.В. ВАРУШКИН, Д.Н. ТРУШНИКОВ, Д.С. ШАМОВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: stepan.varushkin@mail.ru

Для аддитивного производства с незначительными адаптациями могут быть использованы многие стандартные сварочные процессы, такие как: дуговая, лазерная, электронно-лучевая сварка. Применением проволочных материалов для аддитивного производства является интересной альтернативой применению порошковых материалов ввиду простоты процесса и относительно больших скоростей наплавки. [1]

При электронно-лучевой наплавке с использованием сплошной проволоки в качестве присадочного материала, качество получаемого наплавленного валика зависит от множества факторов. При этом основными характеристиками качества процесса наплавки являются точность и характер переноса расплавленного металла проволоки в наплавляемый валик [1-3].

Целью данной работы являлось исследование тормозного рентгеновского излучения из зоны электронно-лучевой наплавки сплошной проволокой для регистрации режима переноса расплавленного металла проволоки в наплавляемый валик.

На начальной стадии исследования было выполнено моделирование процесса формирования тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке сплошной проволокой. Результаты моделирования показали, что, при непрерывной осцилляции электронного луча, в спектре сигнала рентгеновского излучения из зоны наплавки присутствует информационная составляющая, напрямую коррелирующая с размером жидкой фазы на торце присадочной проволоки. При этом, при решении динамической задачи, была выявлена возможность использования этой информационной составляющей для отслеживания изменения во времени размеров капли расплавленного металла на торце присадочной проволоки, следовательно, и процесса переноса металла с проволоки к наплавляемому валику.

Для исследования реализации предполагаемого метода была проведена серия экспериментов. Экспериментальная часть исследования проводилась на установке электронно-лучевой сварки с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ, схема эксперимента представлена на рисунке 1.

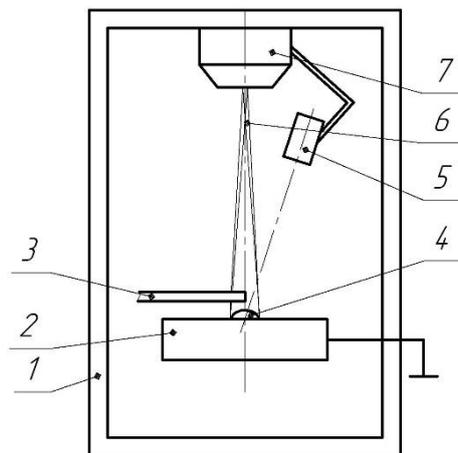


Рисунок 1 – Схема проведения экспериментальной части исследования.

1 – вакуумная камера; 2 – подложка; 3- присадочная проволока; 4 – наплавляемый валик;  
5 – датчик рентгеновского излучения; 6 – электронный луч; 7 – электронно-лучевая пушка.

В качестве подложки использовалась сталь 12Х18Н10Т, а в качестве присадочного материала – проволока 308L Si диаметром 0,8 мм. Для формирования дополнительной информационной составляющей в спектре сигнала рентгеновского излучения из зоны наплавки, была применена непрерывная кольцевая осцилляция электронного луча. Эксперименты проводились при изменении: скорости перемещения подложки, скорости подачи присадочной проволоки, высоты от наплавляемого валика до присадочной проволоки. При этом были исследованы режимы переноса металла проволоки к наплавляемому валику: крупнокапельный перенос, мелкокапельный перенос, струйный перенос, подача присадочной проволоки в жидкую ванну наплавляемого валика. В процессе наплавки регистрировался сигнал рентгеновского излучения из технологической зоны и записывался в файл для дальнейшей обработки. В качестве датчика рентгеновского излучения применялся сцинтилляционный детектор на основе монокристалла активированного йодистого цезия и кремниевый фотоэлектронный умножитель. Датчик рентгеновского излучения располагался на расстоянии 80 мм от зоны наплавки, под углом 45 градусов к оси электронного луча.

Математическая обработка записанного сигнала заключалась в фильтрации и представлении исходного сигнала в виде функции  $S(t)$ , соответствующей циклу осцилляции электронного луча. Было выявлено: при капельном переносе – возможность идентификации размера капли и частоты обрыва капли, а также возможность идентификации струйного переноса или режима подачи проволоки в жидкую ванну. На рисунке 2 представлен обработанный сигнал рентгеновского излучения из зоны наплавки.

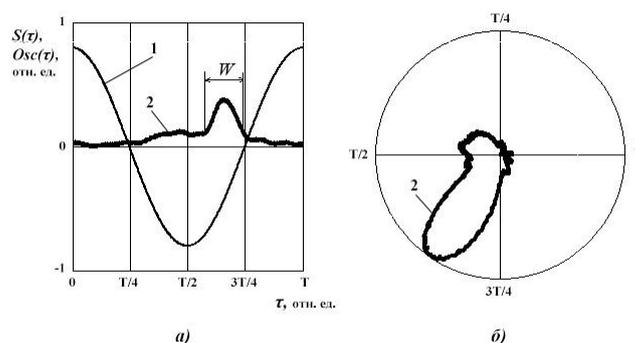


Рисунок 2 – Сигнал рентгеновского излучения из зоны наплавки после математической обработки в осях (а) и в полярных координатах (б). 1 – сигнал тока в катушке отклонения по оси X ( $Osc(t)$ ); 2 – сигнал рентгеновского излучения  $S(t)$ .

Отслеживание размера капли происходит по изменению ширины  $W$  импульса рентгеновского излучения, а по частоте ее колебания – частоту обрыва капли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках соглашения С-26/787 от 21.12.2017 и Российского фонда фундаментальных наук РФФИ №18-08-01016 А.

#### Список литературы

1. J. Fuchs, C. Schneider, N. Enzinger Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // *Welding in the World*. – 2018. – Т. 62. – № 2. – С. 267-275.
2. D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Т. 81. – № 1-4. – С. 465-481.
3. M.St. Węglowski, S. Błacha, J. Pilarczyk, J. Dutkiewicz, Ł. Rogal Electron beam additive manufacturing with wire – Analysis of the process // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Т. 1960. – С. 140015.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ-  
ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ**

*А.О.ГРИШАРИН, Н.Д.ОГЛЕЗНЕВ, К.Р.МУРАТОВ, Т.Р.АБЛЯЗ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: a.grisharin@gmail.com

Технология копировально-прошивной электроэрозионной обработки (ЭЭО) позволяет выполнять геометрически сложные конструктивные элементы с высокой точностью и частотой шероховатости поверхности вне зависимости от твердости обрабатываемого материала [1, 2].

ЭЭО применяется для выполнения рабочих элементов ответственных деталей, таких как корпуса и шестерни редукторов, копиры, рабочие детали гидродомкратов и другие. В связи с особенностями конструкций и условиями работы данных деталей, для их изготовления используют высокопрочные сплавы.

Стойкость электрода-инструмента (ЭИ) при ЭЭО определяет точность обработки.[3]. Физико-механические свойства материала ЭИ, геометрические параметры и режимы обработки являются ключевыми факторами, влияющими на износостойкость ЭИ [4]. Для изготовления ЭИ широко применяют медь и графит.

В ряде случаев, применение метода ЭЭО становится нецелесообразно в связи с низкой производительностью и интенсивным износом ЭИ. Эффективным методом повышения производительности и износостойкости ЭИ является применение для их изготовления материалов с повышенными электротехническими свойствами [5].

В ПНИПУ разработан ряд материалов электротехнического назначения, способных значительно повысить электроэрозионные свойства ЭИ. Одним из перспективных материалов является композиционный материал типа псевдосплав системы медь-коллоидный графит с содержанием графита менее 2%, однако данный материал не находит широкого применения в ЭЭО [6]. Это связано с тем, что не в полной мере изучены эксплуатационные свойства данного материала при ЭЭО различных групп сплавов. Актуальной задачей является исследование эксплуатационных свойств ЭИ при ЭЭО разнородных сплавов.

Цель работы: исследование эксплуатационных свойств ЭИ из композиционного материала типа псевдосплав системы медь-коллоидный графит с содержанием графита менее 2% при ЭЭО титановых и алюминиевых сплавов, сплавов на основе вольфрама, а так же легированной стали.

Для проведения эксперимента были изготовлены ЭИ из меди и графита, а так же электрод из композиционного материала системы медь-коллоидный графит. Для изготовления ЭИ из композиционного материала были использованы порошок меди ПМС-1 ГОСТ 49-60-75 и порошок сухого коллоидного графита С-1 ТУ 113-08-48-63-90. В качестве образцов материалов были выбраны сплавы ОТ-4; АК6; ВК8 и сталь 35ГС. ЭЭО выполнялась на станке Smart CNC, на черновых режимах.

При ЭЭО сплава АК6, ЭИ из композиционного материала показал более высокую износостойкость: в 3,5 раза выше чем у медного ЭИ, при этом производительность оказалась в 1,1 раза ниже чем у меди, ЭИ из графита шаржировался, таблица 1.

Таблица 1 – Результаты ЭЭО сплава АК6

Материал электрода	Шероховатость детали (Ra)	Шероховатость электрода (Ra)	Износ электрода (гр.)	Глубина обработка (мм.)
Медь	8,3131	0,9872	0,0014	1,2121
Графит	6,9828	0,9310	шаржировался	1,24
Композит	8,3687	0,8480	0,0004	1,08

При ЭЭО стали 35ГС, ЭИ из композиционного материала показал не только более высокую износостойкость ЭИ (в 3,8 раза выше чем у меди), но и более высокую производительность: в 2,4 раза выше чем у меди и графита. Шероховатость поверхности

обрабатываемого материала после ЭЭО была получена немного хуже, чем после ЭЭО другими ЭИ, таблица 2.

Таблица 2 – Результаты ЭЭО стали 35ГС

Материал электрода	Шероховатость детали (Ra)	Шероховатость электрода (Ra)	Износ электрода (гр.)	Глубина обработки (мм.)
Медь	5,5095	1,0256	0,0023	0,1120
Графит	5,4083	1,4088	шаржировался	0,1124
Композит	6,7746	2,8705	0,0006	0,276

При ЭЭО сплава ОТ-4 (таблица 3), ЭИ из композиционного материала показал высокую производительность: в 21,2 раза выше чем у меди и в 3,9 раза выше чем у ЭИ из графита, однако шероховатость поверхности обрабатываемого материала после ЭЭО была получена значительно хуже чем после ЭЭО другими ЭИ, таблица 3.

Таблица 3 – Результаты ЭЭО сплава ОТ-4

Материал электрода	Шероховатость детали (Ra)	Шероховатость электрода (Ra)	Износ электрода (гр.)	Глубина обработки (мм.)
Медь	2,8615	2,4104	0,0048	0,0127
Графит	3,9301	2,5033	шаржировался	0,069
Композит	5,1555	1,9380	0,0035	0,2691

При ЭЭО сплава ВК-8, ЭИ из композиционного материала обладал самыми низкими показателями износостойкости и производительности, а частота шероховатости обрабатываемой поверхности была получена в разы ниже чем после обработки ЭИ из меди и графита, таблица 4.

Таблица 4 – Результаты ЭЭО сплава ВК-8

Материал электрода	Шероховатость детали (Ra)	Шероховатость электрода (Ra)	Износ электрода (гр.)	Глубина обработки (мм.)
Медь	0,4517	2,6592	0,0099	0,0095
Графит	2,7619	2,9384	шаржировался	0,0112
Композит	8,6498	6,1635	0,0326	0,0024

Исходя из результатов эксперимента, можно сделать вывод что ЭИ из композиционного материала системы медь-коллоидный графит с содержанием графита менее 2% целесообразно использовать для повышения эффективности ЭЭО алюминиевого сплава АК6 и стали 35ГС, а так же для черновой ЭЭО титанового сплава ОТ-4. Для ЭЭО сплава ВК-8 на основе вольфрама, ЭИ из композиционного материала не подходит.

#### **Список литературы**

1. Смоленцев, В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: в 2 т. Т. 1. / В.П. Смоленцев.- М.: Высшая школа, 1983.-247 с.
2. Елисеев Ю.С., Савушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Б.П. Савушкина. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2010 – 437 с.
3. Абляз, Т.Р. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учебное пособие / Т. Р. Абляз, А. М. Ханов, О. Г. Хурматуллин. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. – 120 с.
4. Сьянов, С.Ю. Определение остаточных напряжений, износа инструмента и производительности при электроэрозионной обработке/ С.Ю. Сьянов //Вестник Брянского государственного технического университета. -2006.- №2 (10).- С.29-61.
5. Потапов, В.А. Высокоскоростное фрезерование и электроэрозионная обработка: союзники или соперники [Электронный ресурс]/ В.А. Потапов// Режим доступа: [http://www.instrstan.com/text/text\\_38.html](http://www.instrstan.com/text/text_38.html)
6. Оглеzneв, Н.Д. Разработка композиционных материалов электродов-инструментов с улучшенными эксплуатационными характеристиками для обработки металлических сплавов[Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06/ Н.Д. Оглеzneв. – Красноярск, 2015. – 7 с.

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХМИНИАТЮРНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

С.Ф. ДМИТРИЕВ, А.М. САГАЛАКОВ, В.Н. МАЛИКОВ, А.А. ГРИГОРЬЕВ

Алтайский государственный университет

E-mail: mirotnas@gmail.com

Метод вихревых токов (МВТ) наряду с ультразвуковыми и рентгеноскопическими исследованиями является одним из основных неразрушающих методов контроля различных материалов и изделий в современной технике. Метод основывается на исследовании взаимодействия электромагнитного поля специального датчика - вихретокового преобразователя (ВТП) и исследуемого объекта [1].

В настоящее время среди объектов неразрушающего контроля особое место занимают металлополимерные слоистые композиты (МПСК). Простейшие МПСК - это, например, листовые материалы облицовочных панелей, сотовые панели, щиты звуко- и теплоизоляции самолетов, отражающие радиацию покрытия оборудования и приборов, декоративные металлопластиковые панели, материалы для изготовления печатных плат РЭА и другие подобные композиты, содержащие от одного до двух и более металлических слоев, разделенных диэлектрическими прослойками. К МПСК относятся и широко используемые в быту металлопластиковые трубы, в которых металлический, алюминиевый слой композита находится между слоями сшитого полиэтилена высокого или низкого давления (ПЭВД, ПЭНД) различной толщины [2].

Дефектоскопия МПСК осуществляется для определения следующих типовых дефектов: нарушений сплошности металлического и (или) полимерного слоя, количество и толщина слоев, проводящие и непроводящие перемычки между слоями, деформация поверхности металлического слоя, изменение состояния границы раздела между металлическими и полимерными слоями МПСК. При этом одним из универсальных параметров, чувствительных ко всем перечисленным дефектам МПСК, является величина локальной электропроводности материала и ее распределение по поверхности, связанная с топологией электромагнитного поля в материале, взаимодействующего с указанными дефектами.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности обнаружения дефектов типа несплошности в МПСК на основе алюминия и ПЭНД типа А1-(ПЭНД- Me)п-А1, а также визуализация образов таких дефектов с помощью прибора ИЭНМ-5ФА.

МПСК и модели их дефектов изготавливали чередованием слоев алюминиевой или медной фольги, толщиной 20-100 мкм со слоями пленки из полиэтилена, толщиной 20 мкм или со слоями парафинированной бумаги толщиной 50-100 мкм.

Дефекты строения МПСК моделировали пропуском или увеличением количества отдельных слоев, а дефекты сплошности и перемычек - вырубанием в фольге или слое диэлектрика круглого или прямоугольного отверстия.

На рис. 1 приведена зависимость показаний прибора ИЭНМ-5ФА при удалении его датчика от поверхности МПСК А1-ПЭНД-А1, расположенного на медной основе, толщиной 5 мм.

МПСК, использованный в данном эксперименте, был получен чередованием двух слоев алюминиевой фольги (20 мкм) одним слоем полиэтилена низкого давления (20 мкм), измерения проведены на частоте возбуждения 35 кГц, материал основы – медь.

Как следует из рис. 1, образец такого МПСК по отношению к медной основе выполняет функцию экрана, введенного в зазор между датчиком прибора и медной основой и постепенно ослабляющего измеренный сигнал. На расстоянии 100-250 мкм от поверхности МПСК наблюдается участок, на котором показания прибора сохраняют постоянные значения. Очевидно, что на таком удалении от проводящей медной основы топология поля вихревых токов контролируемого образца воспринимается датчиком прибора как поле от

однородной среды и появление любого дефекта в материале вызовет отклонение его показаний от среднего значения, измеренного на расстоянии 100-250 мкм.

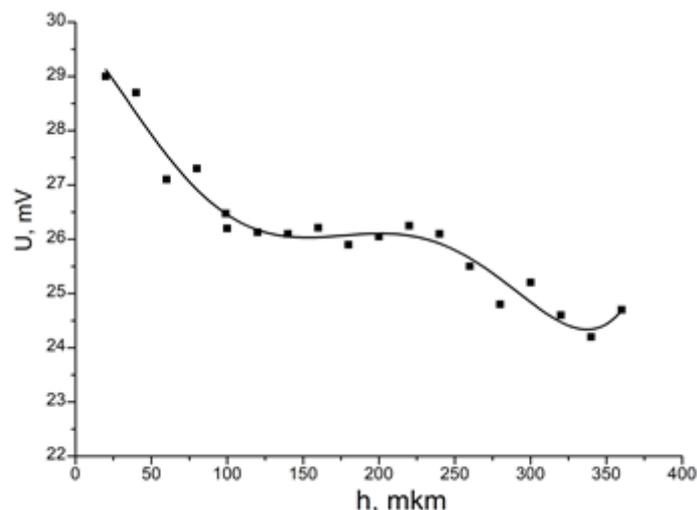


Рисунок 1 – Зависимость условной электропроводности 3-слойного МПСК Л1-ПЭНД-Л1, размещенного на медной основе, от зазора до СМВТП, U – амплитуда сигнала на измерительной обмотке ВТП, h – величина зазора от измерительной обмотки ВТП до объекта контроля

Проведение дефектоскопии МПСК в таком случае возможно при настройке показаний прибора на ноль на бездефектной области (с постоянным значением условной электропроводности) и использовании полого наконечника, выдерживающего постоянное расстояние между поверхностью материала и СМВТП в интервале 100-250 мкм.

Измерения, проведенные нами на модельных дефектах типа нарушения количества и порядка слоев для многослойных МПСК систем А1(Си)-ПЭНД-А1(Си), показали изменение величины условной электропроводности до 3-7 мВ в зоне дефекта, при абсолютной допускаемой погрешности прибора 0,1-0.1-0.3 мВ, т. е. 20-30-кратное превышение сигнала дефекта над шумом. Появление любого из указанных дефектов в зоне контроля вызывает резкое изменение топологии поля и относительных показаний прибора.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ** в рамках научного проекта №18-38-00272 «Исследование сплавов, композиционных и полупроводниковых материалов, сверхтонких проводящих пленок с помощью миниатюрных и сверхминиатюрных вихрековых преобразователей».

#### Список литературы

1. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 252 с.
2. Расщепкин А.К. Сравнительный анализ композиционных материалов для изготовления труб нефтяной и химической промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Raschepkin/Raschepkin\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Raschepkin/Raschepkin_1.pdf) – 28.07.18.

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

*Д.О. ДОЛМАТОВ, Д. А. СЕДНЕВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: dolmatovdo@tpu.ru

Повышение достоверности результатов ультразвуковой дефектоскопии является одним из наиболее актуальных вопросов, связанных с развитием приборов для данного вида неразрушающего контроля. Для решения данной задачи разрабатываются и внедряются системы ультразвуковой томографии, которые позволяют получать результаты контроля в виде изображений внутренней структуры объектов контроля. В таких системах используются, как правило, фазированные антенные решетки и методы электронной или виртуальной фокусировки [1]. Преимуществом методов виртуальной фокусировки перед методами электронной фокусировки является возможность получения более высокой фронтальной разрешающей способности при использовании одних и тех же ультразвуковых преобразователей [2].

Методы виртуальной фокусировки подразумевают использование специальных методов регистрации ультразвуковых сигналов элементами фазированной решетки и применении алгоритмов пространственно-временной обработки зарегистрированных сигналов. Для сбора данных применяется метод двойного сканирования, который заключается в поочередном зондировании объекта контроля каждым из элементов фазированной решетки и регистрации отраженных от несплошностей эхо-сигналов всеми элементами фазированной антенной решетки. Для получения изображения внутренней структуры объекта осуществляется пространственно-временная обработка зарегистрированных сигналов с использованием специальных алгоритмов.

Для повышения скорости осуществления ультразвуковой томографии целесообразно использовать высоскоростные алгоритмы пространственно-временной обработки. В этой связи интерес представляют алгоритмы расчета в частотной области. Реализация алгоритмов расчета в частотной области для ультразвуковой томографии должна учитывать сложный характер распространения акустических волн, который может быть обусловлен, например, наличием сред с различными акустическими свойствами, что имеет место при использовании иммерсионного акустического контакта.

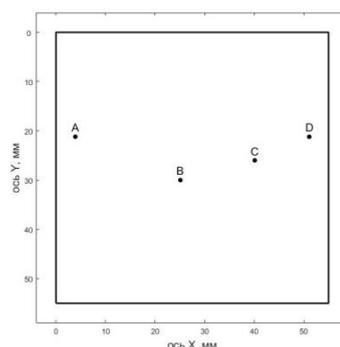


Рисунок 1 – Расположение дефектов в тестовом образце

В рамках данной работы был реализован алгоритм ультразвуковой томографии, основанный на расчетах в частотной области. Алгоритм основан на методе фазового сдвига и преобразовании Столта [3,4].

Проверка возможностей разработанного алгоритма осуществлялась с помощью эксперимента. Для этих целей алгоритм был реализован в программном пакете Matlab

R2016b. В качестве объекта контроля использовался стальной блок с боковыми просверленными отверстиями диаметром 1 мм, который помещался в иммерсионную ванну, заполненную водой. Расположение отверстий представлено на рисунке 1.

В качестве преобразователя применялась фазированная антенная решетка Olympus 5L16-A10, состоящая из 16 элементов с частотой 5 МГц. Расстояние между центрами соседних элементов ФАР — 0,6 мм. Ультразвуковые данные регистрировались при перемещении преобразователя на 1 мм вдоль поверхности объекта контроля. В каждой позиции преобразователя данные регистрировались в режиме двойного сканирования.

Полученные эхо-сигналы подвергались пространственно-временной обработке с использованием разработанного алгоритма. В результате этого было получено синтезированное изображение дефектов в объекте контроля, представленное на рисунке 2.

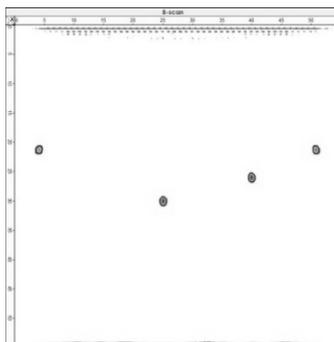


Рисунок 2 – Синтезированное изображение полученное в результате применения разработанного алгоритма к экспериментальным данным

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что получена точная реконструкция каждого из отажателей, расположенных в тестовом образце. В этой связи в дальнейшем целесообразно провести анализ вычислительной эффективности разработанного алгоритма, а также его сравнение с алгоритмами пространственно-временной обработки, реализованными в коммерческих программных обеспечениях по качеству получаемых изображений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2018-2020 годы (№ СП-1836.2018.5 и № СП-1827.2018.2)

#### **Список литературы**

1. Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. Сканирование в ультразвуковой томографии // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – №. 3. – С. 7-10.
2. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. – 2013. – №. 7. – С. 51-75.
3. Stolt R. H. Migration by Fourier transform // Geophysics. – 1978. – Т. 43. – №. 1. – С. 23-48.
4. Gazdag J. Wave equation migration with the phase-shift method // Geophysics. – 1978. – Т. 43. – №. 7. – С. 1342-1351.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

*Ю.А. ЖИЛЬЦОВА, Е.А. ЕФРЕМЕНКОВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная  
школа новых производственных технологий

E-mail: zhiltsovaya@rambler.ru

Зубчатые соединения получили широкое распространение во всех отраслях машиностроения. Зубчатые соединения предназначены: для передачи вращательного движения между валами, которые могут иметь параллельные, пересекающиеся и скрещивающиеся оси, а также для преобразования вращательного движения в поступательное, и наоборот. При этом усилие от одного элемента к другому передаётся с помощью зубьев. Обычно число зубьев на сопряжённых зубчатых колёсах стремятся делать взаимно простым, что обеспечивает большую равномерность износа: в этом случае каждый зуб одного колеса будет по очереди работать со всеми зубьями другого колеса.

Благодаря их высокой несущей способности, надёжности и лёгкость сборки обеспечила им преимущественное распространение перед другими видами соединений валов со ступицами в первую очередь в объектах массового производства: автомобилях, станках, редукторах общего назначения и т.д.

Зубчатые соединения являются сложными статически неопределимыми системами, способные передать любое сочетание нагрузок. Крутящий момент - основная нагрузка для зубчатого соединения. Дополнительными нагрузками являются поперечная сила и изгибающий момент, который является моментом этой силы или независимым от нее. На практике не встречаются соединения, которые бы передавали только основную нагрузку, так как всегда имеются побочные силовые факторы. [1]

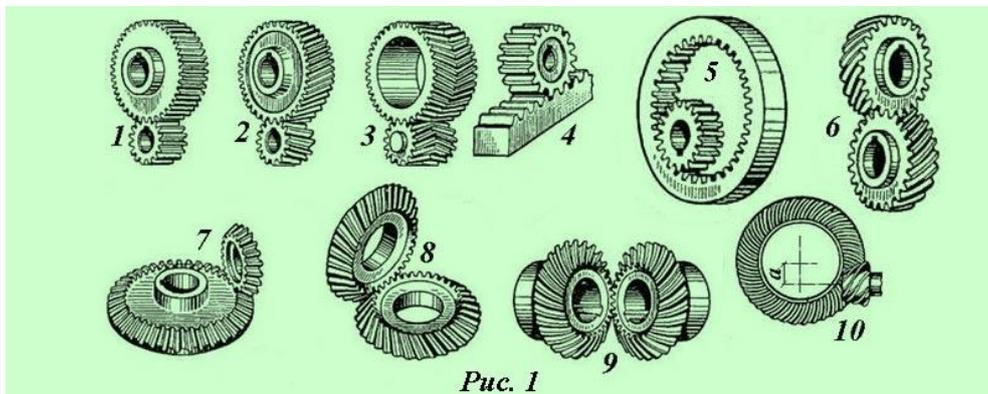


Рисунок 1 – Виды зубчатых передач

Зубчатые передачи классифицируются по ряду конструктивных признаков и особенностей:

- По взаимному расположению осей, на которых размещены зубчатые колеса, различают передачи цилиндрические (при параллельных осях) и винтовые (при перекрещивающихся осях). Винтовые зубчатые передачи применяются ограничено, поскольку имеют низкий КПД из-за повышенного скольжения в зацеплении и низкую нагрузочную способность. Тем не менее, они имеют и некоторые достоинства: высокая плавность хода, возможность выводить концы валов за пределы передачи в обе стороны.
- По виду передаваемого движения различают зубчатые передачи, не преобразующие передаваемый вид движения и преобразующие передаваемый вид движения. К последним относятся реечные зубчатые передачи, в которых вращательное движение преобразуется в поступательное или наоборот.

- По расположению зубьев на ободке колес различают: прямозубые, косозубые, шевронные и с круговыми зубьями.
- По форме профиля зуба различают эвольвентные зубчатые передачи и передачи с зацеплением Новикова.
- По характеру относительного движения осей зубчатых колес: передачи с неподвижной осью, планетарные передачи, у которых ось сателлита вращается относительно центральных осей.[4]

Среди всех видов зубчатых передач наиболее распространены цилиндрические передачи, ввиду простоты ее изготовления и эксплуатации, также они надежны и имеют небольшие габариты.

На рисунке 1 представлены наиболее распространенные виды зубчатых передач:

1. Цилиндрическая прямозубая;
2. Цилиндрическая косозубая;
3. Шевронная;
4. Реечная;
5. Цилиндрическая с внутренним зацеплением;
6. Винтовая;
7. Коническая прямозубая;
8. Коническая косозубая;
9. Коническая со спиралевидными зубьями;
10. Гипоидная

По применению и распространению в различных областях народного хозяйства зубчатые передачи занимают первое место. В любой отрасли машиностроения, приборостроения, на транспорте, в связи; зубчатые передачи находят широкое применение: автомобили, тракторы, самолеты, турбоэлектроды, станки, электросчетчики, часы, измерительные приборы и т.д.[2] Часто зубчатые передачи применяют для посадки шкивов ременных передач, звездочек цепных передач.

Наиболее распространены цилиндрические и конические зубчатые передачи, причем цилиндрические проще в изготовлении и монтаже. Коническая зубчатая передача осуществляет вращение между валами, геометрические оси которых пересекаются. Цилиндрические и конические прямозубые передачи работают обычно при небольших (< 3м/с) и средних (3...15 м/с) окружных скоростях. Цилиндрические прямозубые передачи используют при осевом перемещении зубчатых колес для переключения скоростей (коробки передач). Цилиндрические и конические косозубые и с круговыми зубьями передачи применяют при больших нагрузках и особо тяжелых условиях работы, при средних и высоких (15 м/с, некоторые работают со скоростями до 150 м/с) скоростях. Шевронные передачи обычно применяют при больших нагрузках и особо тяжелых условиях работы, при средних и высоких окружных скоростях. В шевронной передаче по сравнению с цилиндрической косозубой отсутствуют осевые силы, действующие на валы и подшипники [3].

#### **Список литературы**

1. Глухарев Е.Г., Зубарев Н.И. Зубчатые соединения. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983 – 270 с.
2. Устюгов И.И., Детали машин –М.: Высшая школа, 1981 –399с.
3. Гузенков П.Г., Детали машин. – М.: Высшая школа, 1986 – 359 с.
4. Детали Машин. Зубчатые передачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://k-a-t.ru/detali\\_mashin/24-dm\\_zubchatye/index.shtml](http://k-a-t.ru/detali_mashin/24-dm_zubchatye/index.shtml) – 15.07.18.

## ОБЛАЧНЫЕ СЕРВИСЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

Д.А. ЗАКОЛДАЕВ<sup>1</sup>, А.В. ГУРЬЯНОВ<sup>2</sup>, А.В. ШУКАЛОВ<sup>1</sup>, И.О. ЖАРИНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

<sup>2</sup>АО «ОКБ «Электроавтоматика»

E-mail: mpbva@mail.ru

Реализация жизненного цикла изделия приборостроения предполагает использование на предприятиях Индустрии 4.0 облачных сервисов, доступ пользователя к которым реализуется через интерфейсы и по протоколам интернета вещей (IoT – Internet of Things). Предприятия Индустрии 4.0 образованы проектно-производственными организациями трех типов: цифровая фабрика, умная фабрика и виртуальная фабрика [1, 2].

Схема взаимодействия компонентов облачного сервиса типа инфраструктура для реализации проектной деятельности на цифровой фабрике приведена на рисунке 1.

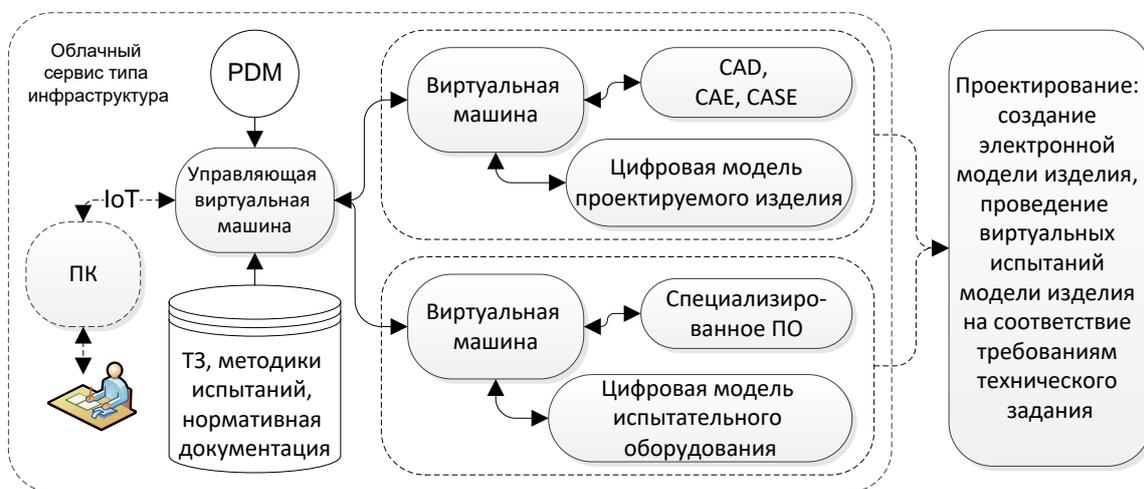


Рисунок 1 – Схема взаимодействия компонентов облачного сервиса типа инфраструктура для реализации проектной деятельности на цифровой фабрике

Облачный сервис инфраструктуры составляет двухуровневая вычислительная система, образованная тремя виртуальными машинами. Нижний уровень составляют две технологические платформы. Одна технологическая платформа поддерживает деятельность разработчика, направленную на создание технической документации на изделие приборостроения в электронном виде (цифровая модель изделия). На виртуальной машине этой платформы установлено программное обеспечение для автоматизированной разработки и оформления конструкторской, программной и технологической документации на изделие. Вторая технологическая платформа представляет разработчику функцию облачного сервиса для выполнения процедур виртуальных испытаний цифровой модели изделия. Виртуальные испытания цифровой модели основаны на принципах имитационного моделирования.

Схема взаимодействия компонентов облачного сервиса типа инфраструктура для реализации производственной деятельности на умной фабрике приведена на рисунке 2. Облачный сервис инфраструктуры составляет двухуровневая вычислительная система, образованная пятью виртуальными машинами. Нижний уровень составляют четыре технологических платформы, обеспечивающих на киберуровне информационную поддержку выполнения производственных процессов умной фабрики на этапах жизненного цикла изделия: подготовка производства, изготовление, контроль (испытания), хранение. Ядро каждой технологической платформы составляет отдельная виртуальная вычислительная

машина, на которой установлено:

- специализированное программное обеспечение (ПО), содержащее цифровые модели изделия и цифровые двойники технологического оборудования, задействованного на соответствующем этапе жизненного цикла изделия;

- программное обеспечение для управления производственным процессом умной фабрики на соответствующем этапе жизненного цикла изделия.

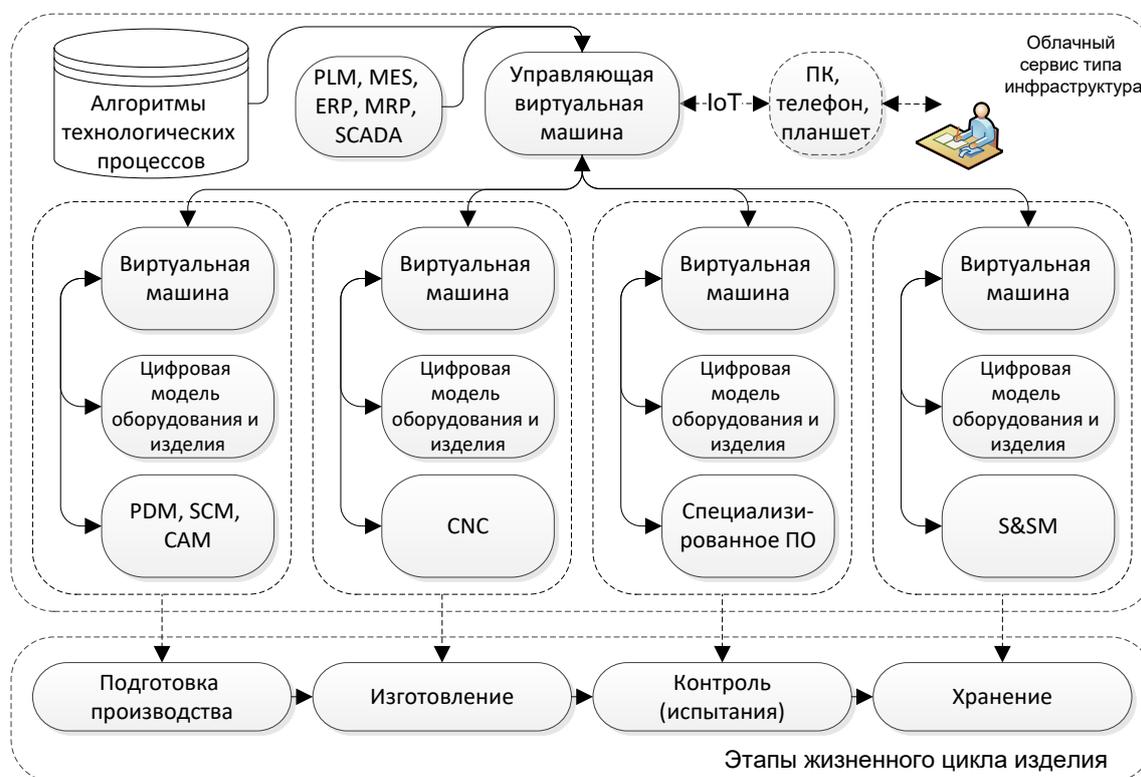


Рисунок 2 – Схема взаимодействия компонентов облачного сервиса типа инфраструктура для реализации производственной деятельности на умной фабрике

Управление технологическими платформами в процессе изготовления изделия приборостроения осуществляется оператором на производстве со своего автоматизированного рабочего места через виртуальную машину верхнего уровня. Доступ разработчика к облачной виртуальной машине верхнего уровня реализуется через пользовательский интерфейс телефона, планшета или персонального компьютера (ПК) по протоколам IoT.

#### Список литературы

1. Максютин Е.В., Головкин А.В. Неиндустриализация российской экономики на основе технологий четвертой промышленной революции и развития человеческого капитала // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2017. – Т.10. – № 1. – С. 43-52.
2. Авдеев Т.В., Алетдинова А.А. Цифровизация экономики на основе совершенствования экспертных систем управления знаниями // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2017. – Т.10. – № 1. – С. 7-18.

## СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ В ПЕЧИ ДСП-70

*В.С. ЗАХАРОВ, А.В. КАЗАНЦЕВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
E-mail: fanstak@mail.ru

В настоящее время для успешного развития экономики нашей страны необходимо освоения новых месторождений полезных ископаемых. На территорию Арктических месторождений, где расположен крупнейший источник нефтегазоаккумуляции – цифры говорят сами за себя, запасы нефти Арктики составляют приблизительно 100 млрд тонн, а природного газа 50 трлн. куб метров.

Наша страна может и должна быть конкурентно способной при добыче полезных ископаемых в условиях севера и крайне низких температур. Нельзя забывать и о том, что через территорию Арктики проходит Северный морской путь (СМП), играющий важную экономическую роль, время пути по нему короче на 7-22 дней, по протяженности можно сравнить с Суэцким каналом 23,78 тыс. км, в свою очередь СМП- 10,69 тыс. км, это в 2,23 раза меньше.

Из свежих источников известно, что 19 июля 2018 года два ледовых танкера («Владимир Русанов» и «Эдуард Толль») доставили первые партии российского сжиженного природного газа с завода «Ямал СПГ» в Китай. Выбирая СМП наша страна снижает затраты на топливо и оплату труда персоналу, кроме того траектория Северного морского пути обходит очаги морского пиратства что вне всякого сомнения держит в безопасности наши запасы нефти и газа которые просто обязаны пойти на позитивное развитие экономической ситуации в стране. Из недостатков можно выделить повышенные требования к классу судна и сложная навигация во льдах Арктики.

Таблица 1 – Сравнение морских путей

Наименование маршрута	Суэцкий канал	Северный морской путь
Расстояние	12 840 морских миль	5770 морских миль
Время в пути	44 дня	26 дня
Стоимость прохода	1000000 долларов	600000 долларов

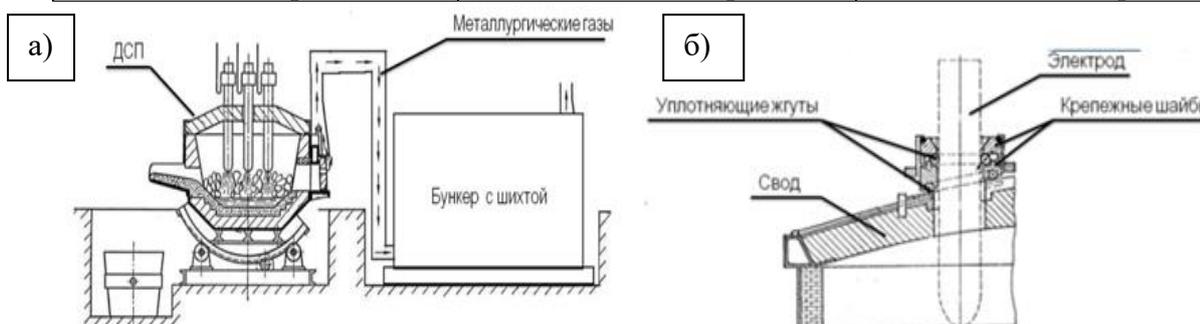


Рисунок 1 – Схема: а) использования тепла отходящих газов для предварительного подогрева шихты ; б) уплотнения электродных отверстий

В связи с этими тезисами нашей основной задачей стало подобрать ряд современных способов производств хладостойкой стали, обладающим высоким КПД и максимум снижения на энергозатратах. Наиболее эффективными для снижения потребления энергии являются использование тепла отходящих газов (рис. 1а) для предварительного нагрева шихты и уплотнение электродных отверстий (рис. 1б)

Совместное применение этих двух решений позволит экономить до 62 кВт\*ч на тонну стали, что составляет около 12% от потребной мощности ДСП 70. Технологическим мероприятием по использованию тепла отходящих газов является отвод этих газов через газопровод от печи до бункера с шихтой. Таким образом, предварительно подогретая шихта требует меньших затрат энергии на ее расплав. Уплотнение электродных зазоров производится за счет установки упругих жгутов в выемках и пазах подвижных огнеупорных колец, установленных на водоохлаждаемой платформе, расположенной на своде и ограничиваемой в передвижении окантовкой из кирпичей. Плотный прижим жгутов обеспечивается за счет давления на них контргрузов. Фиксация жгута обеспечивается крепежной шайбой с иглообразными конусами. Таким образом, за счет использования уплотнительных жгутов мы значительно уменьшаем теплопотери в ДСП. Возможная экономия будет составлять 62 кВт/час либо 518 МВт в год, что в денежном эквиваленте в среднем составляет 2 875 тыс. руб за год. При этом затраты на модернизацию оборудования будут составлять около 1 830 тыс. руб. Срок окупаемости затрат составит 7,6 месяцев.

Чтобы экономить на энергозатратах при производстве и уменьшить количество вредных примесей в хладостойких, необходим Плазменно-дуговой переплав (ПДП). Использование плазматрона прямого действия, в котором анод - это ванна расплавленного металла (рис. 2).

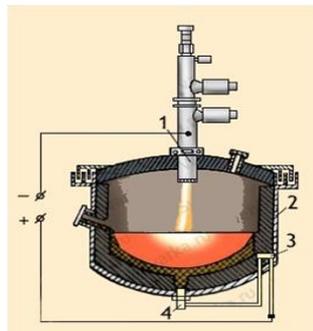


Рисунок 2 – Схема плазменно-дугового переплава:  
1- плазматрон, 2- камера в печи, 3- соленоид, 4-электрод-анод

Преимущества предлагаемого решения:

- Исключения загрязнения металла примесями (плазмообразующий газ Аргон);
- Легкий набор и регулировка температуры внутри печи (температура сжатой дуги в 3-4 раза выше, чем у свободной);
- Возможность достижения высокого КПД процесса (до 85%).

Кроме указанных достоинств, внедрение плазматрона в ДСП существенно снижает уровень производственного шума в цехе, что удовлетворяем всем современным запросам охраны труда.

#### Список литературы

1. Арикайнен А. И. Судостроение во льдах Арктики. - М.: Транспорт, 1990. - 247 с.
2. Белов М. И. Советское арктическое мореплавание 1917-1932 г.г. - Л.: Морской транспорт, 1959. -Т. III. - 511 с.
3. Сапко А.И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей. М., Энергия, 1969. - 128 с.
4. Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я. Электрические промышленные печи. - М.: 1970

**СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА  
ДУРБИНА И МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ТРЕХМЕРНОЙ  
ПОРОВЯЗКОУПРУГОЙ ДИНАМИКИ**

*А.А. ИПАТОВ, Л.А. ИГУМНОВ*

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Россия, Нижний  
Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6, 603950  
E-mail: ipatov@mech.unn.ru

Рассматриваются краевые задачи линейной трехмерной динамической теории поровязкоупругости. Используется поровязкоупругая модель на основе пороупругой модели Био [1] и принципа соответствия пороупругой и поровязкоупругой реакции. Для описания вязкоупругих свойств среды применяется модель Кельвина-Фойгта.

Применяется метод граничных интегральных уравнений (ГИУ) и метод граничных элементов (МГЭ) [2] для получения численных решений. Решение задачи строится в пространстве преобразований Лапласа. Численная схема основана на использовании формулы Грина-Бетти-Сомильяны. Чтобы ввести ГЭ-дискретизацию, рассматривается регуляризованное гранично-интегральное уравнение. Гранично-элементные схемы созданы на основе согласованной аппроксимации граничных функций. При поэлементном численном интегрировании используется метод Гаусса. Применяется метод коллокации. Решения в явном времени строятся с использованием модифицированного алгоритма Дурбина [3].

Получено гранично-элементное решение задачи о скачке давления в сферической полости поровязкоупругого куба. Построены гранично-элементные решения для перемещений и порового давления. Проведено сравнение решений при различных значениях параметров среды и продемонстрировано влияние вязкости на динамические отклики перемещений и порового давления.

Рассмотрим однородное тело  $\Omega$  в трехмерном евклидовом пространстве  $R^3$  с декартовой системой координат  $Ox_1x_2x_3$ ,  $\Gamma = \partial\Omega$  – граница тела.

Система дифференциальных уравнений теории Био в преобразованиях Лапласа (параметр преобразования  $s$ ) для смещения  $\bar{u}_i$  и порового давления  $\bar{p}$  принимает вид [4]:

$$G\bar{u}_{i,jj} + \left( K + \frac{1}{3}G \right) \bar{u}_{j,ij} - (\psi - \beta)\bar{p}_{,i} - s^2(\rho - \beta\rho_f)\bar{u}_i = -\bar{F}_i,$$

$$\frac{\beta}{s\rho_f}\bar{p}_{,ii} - \frac{\phi^2 s}{R}\bar{p} - (\psi - \beta)s\bar{u}_{i,i} = -\bar{a},$$

$$\beta = \frac{k\rho_f\phi^2 s^2}{\phi^2 s + s^2 k(\rho_a + \phi\rho_f)}, R = \frac{\phi^2 K_f K_s^2}{K_f(K_s - K) + \phi K_s(K_s - K_f)}$$

где  $G, K$  – константы упругости,  $\phi$  – пористость,  $k$  – проницаемость,  $\psi$  – эффективный коэффициент напряжений,  $\rho, \rho_a, \rho_f$  – плотности скелета, присоединенной массы и жидкой среды,  $\hat{F}_i, \hat{a}$  – объемные силы. Рассмотрим следующие типы граничных условий:

$$\bar{u}_l(x, s) = f_l(x, s), \bar{u}_4(x, s) = \bar{p}(x, s) = f_4(x, s), x \in \Gamma^u, l = \overline{1, 3},$$

$$\bar{t}_l(x, s) = g_l(x, s), \bar{t}_4(x, s) = \bar{q}(x, s) = g_4(x, s), x \in \Gamma^\sigma, l = \overline{1, 3},$$

где  $\Gamma^u$  и  $\Gamma^\sigma$  – части границы  $\Gamma$ , где заданы соответствующие обобщенные перемещения и обобщенные поверхностные усилия.

Поровязкоупругое решение строится на основе пороупругого решения путем пересчета модулей упругости  $K$  и  $G$  в области, преобразованной по Лапласу, и получении функций  $\bar{K} = \bar{K}(s)$  и  $\bar{G} = \bar{G}(s)$ . Модель Кельвина-Фойгта в преобразованиях Лапласа имеет вид:

$$\bar{K}(s) = K \left[ 1 + \frac{s}{\gamma} \right], \quad \bar{G}(s) = G \left[ 1 + \frac{s}{\gamma} \right].$$

### Численные результаты

Рассматривается изотропный поровязкоупругий куб с ребром  $L = 2$ , содержащий сферическую полость радиуса  $R = 0.5$  м (Рис. 1). Куб жестко закреплен на грани  $x_3 = -1$  м и полость подвержена равномерно распределенному внутреннему давлению:

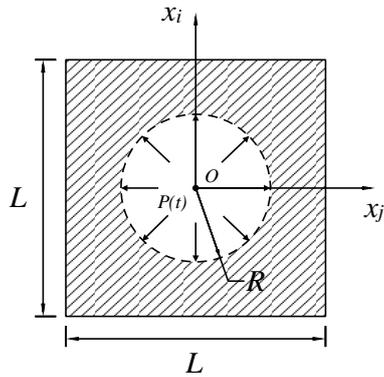


Рисунок 1 – Куб со сферической полостью

$$P(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \text{ с} \\ P_0 t / 0.0005, & \text{для } 0 \leq t \leq 0.0005 \text{ с} \\ P_0, & \text{для } t > 0.0005 \text{ с,} \end{cases}$$

$$P_0 = 10^5 \text{ Па.}$$

Параметры пористого материала:

$$K = 8 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2, \quad G = 6 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2,$$

$$\rho = 2458 \text{ кг/м}^3, \quad \phi = 0.66,$$

$$K_s = 3.6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2, \quad \rho_f = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

$$K_f = 3.3 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2, \quad k = 1.9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^4 / (\text{Н} \cdot \text{с}).$$

На Рис.2–3. продемонстрированы динамические отклики перемещений  $u_3(t)$  и поровых давлений  $p(t)$  соответственно в точке A с координатами (0, 0, 1) м. Проведено сравнение пороупругих решений с поровязкоупругими решениями, полученными по модели Кельвина-Фойгта с различными значениями параметров модели  $\gamma = 1000, 100, 50$  и  $10$ .

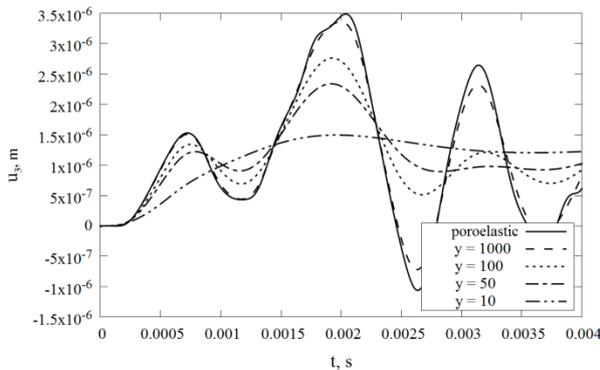


Рисунок 2 – Перемещения  $u_3$  в точке A

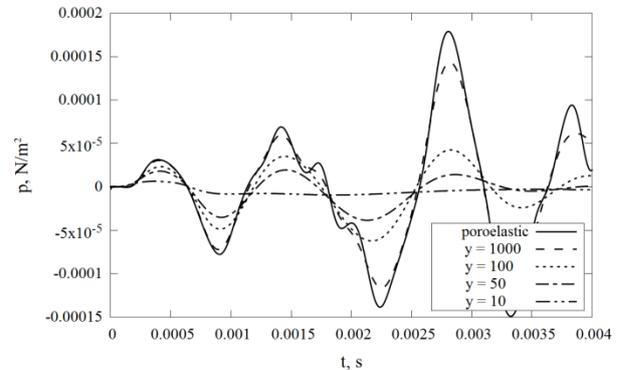


Рисунок 3 – Поровые давления  $p$  в точке A.

### Список литературы

1. Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys. – 1941. – Vol. 12(2), – pp.155-164.
2. Баженов В.Г., Игумнов Л.А. Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. – М.: Физматлит, – 2008. – 352с.
3. Durbin F. Numerical inversion of Laplace transforms: an efficient improvement to Dubner and Abate's method // Computer Journal 1974. – Vol 17, №4. – pp. 371-376.
4. Schanz M. Wave Propagation in Viscoelastic and Poroviscoelastic Continua. Berlin Springer, – 2001. –170 p.

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
В МЕТАЛЛЕ ШВА ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ**

*А.С.КУЛЕШ, В.П. ХРОМЦОВ, А.С.ВОРОБЬЕВ*

Гомский политехнический университет  
Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова  
E-mail: dhb@sibmail.com

В качестве основного потенциала восстановления надежности теплотехнического оборудования и достижения эксплуатационных характеристик его узлов, в том числе сварных швов, рассматривается восстановительная термическая обработка (ВТО), направленная на снижение (релаксацию) остаточных напряжений.

Разрушение на любом его этапе определяется разрывом межатомных связей и релаксацией напряжений, которая связана с ростом дефектов и структурной целостностью [1]. Проверка этого положения определила цель настоящей работы, которая заключалась в установлении признаков разрушения зоны сварного шва по условиям распределения и релаксации внутренних структурных напряжений I рода.

Цель реализована на образце сварного шва с начальной сварочной трещиной. Сварной узел выполнен из разнородных сталей – жаропрочной низколегированной стали 12Х1МФ и аустенитной хромомарганцевой стали Ди-59 (рис. 1).

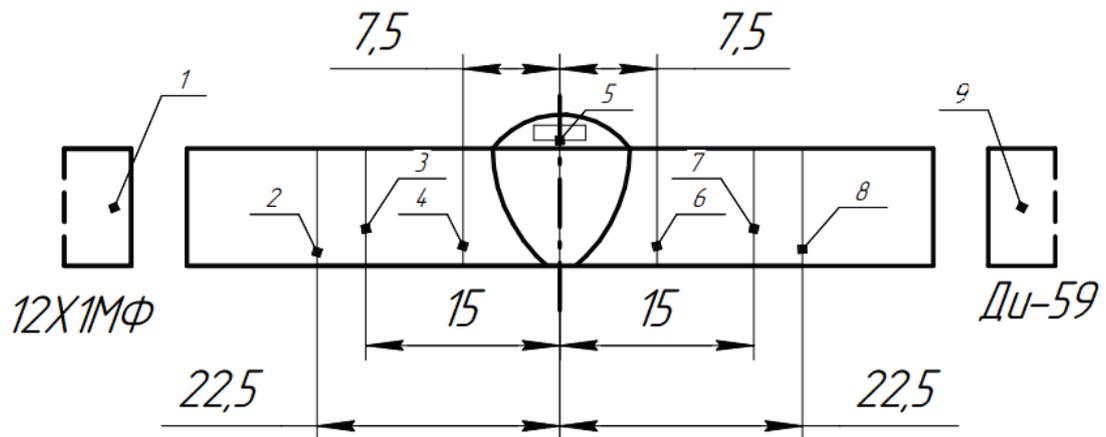


Рисунок 1 – Схема вырезки образцов из критических зон сварного узла:

- 1, 9 – эталонные образцы из сталей 12Х1МФ и Ди-59 соответственно;
- 4, 6 – образцы, вырезанные из околошовных зон на расстоянии 7,5 мм от оси сварного шва (ОШЗ);
- 5 – образец из зоны сварного шва;
- 3, 7 – образцы, вырезанные из зон термического влияния сварки на расстоянии 15 мм от оси сварного шва (ЗТВ);
- 2, 8 – образцы, вырезанные из зон на расстоянии 22,5 мм от оси сварного шва

В результате работы выполнены оценки напряженного состояния зон сварного узла с начальной трещиной в исходном состоянии и после 9000 часов естественного старения, проведен анализ распределения микротвердости, а также сделаны выводы по влиянию сварного шва на прочность и надежность конструкции, определены ее слабые места.

**Список литературы**

1. Friedel J., Gullity B. D., Crussard C. // Acta Met.– 1953.– V.1.– P. 79 – 92.
2. Lyubimova L.L., Tashlykov A.A., Tabakaev R.B., Levin A.A., Popov A.Y. The effect of thermo-mechanical loading on fracture-related parameters of austenitic steel // Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 81. – pp. 45-56.
3. Lyudmila L. Lyubimova, Roman N. Fisenko, Alexander A. Tashlykov, and Roman B. Tabakaev Changes in the State of Heat-Resistant Steel Induced by Repeated Hot Deformation // Met. Mater. Int., Vol. 24, No. 1 (2018), pp. 121-129.
4. Любимова Л. Л., Заворин А. С., Ташлыков А. А., Табакаев Р. Б. Способ установления состояния предразрушения конструкционного изделия. RU (11) 2 613 486(13) С1.Опубл. 16.03.2017. Бюл. № 8.

Работа выполнена при поддержке РФФИ «Фундаментальные основы инженерных наук (проект № 15-08-99544а в 2014г., № 18–08–01265 в 20018 г.)

**МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ  
НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА, АРМИРОВАННЫХ  
РАЗЛИЧНЫМИ МИКРОВОЛОКНАМИ**

ЛЕ ТХИ МИ ХИЕП<sup>1</sup>, С. В. ПАНИН<sup>1,2</sup>, Л. А. КОРНИЕНКО<sup>2</sup>, В. О. АЛЕКСЕНКО<sup>1,2</sup>, Л. Р. ИВАНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: myhiepru@gmail.com

Полифениленсульфид (ПФС) является перспективным высокотемпературным конструкционным термопластом, обладающим высокими показателями свойств теплостойкости, жесткости, ударопрочности, гидролизо-химической стойкости, технологичности, формостабильности, высокой адгезии к большому количеству материалов (стеклу, керамике, титану, бронзе, стали). Это определяет области его применения: машиностроение, авиационная и автомобильная, газовая и нефтяная промышленность, электротехника и т. п. Однако чистый ПФС обладает низкой износостойкостью и высоким коэффициентом трения (0,34), что ограничивает его применение в узлах трения.

Для повышения триботехнических свойств полимеров, как правило, используют различные типы наполнителей, в частности твердосмазочные микрочастицы (ПТФЭ, MoS<sub>2</sub>, графит,) и нанонаполнители (углеродные нановолокна/нанотрубки, оксиды) [1-3]. Совместное введение твердосмазочных и армирующих наполнителей в полимерную матрицу позволяет комплексно повысить трибомеханические характеристики, расширяя тем самым номенклатуру и области применения полимерных композитов с заданными эксплуатационными свойствами в узлах трения машин и механизмов.

В настоящей работе с целью применения микроволокон в качестве одновременно армирующих и твердосмазочных наполнителей были исследованы механические и триботехнические характеристики композитов на основе ПФС, армированных различными микроволокнами (углеродными, стеклянными, базальтовыми) в условиях сухого трения скольжения.

Использовали порошок ПФС фирмы Ticona Fortron (0205B4) со средним размером частиц 20 мкм, углеродные, стеклянные и базальтовые волокна со средней длиной 200 мкм. Композиты на основе ПФС получали методом горячего прессования. Твердость по Шору Д определяли на приборе Instron 902 в соответствии с ASTM D 2240. Испытания на трехточечный изгиб проводили с помощью электромеханической испытательной машины Instron 5582 согласно ISO 178: 2010.

Испытание образцов на изнашивание в режиме сухого трения проводили по схеме «шар-на-диске» при нагрузке  $P=10$  Н и скорости скольжения  $V=0.3$  м/с на трибометре CSEM CH-2000 в соответствии с ASTM G99. Диаметр контртела, выполненного из стали ШХ15, составлял 6 мм. Путь испытания равен 3 км, радиус траектории вращения - 10 мм. Для исследования поверхностей испытанных образцов использовали оптический профилометр New View 6200 (Zygo). Надмолекулярную структуру композитов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхностях скола образцов с надрезом, механически разрушенных после выдержки в жидком азоте.

В таблице 1 приведены механические характеристики композитов на основе ПФС, наполненных 40 вес. % углеродными, стеклянными и базальтовыми волокнами. Из таблицы следует, что твердость по Шору Д сильно возрастает при введении углеродных волокон. Добавление других волокон (стеклянных и базальтовых) незначительно повышает твердость материалов. Модуль упругости при изгибе возрастает при добавлении микроволокон. При этом добавление углеродных волокон позволяет повысить модуль упругости в 3,5 раза по сравнению с чистым ПФС. Предел прочности также значительно повышается при добавлении УВ. Наполнение стеклянными и базальтовыми волокнами приводит к

уменьшению предела прочности композитов. Деформация при разрыве существенно снижается при добавлении всех исследованных наполнителей.

Таблица 1 – Механические свойства композитов на основе ПФС, армированных различными микроволокнами

Материалы	Плотность г/см <sup>3</sup>	Твердость по Шору Д	Предел прочности, МПа	Модуль упругости на изгибе, МПа	Деформация при разрыве, %
ПФС	1,33	79,5±0,5	97,8±1,6	3930±71	2,56±1,4
40% УВ	1,47	84,1±0,4	147,8±4,3	13478±894	0,99±0,1
40% СВ	1,74	80,0±0,7	69,8±2	6773±714	1,1±0,1
40% БУ	1,68	80,7±0,5	75,1±7,3	8121±522	1,04±0,07

Результаты трибоиспытаний показаны на рисунке 1. Видно, что добавление в ПФС 40 вес. % углеродных и базальтовых микроволокон позволяет повысить износостойкость композитов в 4 раза по сравнению с чистым полимером. При этом, наполнение стеклянными волокнами в количестве 40 вес. % приводит к снижению износостойкости композитов на основе ПФС (износостойкость в 2 раза ниже по сравнению с чистым ПФС).

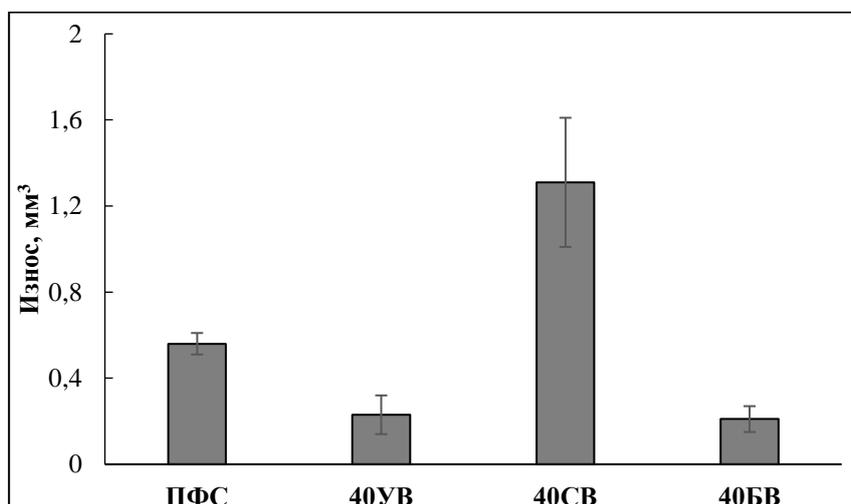


Рисунок 1 – Объемный износ ПФС и композитов на его основе с волокнами

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 16-48-700192\_p\_a, а также гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8.

#### Список литературы

1. Laigui. W, Shengrong Yang, Weimin Liu and Qunji Xue. An investigation of the friction and wear behaviors of polyphenylene sulfide filled with solid lubricants. Polymer engineering and Science, Vol.40. No.8, (2000), pp.1825-1832.
2. M. H. Choa and S. Bahadura . A study of the thermal, dynamic mechanical, and tribological properties of polyphenylene sulfide composites reinforced with carbon nanofibers. Tribology Letters, Vol. 25, No. 3, (2006), pp. 237-245.
3. Díez-Pascual A M, Naffakh M, Marco C and Ellis G. Rheological and tribological properties of carbon nanotube/thermoplastic nanocomposites incorporating inorganic fullerene-like WS<sub>2</sub> nanoparticles. J Phys Chem B 2012; 116: 7959–7969.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ ОДНОРОДНОГО  
АНИЗОТРОПНОГО УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА МЕТОДОМ  
ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*И.П. МАРКОВ, Л.А. ИГУМНОВ*

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: teanku@gmail.com

Рассматриваются задачи нестационарной динамики однородного анизотропного упругого полупространства. В постановке задачи линейной теории упругости подразумевается отсутствие объемных сил. Используется интегральное преобразование Лапласа по переменной времени при учете нулевых начальных условий. Для того чтобы численно решить поставленную краевую задачу в изображениях по Лапласу применяется метод граничных элементов (МГЭ). Трехмерные динамические анизотропные упругие фундаментальные и сингулярные решения записаны в интегральном виде. Используются граничные интегральные уравнения для перемещений, регуляризованные статической частью анизотропного упругого динамического сингулярного решения:

$$\int_{\Gamma} [\bar{u}_k(\mathbf{y}, s) \bar{h}_{jk}(\mathbf{r}, s) - \bar{u}_k(\mathbf{x}, s) h_{jk}^s(\mathbf{r})] d\Gamma(\mathbf{y}) - \int_{\Gamma} \bar{t}_k(\mathbf{y}, s) \bar{g}_{jk}(\mathbf{r}, s) d\Gamma(\mathbf{y}) = 0.$$

Смешанные представления граничных полей применяются при пространственной дискретизации граничных интегральных уравнений. Геометрия границы рассматриваемой области аппроксимируется квадратичными восьмиузловыми прямоугольными элементами. Перемещения и поверхностные усилия на граничных элементах интерполируются линейными и постоянными функциями, соответственно. Для получения решения во временной области используется метод численного обращения преобразования Лапласа.

Приведены результаты гранично-элементного решения о действии внезапно приложенной нагрузки на часть дневной поверхности однородного анизотропного упругого полупространства.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00082).

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ  
СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ**

*К.С. МИЩЕНКО, А.В. КОРОЛЕВ, А.А. КОРОЛЕВ, А.Ф. БАЛАЕВ*

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

E-mail: kristina.neigebauer@yandex.ru

Как известно, дефекты кристаллической решетки металлов являются источниками внутренних напряжений. Наиболее значимое влияние не геометрические показатели качества металлических деталей, такие как точность размера, формы, поверхности, оказывают зернограничные дислокации. Это связано с тем, что изменение геометрических показателей качества происходит вследствие пластической деформации металлических деталей [1, 2], осуществляемой путем скольжения границ зерен под действием касательных напряжений.

Наряду с этим изменение внутреннего напряжения металла приводит не только к пластической деформации, но и к образованию новых границ за счет изменения энергии внутренних напряжений, что позволяет проводить количественную оценку напряженного состояния материала на основе данных о количестве границ [2].

Для возможности проведения количественной оценки внутренних напряжений необходимо учитывать случайный характер распределения энергии границ, с целью чего было выполнено стохастическое моделирование.

Известно, что энергия межзеренной границы определяется выражением [2]:

$$u_s = \gamma_g \cdot s, \quad (1)$$

где  $\gamma_g$  – удельная энергия границы, приходящаяся на единицу ее площади, Дж/мм<sup>2</sup>;  $s$  – площадь границы, мм<sup>2</sup>.

Поскольку площадь границы является случайной величиной, то форма границы может быть описана выражением:

$$R = R_o + \sum_{i=2}^p A_i \cos(i \cdot \varphi + \omega_i), \quad (2)$$

где  $R$  – случайный радиус площадки при фиксированном значении полярного угла  $\varphi$ , мм;  $R_o$  – математическое ожидание значений радиуса, мм;  $i$  – номер гармоники, составляющий профиль поверхности;  $A_i$  – амплитуда гармоники, мм;  $p$  – предельный номер гармоники, составляющий профиль поверхности, мм;  $\omega_i$  – случайная фаза  $i$ -ой гармоники.

Из выражения (2) видно, что радиус площадки является случайной функцией от значения полярного угла, поэтому дисперсия радиуса площадки может быть определена выражением:

$$\sigma_R^2 = \sum_{i=2}^p A_{oi}^2 + \sigma_{oi}^2, \quad (3)$$

где  $A_{oi}$  и  $\sigma_{oi}$  – соответственно математической ожидание и среднеквадратическое отклонение  $i$ -й гармоники.

Поскольку радиус  $R$  задается в двумерной полярной системе координат, то в качестве закона распределения целесообразно применить распределение Рэлея:

$$f(R) = \frac{1}{\sigma_R^2} \cdot R \cdot e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}}. \quad (4)$$

В результате преобразований получены функция плотности вероятности и параметры распределения энергии единичной границы:

$$\begin{cases} f_s(u_g) = \frac{1}{2\pi\gamma_g \sigma_R^2} e^{-\frac{u_g}{2\pi\gamma_g \sigma_R^2}}; \\ u_{go} = \sigma_{uo} = 2\pi\gamma_g \sigma_R^2, \end{cases} \quad (5)$$

где  $f_s(u_g)$  – функция плотности вероятности распределения энергии единичной границы;  $u_{go}$  и  $\sigma_{uo}$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение энергии единичной границы.

Применяя теоретико-вероятностный подход к описанию энергии границ случайно распределенных в некотором объеме  $V$ , было получено математическое ожидание  $M(W_V)$  и дисперсия  $D(W_V)$  энергии межзеренных границ в объеме  $V$ , соответствующей величине энергии внутренних касательных напряжений:

$$\begin{cases} M(W_V) = (V \cdot \rho_{uo} + 1)u_{go}, \\ D(W_V) = (2 \cdot V \cdot \rho_{uo} + 1)u_{go}^2. \end{cases} \quad (6)$$

где  $V$  – рассматриваемый объем материала,  $m^3$ ;  $\rho_{uo}$  – плотность расположения границ,  $m^{-3}$ .

Полученное выражение (6) позволяет проводить количественную оценку напряженного состояния материала на основе известных данных о плотности и средней энергии границ. Однако на практике получение количественных данных о межзеренных и межфазных границах материала является значительно более трудоемкой задачей, чем определение внутреннего напряжения. Поэтому наиболее целесообразно использование выражения (6) для решения обратной задачи, а именно оценки плотности распределения энергии границ на основе результатов измерения внутренних напряжений.

Например, решение данной задачи может быть использовано для определения условий возникновения и развития микротрещин при упруго-циклическом деформировании металлических деталей машин при оценке их ресурса[3].

#### Список литературы

1. Королев А.В., Балаев А.Ф., Яковишин А.С. Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 7. – С. 291–293.
2. Колбасников Н.Г. Теория обработки металлов давлением. физические основы прочности и пластичности металлов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 220 с.
3. Королев А.В., Балаев А.Ф., Королев А.А. Модель прогнозирования ресурса деталей машин при многоцикловом нагружении // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. – № 6. – С. 1–6.

## ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С КОЛЬЦЕВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

К.Р. МУРАТОВ<sup>1</sup>, Э.И. АБДРАХМАНОВ<sup>1</sup>, С.А. ПОПОВА<sup>1</sup>, О.В. ГАЛЬЦЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: muratows@mail.ru

При выполнении вихретокового контроля на предмет обнаружения поперечных трещин оценку их ширины, как правило, не выполняют [1]. В работе предлагается рассмотрение поперечной трещины как элемент электрической цепи – конденсатор. На рисунке 1,а схематично показано распределение силовых линий вихревого электрического поля и вихревых токов на проводящей поверхности, которые представляют собой соосные окружности. Ось катушки возбуждения вихретокового преобразователя (ВТП) перпендикулярна поверхности. При наличии поперечной трещины (рис.1,б), из-за невозможности преодоления зарядами трещины, они накапливаются на ее поверхностях. То есть локально трещина представляет собой заряженный конденсатор. В результате эти заряды создают дополнительное кулоновское поле, которое в совокупности с вихревым электрическим, согласно закону Ома, определяет характер линий тока (красная линия).

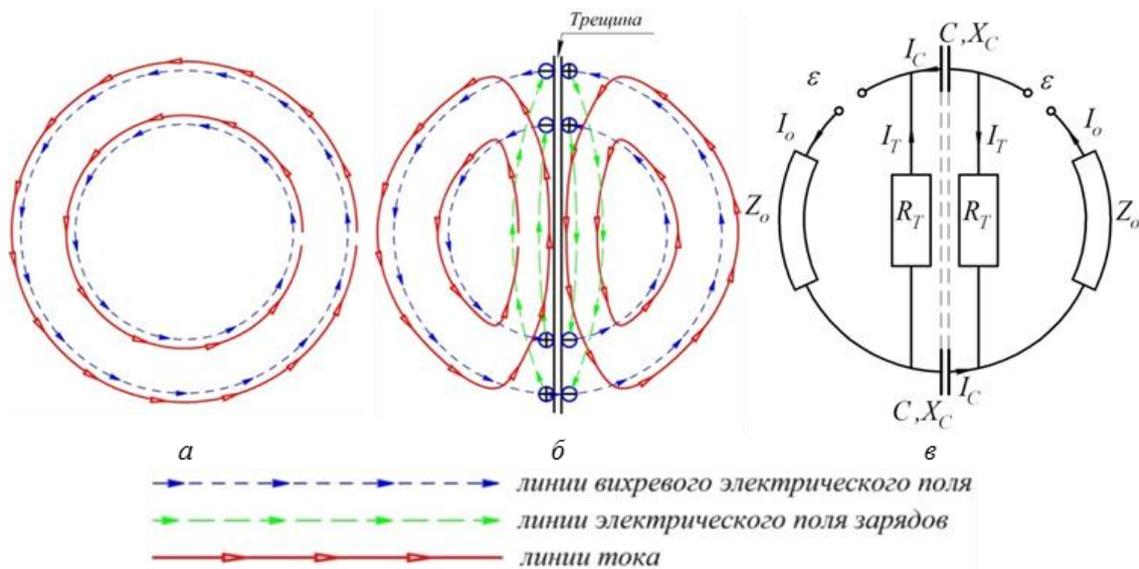


Рисунок 1 – (а,б) Характер линий напряжённости электрического поля и вихревых токов в отсутствии трещины и без нее. (в) Эквивалентная электрическая схема распределения токов вблизи трещины

Таким образом мы приходим к эквивалентной электрической схеме (с переменным током циклической частоты  $\omega$ ), изображенной на рисунке 1,в. Здесь трещина представляет собой два конденсатора ёмкостью  $C$  и соответствующим ёмкостным сопротивлением  $X_C = -i/\omega \cdot C$ , соединённых двумя резисторами, сопротивление  $R_T$  которых представляет собой прилегающий к трещине слой проводящей среды. Элемент  $Z_o = R_o + i \cdot \omega \cdot L_o$  символизирует эффективный слой материала вдоль линий вихревого поля (активное сопротивление  $R_o$ , индуктивность  $L_o$ , обусловленная взаимным влиянием вихревых токов). ЭДС индукции, наводимая ВТП в материале представлена элементами  $\epsilon$ .

В результате вносимое относительное напряжение будет определяться выражением:

$$u_{\text{ВН}}^{\text{отн}} = \omega \cdot k \frac{X_C - R_T}{R_T X_C + Z_o (X_C - R_T)}, \quad (1)$$

где:  $k$  – коэффициент учитывающий геометрию ВТП, магнитные свойства ОК и, по сути, представляет собой комбинацию взаимных индуктивностей катушки возбуждения, объекта контроля и измерительной катушки.

Коэффициент  $k$  является действительной величиной, поэтому фаза и величина относительного вносимого напряжения согласно (1) определяется соотношением  $(X_C - R_T)/(R_T X_C + Z_o (X_C - R_T))$ . Тогда, рассматривая ширину раскрытия трещины как расстояние между обкладками конденсатора, можем получить аналитическое выражение для оценки этой ширины по вносимому напряжению  $u_{\text{ВН}}^{\text{отн}}$ . Для увеличения чувствительности можно также использовать различные резонансные решения.

Необходимо понимать, что приведённая модель влияния трещины и свойств ОК является предельно упрощённой поскольку линии вихревого электрического поля не сосредоточены в узком кольце. Однако предлагаемый подход остается соблазнительным ввиду достаточной прозрачности в аналитическом представлении.

Численное моделирование с помощью программного пакета Elcut показало возможность кольцевой фокусировки вихревых токов. Для этого необходимо локализовать «выступающее» в рабочей зоне ВТП переменное магнитное поле с помощью магнитопровода специальной формы. На рисунке 2,а представлен стандартный вариант конструкции возбуждающей катушки ВТП, на рисунке 2,б – магнитопровод, охватывающий катушку снаружи и внутри. На рисунках 2,в,г,д показан результат моделирования. Можем видеть, что специальная форма магнитопровода позволяет локализовать вихревые токи.

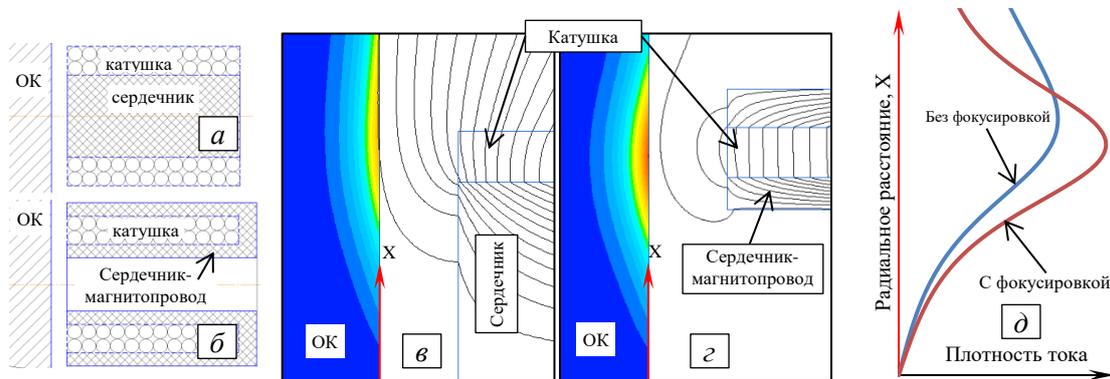


Рисунок 2 – (а,б) Конструкция ВТП с простым сердечником и фокусирующим магнитопроводом. (в,г) Результат моделирования без кольцевой фокусировки и с ней. (д) Распределение плотности тока в радиальном направлении на проводящей поверхности.

#### Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т./под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2. Кн. 2. Вихревоковый контроль/Ю.К. Федосенко и др. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. С. 362.

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЬЕЗОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ СТАЛИ 30X13

К.Р. МУРАТОВ, Р.А. СОКОЛОВ, А.Н. ВЕНЕДИКТОВ, В.В. ПРОБОТЮК

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

E-mail: falcon.rs@mail.ru

Все свойства вещества в конденсированном состоянии зависят от его структуры. На структуру металлов влияет большое количество внешних и внутренних факторов. У внутреннего фактора можно отнести различные неоднородности структуры. Скопление примесей, наличие дислокаций и включений, внутренние напряжения все это изменяет магнитные и механические свойства стали [1-3].

В данной работе рассматривается влияние внутренних напряжений на характер изменения магнитоупругого размагничивания для образцов, изготовленных из хромистой стали 30X13. Образцы были предварительно термообработаны (закалка при 1050 °С с охлаждением в воде и отпускены при температурах 200 – 700 °С).

В работе использовалась методика, описанная в работе [1]. В данной методике рассчитываются размеры зерен  $\alpha$ -Fe и величина микронапряжений, действующая на данные зерна. На рисунке 1 представлены изменения, происходящие с этими величинами.

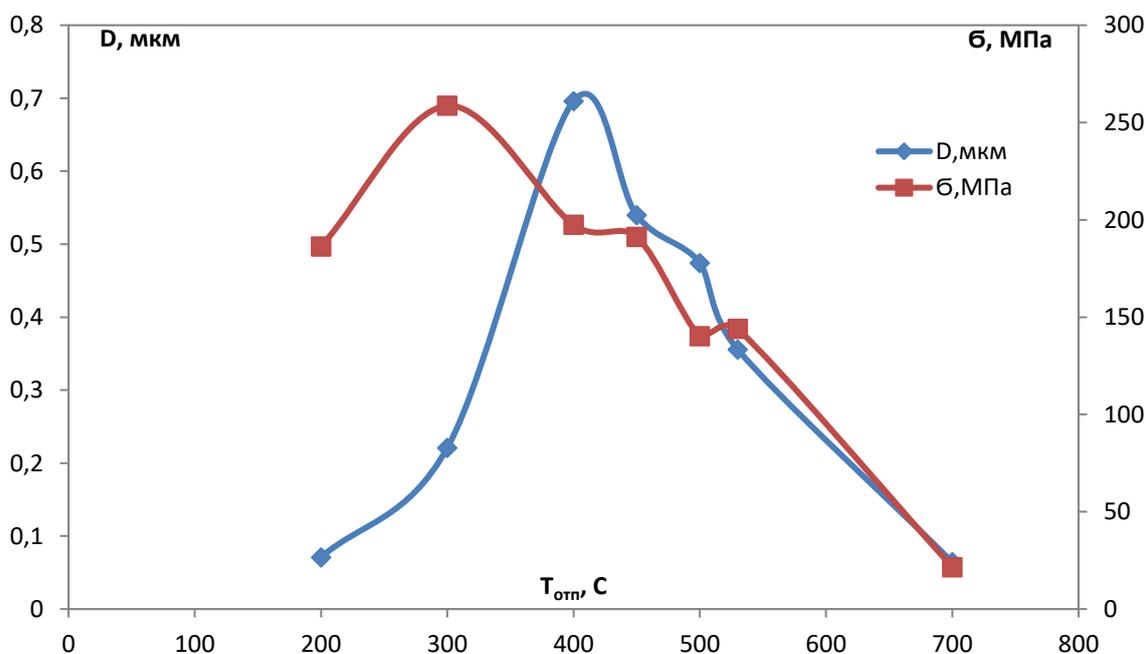


Рисунок 1 – Зависимости от температуры отпуска размеров зерен в поликристалле и величины напряжений второго рода

Анализ полученных экспериментальных магнитных циклограмм показал, что, для данной стали, при указанных температурных режимах обработки начиная с температуры 450°С наблюдается изменение знака магнитного пьезоэффекта, при увеличении механической нагрузки. При меньших температурах явления такого рода не наблюдается.

Под прямым пьезомагнитным эффектом подразумевается соответствие минимумов и максимумов максимальной напряженности магнитного поля [4-6] минимумам и максимумам нагрузки в цикле. Обратный пьезомагнитный эффект – нахождение величины магнитного поля и циклической нагрузки в противофазе.

Изменение знака пьезомагнитного эффекта связано с изменением величины зерна  $\alpha$ -фазы и величины внутренних напряжений. Именно в области среднего отпуска происходит какое-то явление, кардинально влияющее на размеры зерен и внутренние напряжения. Изменение знака магнитного пьезоэффекта может быть связано с более интенсивными изменениями, происходящими в структуре стали. Такие изменения обусловлены укрупнением цементитных частиц в результате слияния (коагуляция цементита). Структура такой стали является сорбитной [7-8]. Частицы цементита служат некими барьерами для движения доменных границ и вращения векторов намагниченности. Внешние нагрузки выступают в роли дополнительного источника энергии, которые помогают доменным границам преодолевать неоднородности структуры [3, 5-6].

#### **Список литературы**

1. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 3-е изд. доп. и перераб. – М. «МИСИС», 1994.-328 с.
2. Галимов, Э.Р. Рентгеноструктурный анализ поликристаллов: учебное пособие / Э.Р. Галимов, К.В. Кормушин, З.Я. Халитов. – Казань, изд-во КГТУ, 2006. – 86 с.
3. Чулкин, А. А. О причинах формирования максимума на зависимостях коэрцитивной силы от температуры отпуска простых углеродистых сталей / А.А. Чулкин, А.И. Ульянов, А.В. Загайнов// ДЕФЕКТОСКОПИЯ. – 2010. – № 11. – С. 53 – 61. Бида Г.В., Ничилурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 214 с.
4. К. Р. Муратов, В.Ф. Новиков, Д.Ф. Нерадовский, Р.Х. Казаков Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения // Физика металлов и металловедение, 2018, том 119, № 1, с. 19–25/
5. Новиков В.Ф., Дягилев В.Ф., Бахарев М. С, Нассонов В.В., Прилуцкий В.В. Закономерности магнитоупругого изменения локальной остаточной намагниченности сталей// Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2006, том 72, № 6, с. 34 – 37
6. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Влияние структурных неоднородностей на динамику магнитных доменов и электромагнитные свойства fe-3%si сплава// Вестник тамбовского университета, серия: естественные и технические науки, 2016, том 21, №3, с. 970-973.

**МЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ НАПЛАВКЕ СЛОЕВ ИЗ  
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т**

*С.Д. НЕУЛЫБИН, Д.С. БЕЛИНИН, Ю.Д. ЩИЦЫН*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
E-mail: sn-1991@mail.ru

Одним из путей в развитии современного машиностроения, направленных на повышение надежности и долговечности выпускаемой продукции, является создание и применение новых энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки материалов и изготовления деталей. В последние годы широкое распространение получили аддитивные технологии, однако их широкое внедрение в производство сдерживается недостаточной изученностью влияния послойного наложения металла, отсутствием технологических рекомендаций получения бездефектной структуры и требуемых механических свойств. Это предопределило необходимость совершенствования процессов наплавки при аддитивном производстве [1].

Получение мелкозернистой структуры наплавленного металла позволяет, как показывает практика, обеспечить высокие механические свойства сварного соединения в частности, а также повысить существенно образом технологическую прочность, коррозионную стойкость и надежность, увеличивая ресурс работы механизма в целом. В этом отношении задача поиска оптимальных условий управления образованием структуры представляет особую важность для развития аддитивных технологий в целом. Наиболее удобным механизмом модификации наплавленного металла представляется воздействие на жидкую ванну в процессе наплавки [2].

Существующие особенности кристаллизации литого металла при сварке и наплавке, позволяют установить, периодичность гармонического характера при затвердевании металла. Одни исследователи склонны считать основной причиной, вызывающей цикличность кристаллизации, выделение скрытой теплоты плавления, тормозящей продвижение фронта затвердевания, другие — концентрационное переохлаждение перед межфазной границей, третьи — периодический подвод тепла к границе. Однако единого мнения пока не сложилось [3].

Анализ литературных источников позволил выявить ряд технологических приемов, позволяющих получить измельченную структуру. Так, хорошо известно использование вибраций сварного изделия; ввод энергии от импульсного источника нагрева; импульсная подача присадочной проволоки в различных пространственных положениях; применение источников с модуляцией сварочного тока, воздействующего на жидкий металл хвостовой части ванны, а также в ряде случаев ввод отдельных тепловых источников, влияющих на зону термического влияния около осевой линии шва; применение внешнего электромагнитного воздействия (ЭМВ) на расплав как в непрерывном режиме, так и пульсирующего с различной частотой магнитного поля и т.д. [4]

Одни авторы связывали условия образования структуры металла шва с влиянием подвода тепла к фронту затвердевания. Другие исследователи полагали, что колебания жидкого металла сварочной ванны играют важную роль в структурообразовании [5].

Анализ применяемых марок сталей показывает, что наиболее часто среди высоколегированных сталей используется сталь марки 12Х18Н10Т. Это объясняется тем, что аустенитные хромоникелевые стали, к которым относится сталь марки 12Х18Н10Т, обладают хорошей свариваемостью, высокой пластичностью и ударной вязкостью, высокими механическими свойствами при отрицательных температурах, устойчивостью против окисления на воздухе и в атмосфере продуктов сгорания топлива при температурах ниже 900 С, что обеспечивает надежную работу конструкций в течение длительного времени. Однако, при уникальном комплексе физико-механических свойств, исследуемая сталь имеет и ряд недостатков: невысокую прочность и твердость, высокую чувствительность к напряжению

при нагрузках и что особенно необходимо отметить, подверженность сварных швов межкристаллитной коррозии (МКК) [6].

В работе предложен метод повышения качества наплавляемых слоев из стали 12Х18Н10Т при аргонодуговой наплавке.

Аргонодуговую наплавку производили на пластины стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм на установке с инверторным источником питания. Аргонодуговую наплавку проводили по режиму, приведенному в табл.2. Волновод подведен снизу пластины.

Для исследования возможностей модифицирования структуры применяли дополнительное ультразвуковое воздействие на наплавляемый материал с помощью волновода, подведенного к нижней поверхности пластины. Ранее в работах авторов было установлено, что наибольшее влияние ультразвуковое воздействие оказывает на расстоянии 30 мм от волновода – позиция 3. Для исследования получены 2 образца:

Образец №1 – аргонодуговая наплавка без ультразвукового воздействия.

Образец №2 – аргонодуговая наплавка с ультразвуковым воздействием.

Рассмотрено влияние ультразвуковых колебаний, накладываемых в процессе аргонодуговой наплавки стали 12Х18Н10Т для реализации процесса аддитивного формирования изделий.

Показано, что УЗ колебания оказывают благоприятное воздействие на структурообразование в металле наплавки, а также ЗТВ. Установлено, что достигается уменьшение размера зерна при УЗ воздействии на 2-3 балла.

Отмечается увеличение твердости наплавленного слоя с применением УЗ колебаний до 10% по отношению к режимам обработки без дополнительного воздействия.

#### **Список литературы**

1. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. Киев: Техніка, 1968. 312 с.
2. Сутырин Г. В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны. // Автоматическая сварка, 1975. – №5. - С.7–9).
3. Аристов С. В., Руссо В. Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава / Сварочное производство, 1982. – №11. – С. 42–44.
4. Петров А. В., Бирман У. И. Кристаллизация металла шва при импульсно-дуговой сварке. //Сварочное производство, 1968. №6. С. 1-3.
5. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Карпов А.Л., Зарипов М.З. Исследование влияния виброобработки в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 09Г2С // Нефтегазовое дело. 2007. № 5 С. 183-186
6. Алов А. А., Виноградов В. С. Повышение качества металла сварных швов // Сварочное производство, 1957. № 7. – С. 9-10.

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОПТОВОЛОКОННОГО ПЬЕЗОДАТЧИКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*А.А. ПАНЬКОВ, П.В. ПИСАРЕВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: [pisarev85@live.ru](mailto:pisarev85@live.ru)

Высоконагруженные элементы авиационных конструкций, такие как крыло самолета или вертолетные лопасти создают существенные колебания и шум в силу изменения действующих на них аэродинамических нагрузок при изменении их азимутального угла. С появлением пьезоактивных материалов появилась возможность разработки эффективных и экономически выгодных интеллектуальных систем по борьбе с вибрациями. Пьезоактуаторы, интегрированные в обшивку крыла или лопасти несущего винта, создают динамическое закручивание и искривленность конструкции, адаптируя ее в любой момент времени к условиям полета, что существенно уменьшает колебания, шум и, в целом, улучшает летные характеристики конструкции.

Для мониторинга структурных полей деформирования и организации обратной связи в управляемых элементах композитных конструкций необходимы современные высокоточные датчики на основе интеллектуальных материалов, которые могут быть использованы в качестве чувствительных, трансляционных, управляющих и адаптирующихся к заданным условиям диагностики элементов для интеграции в сложные композитные структуры. Для этих целей широкое применение находят волоконно-оптические датчики, в которых в качестве основного элемента используется оптическое волокно (световод). Световод может использоваться в качестве линии передачи информативного сигнала и/или чувствительного элемента, в частности, в виде участка световода с дифракционной решёткой Брэгга [1, 2]. Перспективным решением проблемы обратной связи в элементах композитных конструкций являются сенсорные пьезоэлектрические сети [3-5], внедренные в структуру конструкции. Предложены конструкции пьезоэлектролюминесцентных оптоволоконных датчиков для диагностирования давления [6,7] и сложного объемного напряженно-деформированного состояния в композитной конструкции [8] с использованием алгоритмов [7] обработки приемником-анализатором интегральных оптических сигналов на выходе из световода датчика. При этом актуальными остаются задачи разработок эффективных алгоритмов расшифровки информативных сигналов датчика и корректной идентификации диагностируемого сложного объемного напряженно деформированного состояния.

Настоящая работа посвящена разработке численной модели и изучению закономерностей распределения электроупругих полей в элементах пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика [8] и в окружающем его композите под воздействием сложного объемного напряженно-деформированного состояния и управляющего напряжения на электродах датчика. Численное моделирование взаимодействия и распределения неоднородных связанных электроупругих полей в элементах фрагмента датчика, внедренного в деформированный композитный объем волокнистого стеклопластика, с учетом действия управляющего напряжения на электродах выполнено в системе конечно-элементного анализа ANSYS, с применением многопроцессорного вычислительного комплекса.

Геометрические параметры численной модели: радиусы концентрических цилиндрических поверхностей  $r_{(1)}=1\text{мм}$ ,  $r_{(2)}=1.2\text{мм}$ ,  $r_{(3)}=1.4\text{мм}$ ,  $r_{(4)}=2.8\text{мм}$  направленных по оси  $r_3$  в центре параллелепипеда с ребрами, ориентированными по координатным осям  $r_i$  и со значениями 16.8мм по осям  $r_{1,2}$  и 27.2мм по оси  $r_3$ ; расчетная область (рис.1,а) была дискретизирована на  $18 \cdot 10^6$  конечных элементов, из которых  $12 \cdot 10^6$

- для цилиндрической области самого датчика с буферным слоем. Электроупругие характеристики фаз датчика: изотропные свойства световода, изотропные свойства полимерного электролюминофора, трансверсально-изотропные свойства полимерного пьезоэлектрика PVDF (в главных осях) приведены в [2], изотропные упругие свойства буферного слоя из полиэтилена в [7], трансверсально-изотропные с осью симметрии  $r_3$  свойства параллелепипеда приравнены к эффективным свойствам однонаправленного волокнистого стеклопластика с объемной долей волокон 0.6. Для расчета информативных коэффициентов  $\mathbf{a}_{\varepsilon(j)}$  последовательно задавались простые деформации  $\varepsilon_{ij}^*$  параллелепипеда через перемещения  $\hat{u}_i = \varepsilon_{ij}^* \hat{r}_j$  точек  $\hat{\mathbf{r}}$  на его гранях при заданных нулевых значениях управляющих потенциалов на электродах датчика. Для расчета управляющих коэффициентов  $a_{U(j)}$  рассматривался случай действия на управляющих электродах датчика единичного электрического напряжения  $\hat{U}_{упр}$  в отсутствие перемещений для точек граней параллелепипеда,  $\varepsilon^* = 0$ . По результатам численных исследований получены численные значения информативных  $\mathbf{a}_{\varepsilon(j)}$  и управляющих  $a_{U(j)}$  коэффициентов датчика, необходимых для диагностирования сложного объемного напряженного состояния внутри композитных конструкций, нахождения локаций и величин неоднородностей компонент тензоров напряжений и деформаций на макро- и микроуровнях композита, с использованием алгоритмов диагностирования [7].

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00722).

#### **Список литературы**

1. Окуси Т. Волоконно–оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат. - 1990. – 256 с.
2. Guemes A., Fernandez–Lopez A., Soller B. Optical fiber distributed sensing – physical principles and applications // Structural Health Monitoring–an International Journal. - 2010. -Vol.9. -№ 3. - pp.233–245.
3. Patent US 20060254366 A1. Sensor and sensor array for monitoring a structure / Caroline Williamson, Lisa Fixter (nee Humberstone), Andrew Clarke. – Оpubл. 16 ноября 2006 г.
4. Patent US 7458266 B2. Method and apparatus for detecting a load change upon a structure and analyzing characteristics of resulting damage / Shawn J. Beard, Xinlin Qing, HianLeng Chan, Chang Zhang, Fuo–Kuo Chang. – Оpubл. 2 декабря 2008 г.
5. Patent US 6399939 B1. Sensor array system / Mannur J. Sundaresan, Anindya Ghoshal, Mark J. Schulz. – Оpubл. 4 июня 2002 г.
6. Патент. Волоконно–оптический датчик давления / Паньков А.А.; заявка № 2016136058 от 06.09.2016 г.
7. Паньков А.А. Пьезоэлектрoлюминесцентный оптоволоконный датчик для диагностики напряженного состояния и дефектоскопии композитов // Механика композитных материалов. – 2017. – Т. 53. – № 2. – С. 325–344
8. Патент. Волоконно–оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А.; заявка № 2017111405 от 04.04.2017 г.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОвого РАСШИРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОХЛАЖДЕННОЙ ЗАКЛЕПКИ ПРИ СОЗДАНИИ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Д.А. ПОТЯНИХИН<sup>1</sup>, Е.М. ДУБЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

<sup>2</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет

E-mail: potyanikhin@mail.ru

Неразъемные заклепочные соединения широко используются в машиностроении, в частности, в авиационном производстве. В зависимости от назначения, к соединениям предъявляются требования прочности, жесткости и герметичности. Отверстия под заклепки в деталях получают продавливанием или сверлением. Поверхности таких отверстий могут иметь дефекты в виде трещин, шероховатостей или острых кромок, что уменьшает герметичность и прочность соединения на срез. Одним из способов преодоления таких последствий поверхностных дефектов является горячая клепка. Стальную заклепку нагревают до 1100 °С и вставляют в отверстие соединяемых элементов. При остывании заклепка укорачивается и плотно стягивает соединяемые детали.

Однако в конструкциях из алюминиевых сплавов допускается только холодный способ клепки, при этом сплав заклепки и сплав соединяемых элементов должен быть одинаковым для предотвращения коррозии. В работах [1, 2] рассматривается способ создания заклепочного соединения с помощью азотного охлаждения заклепок. В отверстия соединяемых элементов чуть меньшего диаметра, чем у заклепки, находящихся при комнатной температуре, помещают охлажденную в азоте заклепку. Нагреваясь до комнатной температуры, заклепка подвергается тепловому всестороннему расширению и создает посадку с натягом. Возникающие в материале соединяемых элементов пластические деформации сглаживают острые кромки. Затем производится расклепывание обычным способом.

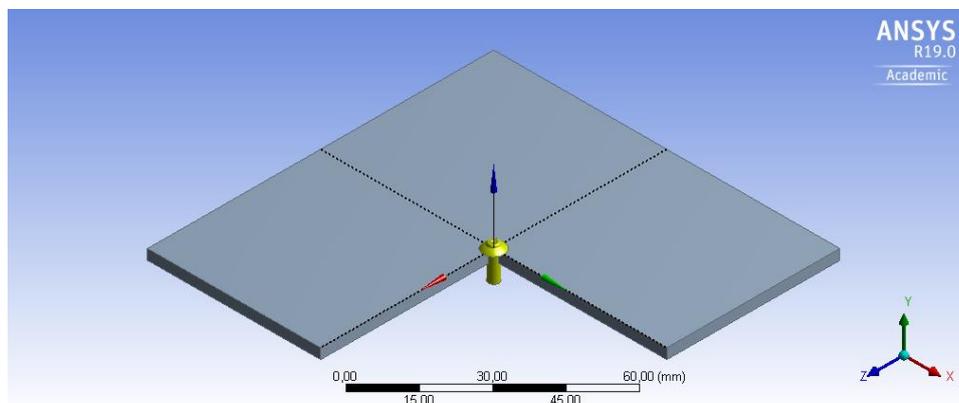


Рисунок 1 – Геометрическая модель заклепки и пластины (в разрезе)

В настоящей работе представлены результаты моделирования теплового расширения предварительно охлажденной в азоте заклепки, помещенной в отверстие пластины в конечно-элементном пакете ANSYS. В рамках данной работы использовались заклепки 3–8–Ан.Окс с плоско-скругленными головками с компенсаторами, изготовленные по ОСТ 1 34040 – 79 из сплава В65 [3]. На рисунке 1, а представлена геометрическая модель заклепки и пластины (в разрезе). Толщина пластины 3 мм. Решается несвязанная задача термоупругопластичности. На первом этапе решается задача о распределении температуры в системе заклепка-пластина. В начальный момент времени заклепка имеет температуру  $-196^{\circ}\text{C}$ . Диаметр отверстия равен диаметру охлажденной заклепки. Учитывается теплообмен с окружающей средой.

Материал пластины В65. Полученное решение температурной задачи используется как параметр на втором этапе при решении деформационной задачи. Учитывается зависимость параметров материала от температуры [4].

Задача решалась в осесимметричной постановке, в качестве оси симметрии была выбрана ось заклепки. Таким способом были проведены вычисления для определения напряженно-деформированного состояния в системе заклепка-пластина. На рисунке 2 показаны поля необратимых деформаций в пластине и заклепке через 5 с.

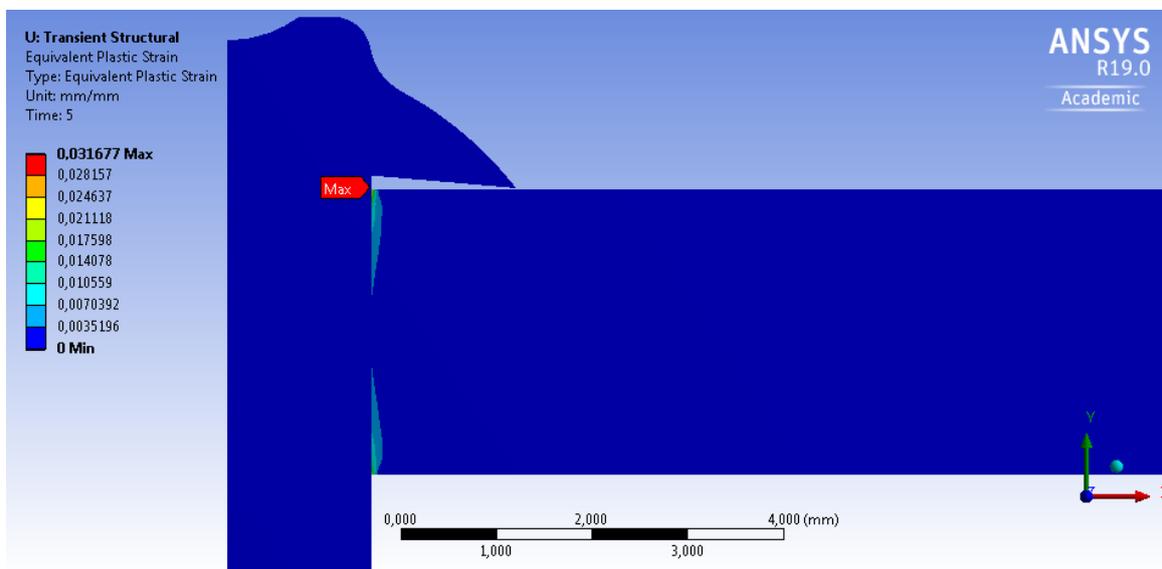


Рисунок 2 – Поля необратимых деформаций в пластине и заклепке через 5 с

За счет того, что при низких температурах материал обладает большей жесткостью, пластические деформации возникают только в пластине. Значит, действительно, дефекты поверхности отверстия в процессе установления теплового равновесия могут устраняться.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМиМ ДВО РАН №007-00285-18-00.*

#### Список литературы

1. Способ клепки заклепками с компенсатором [Текст] : пат. 1718440 СССР: МПК В 21 J 15/02 / Аксютин В.Д., Гладышева Л.Г., Плауцин Д.В.; заявитель и патентообладатель Самарский филиал науч.-исслед. ин-т технологии и организации производства двигателей. — № 4788888/27; заявл. 06.02.1990; опубл. 30.10.1994.
2. Ткачева А.В. Соснин А. Математическое моделирование горячей посадки заклепки в отверстия // Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневосточной школы-семинара, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 сентября 2017 г. / редкол.: А. И. Евстигнеев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ». – 2017. – С. 79-81.
3. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
4. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: АТОМИЗДАТ, 1976. – 1100 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДАЧИ КОНЦОВ ТОНКОСТЕННЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Д.А. ПОТЯНИХИН<sup>1</sup>, Б.Н. МАРЬИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

<sup>2</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет

E-mail: potyanikhin@mail.ru

Практика эксплуатации трубопроводов показывает, что значительное количество их разрушений связано с утонением в местах изгибов и резкого перехода от одного диаметра к другому [1]. Сделать этот переход более плавным можно при помощи соединительных патрубков с переменным диаметром. Получать такие детали можно способом раздачи – операцией обработки материалов давлением для увеличения диаметра заготовки в очаге деформации [2].

В настоящей работе в пакете МКЭ-анализа ANSYS изучается процесс формообразования патрубков холодным деформированием трубчатых заготовок. В вычислительных экспериментах пуансон и заготовка имеют форму, как на рисунке 1, а. На чертеже (рисунок 2, б) приведена половина осевого сечения. Образующая пуансона имеет три прямолинейных участка (*A*, *B* и *Д*) и два сопряжения в форме дуг окружностей с разным направлением выпуклости (*Б* и *Г*). Радиус  $R_1$  равен внутреннему радиусу трубчатой заготовки,  $R_4$  – внутреннему радиусу патрубка после раздачи. Участок *A* наклонен к оси симметрии на угол  $\alpha_1$ , участок *Д* – на угол  $\alpha_4$ . Такая конструкция предусмотрена для облегчения снятия деформированного патрубка.

Закрепление пуансона производилось заданием нулевых смещений по вертикали во всех узлах основания и нулевых радиальных смещений узлов, лежащих на оси симметрии (рисунок 1, в). Верхний торец трубы подвергается перемещению в вертикальном направлении вниз. Задача решалась в осесимметричной постановке.

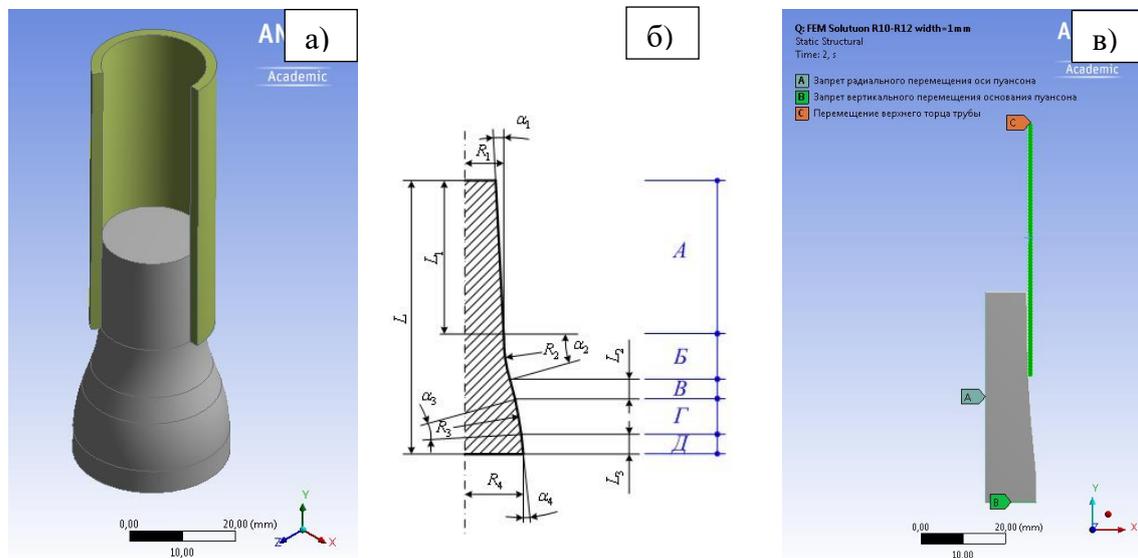


Рисунок 1 – Модель системы заготовка-пуансон: а) геометрическая модель пуансона и трубчатая заготовка (в разрезе); б) схема пуансона (половина осевого сечения); в) закрепления и граничные условия

Длина заготовки в вычислительных экспериментах выбиралась равной 60 мм, внутренний радиус – 10 мм, толщина стенки изменялась от 0,5 мм до 2 мм с шагом 0,5 мм. Геометрические размеры пуансона:  $L=50$  мм,  $L_1=20$  мм,  $L_2=5$  мм,  $L_3=5$  мм,  $R_1=10$  мм,

$R_2=102,18$  мм,  $R_3=102,18$  мм,  $R_4=12$  мм,  $\alpha_1=1^\circ$ ,  $\alpha_2=5,622^\circ$ ,  $\alpha_3=6,622^\circ$ ,  $\alpha_4=1^\circ$ . Коэффициент раздачи  $R_4/R_1=1,2$ . Для описания напряженно-деформированного состояния заготовки и оснастки используется билинейная упругопластическая модель с упрочнением [3]. Пуансон выполнен из стали 30ХГС [4], труба – из алюминиевого сплава Д16 [5]. На поверхности контакта трубы с пуансоном коэффициент сухого трения принят равным 0,1.

На рисунке 2 показано распределение напряжений по Мизесу в заготовке в нижнем положении (а) и в деформированной детали после извлечения оснастки (б), полученное для трубы с толщиной стенки 1 мм.

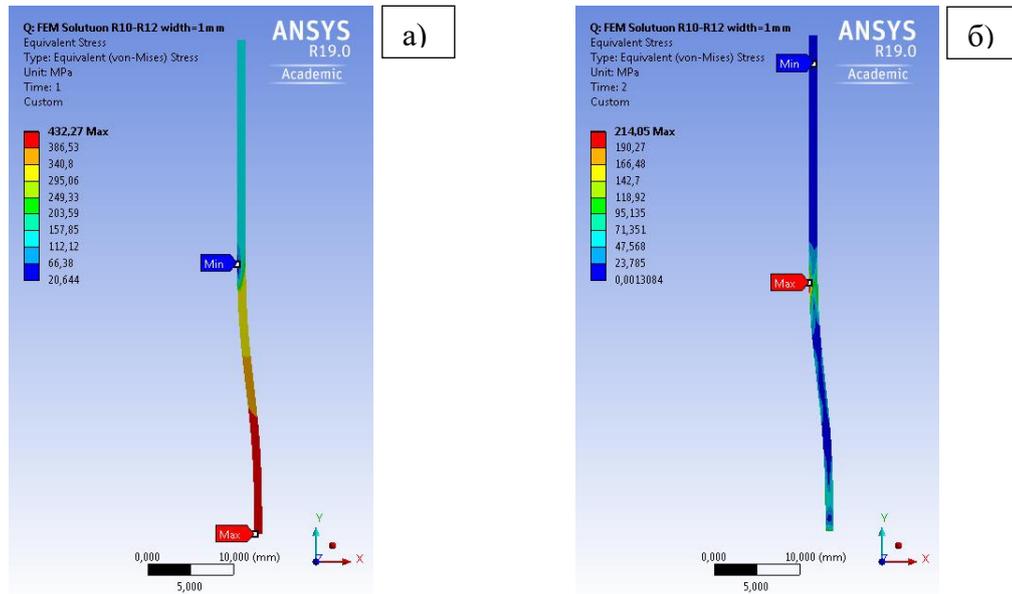


Рисунок 2 – Напряжения по Мизесу в трубе с толщиной стенки 1 мм:  
а) в нижнем положении заготовки, б) после извлечения оснастки

Для всех образцов с толщиной стенки от 0,5 мм до 2 мм найдены максимальные напряжения, остаточные деформации, пружинение в осевом и радиальном направлениях. Максимальное утонение стенок трубы для всех образцов не превосходит 8,5%.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМиМ ДВО РАН №007-00285-18-00.*

#### Список литературы

1. Марьин Б.Н., Ким В.А., Сысоев О.Е., Пхон Х.К., Мин К.Х. Анализ дефектов эксплуатируемых гидрогазовых систем трубопроводов // Ученые записки КнАГТУ.– 2017. – Т. 1. – № 1 (29). – С. 79–89.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
3. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С.В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др.; под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 627 с
5. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.

**СРАВНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ  
МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК  
ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ**

*А.С. СМИРНОВА<sup>1</sup>, И.В. ВЛАСОВ<sup>1</sup>, Р.В. СТАНКЕВИЧ<sup>2</sup>, А.В. ЯКОВЛЕВ<sup>2</sup>, Ю.И. ПОЧИВАЛОВ<sup>1</sup>,  
Д.В. ВАЛУЕВ<sup>3</sup>, С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

<sup>3</sup>Юргинский технологический институт ТПУ

E-mail: roman3014@mail.ru

Сварка металлических материалов является одной из наиболее распространенных и изученных технологических операций. Однако для сварных соединений существует значительное количество проблем, связанных, например, с низкой усталостной долговечностью и ударной вязкостью материала сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Исходная структура основного металла, как правило сформированная в ходе многоступенчатой термообработки и/или контролируемой горячей прокатки под требуемые условия эксплуатации, деградирует в результате сильного и неоднородного (локализованного) нагрева в процессе сварки.

Одним из эффективных способов повышения механических (прежде всего, усталостных) свойств деталей машин является поверхностное пластическое деформирование. Пластическая деформация поверхностного слоя увеличивает твердость, снижает шероховатость, обуславливает формирование сжимающих напряжений, которые могут заметно повышать усталостную долговечность [1-3]. Простым и доступным методом поверхностного пластического деформирования является ультразвуковая обработка (УЗО). Однако она приводит к существенной модификации структуры лишь в небольшом по толщине поверхностном слое. В этом случае, при фрикционном и коррозионном износе поверхностного слоя, дальнейшее распространение усталостных трещины вглубь материала не будет сдерживаться, а разрушение детали будет происходить с прежней интенсивностью.

Развитием метода ультразвукового наноструктурирования поверхностных слоев является применение высокочастотного электрического поля, меняющего характер экранирования атомов электронным газом и их подвижность [2]. Это может существенным образом влиять на развитие процессов массопереноса. Таким образом, основанная на данном принципе импульсная механо-электрофизическая обработка (ИМЭО) реализуется за счет совмещения двух ключевых механизмов: а) формирования зон кривизны, что достигается приложением импульсного ударного воздействия, стимулирующего распространение упругих волн по всему объему (всей толщине) металла сварного шва; б) возбуждение кристаллической решетки за счет приложения высокочастотного импульсного электрического поля, стимулирующего распространение потоков деформационных дефектов на различных масштабных уровнях, и в результате, способствующих модификации структуры металла шва и ЗТВ далеко за пределами поверхностного слоя.

Выбор в качестве объекта исследования трубной стали 17Г1С обусловлен её широким спектром применения, в том числе для изготовления конструкций с помощью сварочных технологий. Данная сталь также активно применяется для изготовления труб газопроводов, что повышает актуальность вопроса увеличения срока службы неразъемных соединений. Так как ИМЭО основана на ультразвуковой ударной послесварочная обработке (УУПО), то в данной работе проведено сравнение этих двух способов воздействия.

Целью данного исследования было сравнение эффективности ультразвуковой ударной и импульсной механо-электрофизической обработок сварных соединений трубной стали 17Г1С на модификацию структуры и свойств.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что сталь в состоянии поставки имеет феррито-перлитную структуру со слабо выраженной полосчатостью. В процессе формирования неразъемного соединения сварной шов стали 17Г1С приобретает дендритную

структуру с преимущественной ориентацией структурных элементов в направлении к центру шва, что обусловлено быстрым теплоотводом. Микротвёрдость сварного шва заметно превосходит таковую для основного металла. По мере удаления от шва происходит её снижение, и на расстоянии 15-20 мм от его центра значения микротвёрдости достигают минимального уровня ( $H_{\mu}=1.5\pm 0.12$  ГПа) (рис. 1а). На удалении 30 мм микротвёрдость постепенно возрастает до уровня, соответствующего материалу без шва ( $H_{\mu}=1.67\pm 0.03$  ГПа). Проводимые с поверхности УУПО и ИМЭО данной зоны не выявили признаков развития пластической деформации по поперечному сечению.

В ЗТВ после УУПО основное воздействие концентрируется в поверхностном слое, что выражается в интенсивной пластической деформации ферритных зёрен на глубину не более 100 мкм. Микроструктура образца после ИВЭО подобна таковой для стали после УУПО, однако визуально, следы развития пластической деформации как в поверхностном слое, так и в целом по поперечному сечению проявляются в меньшей степени. Это подтверждают более низкие значения микротвёрдости.

В сварном шве после УУПО микротвёрдость в поверхностном слое повысилась до  $H_{\mu}=4.25\pm 0.1$  ГПа; после ИМЭО чуть меньше - до  $H_{\mu}=4.0\pm 0.1$  ГПа (рис. 1,б кривые 2 и 3, соответственно). На глубине более 500 мкм значения микротвёрдости после обоих типов обработки снижаются до значений, соответствующих необработанному сварному шву (кривая 1). Аналогичная картина наблюдается и на расстоянии 17 мм от центра шва (рис. 1,в). При этом глубина модификации структуры после УУПО выше, поскольку микротвёрдость изменяется даже в сердцевине образца, чего не наблюдается в результате ИМЭО.

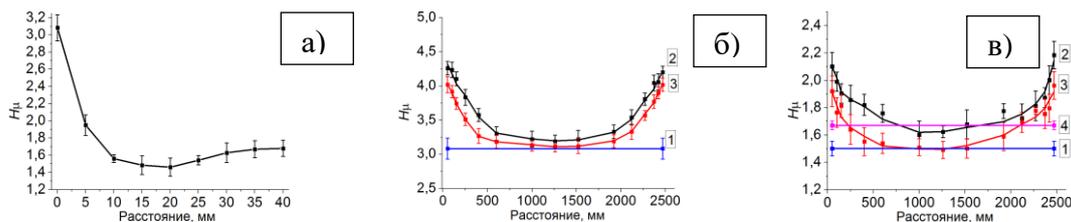


Рисунок 1 – Графики изменения микротвёрдости: (а) измерение от центра шва вдоль оси образца (в продольном направлении); измерение по поперечному сечению: (б) зона сварного шва; (в) ЗТВ - на удалении 17 мм от центра шва; 1) необработанный сварной шов; 2) шов после УУПО; 3) шов после ИМЭО; 4) сталь в состоянии поставки (без шва)

Таким образом, ИМЭО, в сравнении с УУПО, приводит к меньшему упрочнению и глубине проработки поверхностного слоя, однако добавление электрофизического воздействия может увеличить однородность его структуры и равномерность распределения внутренних напряжений. Этот аспект будет исследован в дальнейших работах при испытаниях на статическое, циклическое и ударное нагружения.

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00679.

#### Список литературы

1. Панин В.Е., Панин А.В. Проблемы мезомеханики прочности и пластичности наноструктурных материалов // Изв. вузов, Физика. - 2004. – Т. 47, № 8. – С. 5–17.
2. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В., Почивалов Ю.И. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов // ФММ. – 2007. – Т.104, № 6. – С. 1–11.
3. Власов И.В., Мухорьянов Р.Б. Исследование влияния ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства стали 12Х1МФ // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: труды конференции. 2015. – С. 57–60.

## ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 30X13 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И МАЛОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ

*В.В. ПРОБОТЮК, В.Ф. НОВИКОВ, К.Р. МУРАТОВ, Р.А. СОКОЛОВ*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

E-mail: falcon.rs@mail.ru

В работе приведены результаты исследований проведенных на высокохромистой нержавеющей стали 30X13, содержащей 12-14% хрома. Сталь обладает высокой твердостью и прочностью, является ферромагнитной, что позволяет выполнять контроль ее качества и состояния магнитными методами.

Неоднородности в структуре стали существенно влияют на механические и магнитные параметры. Скопление примесей, наличие дислокаций и включений в большей степени оказывают влияние на формирование магнитных доменов и их структуру, и тем самым сказываются на магнитных свойствах материала [1-3].

В работе [4] рассмотрено магнитоупругое размагничивание малоуглеродистой стали под действием циклического нагружения. Показано, что зависимость пиковых значений намагниченности от номера цикла аппроксимируется степенной функцией, а ее коэффициенты зависят от амплитуды нагружения. Однако такой подход учитывает только значения соответствующие максимальным и минимальным нагрузкам.

Исследование влияния циклического нагружения стали 30X13 на изменение ее магнитоупругого сигнала при помощи вейвлет-анализа, является целью данной работы.

Для анализа были использованы полученные магнитоупругие циклограммы закаленных и отпущенных при различных температурах (от 200 °С до 650°С) образцов стали 30X13. На рисунке 1 представлен пример магнитоупругой циклограммы для образца стали 30X13 с температурой отпуска 530 °С при величине нагрузок 160 и 900 МПа.

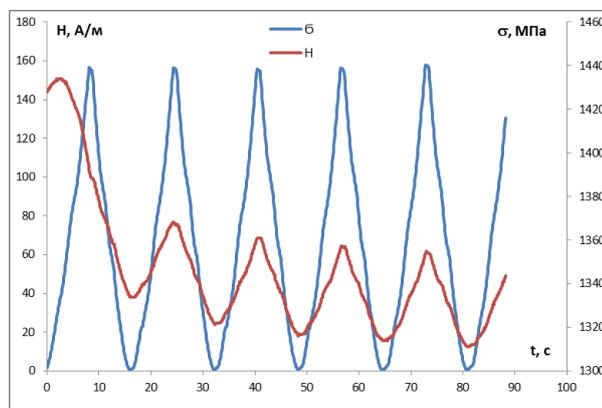


Рисунок 1 – Зависимость напряженности магнитного поля и изменения механических напряжений от времени для образца подвергнутого температуре отпуска 530° С при амплитуде механических напряжений  $\sigma=150$  МПа

По полученным экспериментальным кривым было установлено, что, для данной стали, при указанных температурных режимах обработки начиная с температуры 450°С наблюдается изменение знака магнитного пьезоэффекта, при увеличении механической нагрузки. При меньших температурах явления такого рода не наблюдаются. Изменение знака магнитного пьезоэффекта может быть связано с более интенсивными изменениями, происходящими в структуре стали. Такие изменения обусловлены укрупнением цементитных частиц в результате слияния (коагуляция цементита). Данные частицы

цементита служат некими барьерами для движения доменных границ и вращения векторов намагниченности. Внешние нагрузки выступают в роли дополнительного источника энергии, которая помогает доменным границам преодолевать неоднородности структуры [3,7-8 ].

В настоящей работе предложено анализировать магнитную циклограмму в зависимости от температуры отпуска, при помощи вейвлет анализа, что позволит представить полученную информацию в более полном виде.

Разработан алгоритм в системе СКМ Mathcad для исследования влияния циклического воздействия при помощи одномерного анализа на базе первой производной от функции Гаусса. Проведен анализ связи вейвлет отклика магнитоупругого сигнала при малоцикловых нагрузках, с механическими свойствами стали 30Х13. Обработав полученные магнитные циклограммы через одномерное дискретное Вейвлет преобразование были получены коэффициенты, по величине которых можно судить о процессах происходящих в стали.

Сопоставив все изменения, происходящие в величине полученных коэффициентов можно прийти к следующему заключению с увеличением числа циклов, также как и при увеличении величины нагрузки наблюдается уменьшение величины коэффициентов одномерного вейвлет – преобразования, за величину которых отвечают, по всей видимости структурные неоднородности. Также с возрастанием числа циклов происходит выравнивание значений полученных коэффициентов.

#### **Список литературы**

1. Бида Г.В., Ничилурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 214 с.
2. Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С. Лекции по магнетизму. – 3-е изд. переработан доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 512 с.
3. К. Р. Муратов, В.Ф. Новиков, Д.Ф. Нерадовский, Р.Х. Казаков Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения // Физика металлов и металловедение, 2018, том 119, № 1, с. 19–25/
4. Магниторазведка: магнитная восприимчивость, индуцированная и естественная остаточная намагниченности: научное издание / В. В. Филатов; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. – 236 с.
5. Новиков В.Ф., Дягилев В.Ф., Бахарев М. С, Нассонов В.В., Прилуцкий В.В. Закономерности магнитоупругого изменения локальной остаточной намагниченности сталей//Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2006, том 72, № 6, с. 34 – 37
6. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Влияние магнитоупругости на изменение коэрцитивной силы при упругом растяжении// Новые материалы и технологии в машиностроении. Труды международной научно–технической конференции, Тюмень 2000г. с. 117–119.
7. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Влияние структурных неоднородностей на динамику магнитных доменов и электромагнитные свойства fe-3%si сплава// Вестник тамбовского университета, серия: естественные и технические науки, 2016, том 21, №3, с. 970-973.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НАПЛАВКИ МЕТОДОМ ПЛАЗМА-МИГ НА ГЕОМЕТРИЮ ВАЛИКА

С.А. ТЕРЕНТЬЕВ, Т.Э. ЕФРЕМОВ, Ю.Д. ЩИЦЫН

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет  
E-mail: Serg150189@mail.ru

Аддитивное производство металлических изделий дуговой наплавкой является новым экономичным способом получения крупногабаритных деталей сложной формы. Применение гибридных способов (Tandem, DE-GMAW и др.) позволяет повысить производительность процесса. [1, 2] Процесс плазменной наплавки плавящимся электродом (Плазма-МИГ) характеризуется высокой скоростью нанесения металла, который по качеству, не уступает материалу, получаемому традиционными способами (ковка, штамповка и др.) [3].

Одной из основных задач аддитивного производства является получение заготовок с минимальным припуском для дальнейшей механической обработки. [1, 4] Точность изделия, а также время построения и алгоритм наплавки зависят от геометрических параметров валика. [4] Исходя из вышесказанного, целью работы является определение влияния основных параметров режима наплавки Плазма-МИГ на геометрию валика: высоту ( $h$ ), ширину ( $w$ ) и глубину проплавления ( $b$ ).

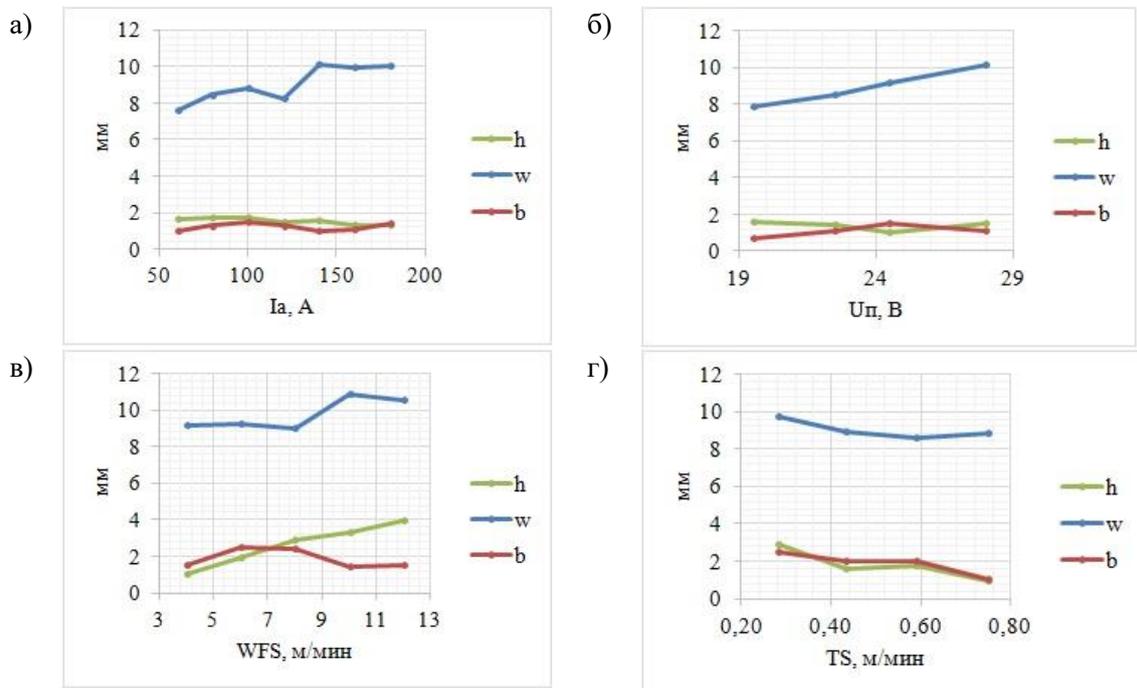


Рисунок 1 – Графики влияния основных параметров режима наплавки Плазма-МИГ (сила тока плазменной дуги ( $I_a$ ), напряжение дуги плавящегося электрода ( $U_p$ ), скорость подачи проволоки (WFS), скорость наплавки (TS)) на геометрические размеры валика (высоту ( $h$ ), ширину ( $w$ ) и глубину проплавления ( $b$ ))

Работа выполнялась на лабораторной установке с применением экспериментального плазмотрона, разработанного на кафедре СПМиТМ. Сварочными источниками питания служили ПДГ-201 (NEON) и Строитель-300Р (ФЕБ). В качестве плазмообразующего и защитного газа использовался аргон первого сорта. Наплавку производили проволокой ОК Autrod 308LSi диаметром 1,2 мм на Трубу 219x8-12X18H9T ГОСТ 9941-81.

Наплавку выполняли одиночными валиками, изменяя один из основных параметров процесса, зафиксировав остальные. В качестве основных параметров процесса приняты: сила тока плазменной дуги ( $I_a$ ), напряжение дуги плавящегося электрода ( $U_p$ ), скорость подачи проволоки (WFS), скорость наплавки (TS). Предварительные исследования выявили минимальные параметры устойчивого режима процесса:  $I_a=60$  А,  $U_p=19,5$  В, WFS=4,0 м/мин при диаметре кольцевого анода 8,0 мм, расстоянии от кольцевого анода до изделия 10-15 мм, расходах плазмообразующего и защитного газов 3,0 и 10,0 л/мин соответственно.

Измерение ширины и высоты выполняли штангенциркулем ШЦ-I-150-0,05 ГОСТ 166-89 в трех местах наплавленного валика и определяли среднее значение. Измерение глубины проплавления определяли на макрошлифах с применением микроскопа МБС-10.

На рис.1 показаны графики влияния основных параметров режима наплавки Плазма-МИГ на геометрические параметры валика.

В дальнейшем планируется определение регрессионных моделей влияния параметров режима на геометрические размеры наплавленного валика путем проведения факторного эксперимента. Полученные модели будут использоваться для создания алгоритмов послойного построения металлических изделий.

#### **Список литературы**

1. Somashekara M.A. et al. Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Т. 90. № 5–8. С. 2009–2025.
2. Yang D., He C., Zhang G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing // *J. Mater. Process. Technol.* 2016. Т. 227. С. 153–160.
3. Ронский В.Л. и др. Восстановление контактных губок цепесварочных машин плазменно-дуговой наплавкой плавящимся электродом. // *Сварочное производство.* 1989. №2. С.32-33.
4. Cao Y. et al. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2011. Т. 27. № 3. С. 641–645.

**МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ  
ОПОРНОГО КОЛЬЦА ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ ПОЛОСЫ**

*А.П. ТУРЕНКО, А.В. КОРОЛЕВ, А.А. КОРОЛЕВ, А.Ф. БАЛАЕВ*

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
E-mail: turenkoap@gmail.com

Опорное кольцо можно изготовить цельным, либо незамкнутым. Преимуществами незамкнутых колец являются самоустанавливаемость в рабочей зоне подшипника и простота изготовления. Технологический способ получения разомкнутых колец опорного подшипника скольжения состоит в прокатывании протяженной стальной полосы через вращающиеся с постоянной скоростью валки. При выходе из контакта с валками непрерывно движущаяся на протяжении всего цикла технологической операции полоса подвергается сгибанию под действием изгибающего момента, создаваемого упором.

С целью априорной оценки параметров технологического процесса, обеспечивающих получение колец требуемого диаметра при заданной геометрии и механических свойствах стальной полосы, была разработана математическая модель.

Поскольку полоса подвергается плоскому изгибу, то для проведения математического моделирования была принята расчетная схема нагружения полосы (рисунок 1) с плоской декартовой системой координат  $XOY$ . Началом системы координат  $O$  является точка выхода полосы из контакта с валками. Ось  $OX$  совпадает с направлением движения подачи полосы, ось  $OY$  направлена из точки  $O$  к центру кривизны сгибаемой полосы.

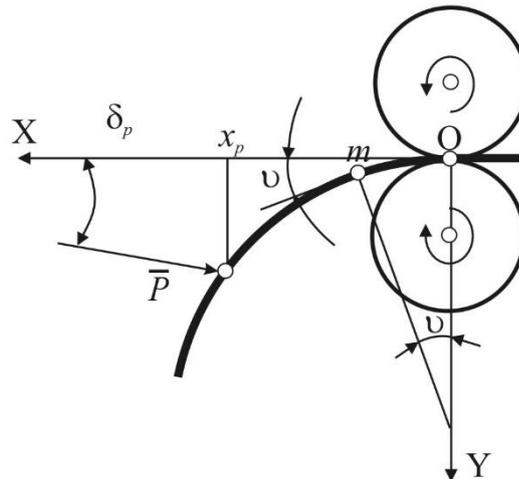


Рисунок 1 – Расчетная схема нагружения сгибаемой полосы

В случае плоского изгиба упругая линия полосы может быть описана дифференциальным уравнением (1) [1]:

$$\frac{d^2(\nu + \delta_p)}{ds^2} - \frac{d^2\theta}{ds^2} = -\frac{P}{E \cdot J} \sin(\nu + \delta_p), \quad (1)$$

где  $P$  – сосредоточенная нагрузка от упора;  $J$  – осевой момент инерции относительно оси  $OX$ ;  $s$  – длина упругой линии;  $\nu$  – угол наклона касательной в рассматриваемой точке  $m(x, y)$  упругой линии к оси  $OX$  в рассматриваемый момент времени;  $\theta$  – угол наклона касательной в рассматриваемой точке упругой линии к оси  $OX$  перед началом деформации (для начальной прямой  $\theta = 0^\circ$ );  $E$  – модуль упругости материала

заготовки;  $\delta_p$  – угол наклона сосредоточенной нагрузки  $P$  к оси  $OX$  в точке касания упора.

Выразив силу  $P$  через изгибающий момент  $M$ , на основе решения уравнения (1) было получено выражение (2) для определения максимальной величины изгибающего момента  $M_o$  в точке  $O$ :

$$M_o = 2E \cdot J \cdot \frac{\cos(\nu_p + \delta_p) - \cos(\nu + \delta_p)}{y_p \cos \delta_p + x_p \sin \delta_p}, \quad (2)$$

где  $(x_p, y_p)$  – координаты точки касания упора;  $\nu_p$  – угол наклона касательной к упругой линии в точке контакта упора.

Чтобы учесть влияние на изгиб заготовки пластической деформации необходимо определить изгибающий момент в произвольном сечении заготовки, в котором осуществляется пластическая деформация.

По аналогии с решением, представленным в [2], получены выражения для изгибающего момента упругой (3) и пластической (4) деформации полосы:

$$M_u(y_t) = 2\sigma_t \cdot \left( \frac{y_t^2}{3}(l - 2r) - \frac{1}{4}\sqrt{(r^2 - y_t^2)^3} + \frac{r^2}{8}\sqrt{r^2 - y_t^2} + \frac{r^4}{8y_t} \arcsin \frac{y_t}{r} \right), \quad (3)$$

$$M_p(y_t) = 2\sigma_t \left( \frac{h^2}{8}(l - 2r) - \frac{2}{3}\sqrt{\left(r^2 - \frac{h}{4}\right)^3} - \frac{y_t^2}{2}(l - 2r) + \frac{2}{3}\sqrt{(r^2 - y_t^2)^3} \right), \quad (4)$$

где  $r$  – радиус скругления граней полосы;  $l$  – ширина полосы в поперечном сечении;  $h$  – высота полосы в поперечном сечении;  $y_t$  – расстояние от нейтральной средней линии в поперечном сечении пластины до рассматриваемой точки.

Неизвестная величина  $y_t$  находится из решения равенства (5):

$$M_u(y_t) + M_p(y_t) = M_o. \quad (5)$$

Выражение для определения радиуса получаемого кольца с учетом возвращаемой после снятия нагрузки упругой деформации на основании решения уравнения (1) принимает следующий вид (6):

$$\rho_p(\nu_p, x_p, y_p) = 2 \cdot \frac{\cos(\nu_p + \delta_p) - \cos(\nu + \delta_p)}{y_p \cos \delta_p + x_p \sin \delta_p} + \frac{M_u(y_t)}{E \cdot J}, \quad (6)$$

Полученное выражение (6) позволяет рассчитывать радиус разомкнутого кольца опорного подшипника в зависимости от координат положения контактной рабочей поверхности упора и стальной полосы.

#### Список литературы

1. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. – М: Наука, 1986. – 296 с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ И МЕТОДА Н.Н. ДАВИДЕНКОВА

*А.А. ШИРЯЕВ<sup>1</sup>, В.Н. ТРОФИМОВ<sup>1</sup>, В.В. КАРМАНОВ<sup>1</sup>, А.С. ГОРБУНОВ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

<sup>2</sup>АО «Редуктор-ПМ»

E-mail: alex.shiryayev.pstu@gmail.com

Трансмиссии являются важным агрегатом авиационной техники, в частности, в приводах вертолетов и включают валы, редукторы и вспомогательные звенья. Для обеспечения назначенного ресурса трансмиссии в целом требуется обеспечить заданную прочность и износостойкость зубьев зубчатых колес редукторов, входящих в состав трансмиссии. Одной из причин преждевременного выхода из строя зубчатых колес являются остаточные напряжения (ОН). Поэтому актуальной является задача контроля уровня технологических остаточных напряжений, формируемых на финишных операциях обработки зубчатых колес – зубохонинговании, полировании, шлифовании. Так как для определения ОН используют, как разрушающие, так и неразрушающие методы, то актуальна также задача оценки достоверности полученных результатов.

В работе исследуется формирование ОН после операции зубохонингования в зубьях колес изготовленных из стали 18Х2Н4А-Ш.

Для определения ОН использовались разрушающий метод Давиденкова Н.Н. (МД) с использованием комплекса МерКулОН «Тензор-3» [1] и неразрушающий метод рентгеновской дифрактометрии (РД) с использованием комплекса XStress 3000 [2].

ОН определялись на поверхностях профиля зубьев в контрольных точках (рис. 1б), расположенных на делительной окружности. При использовании метода Давиденкова Н.Н. из зуба вырезались полоски параллельно образующей профиля зуба (рис. 1а).

Результаты измерения ОН приведены на рис. 2. Видно, что эпюры распределения ОН качественно подобны, но наблюдается значительное расхождение в их значениях. При определении ОН методом МД в поверхностном слое толщиной до 20 мкм напряжения сжимающие равные  $\approx -40$  МПа, а на глубине более 20 мкм напряжения растягивающие  $\approx 10$  МПа. Измерение ОН методом РД (травление на глубину 200 мкм с шагом 20 мкм) показало, что напряжения в поверхностном слое сжимающие. При этом величина ОН на поверхности зуба достигает  $\approx -800 \div -900$  МПа, в подповерхностных слоях  $\approx -200$  МПа.

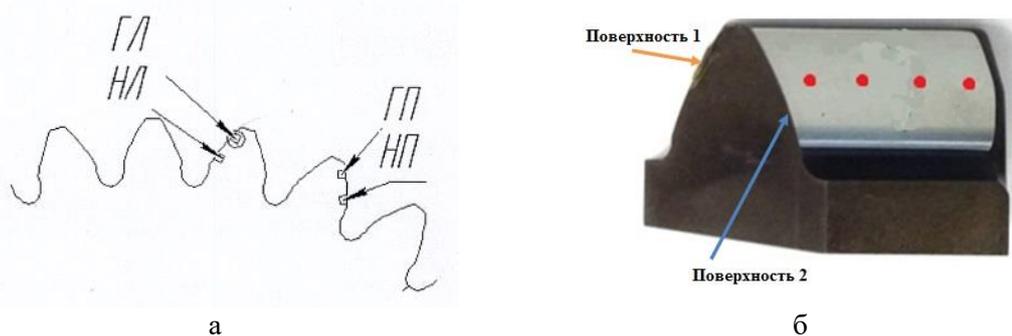
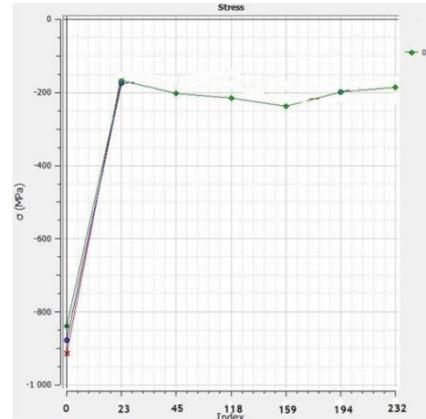
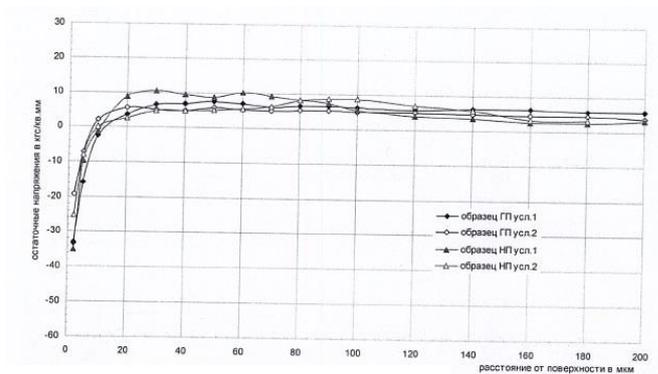


Рисунок 1 – Образцы: а) МД, схема вырезки: ГЛ и НЛ –вырезка образцов из головки ножки зуба на левой поверхности зуба, соответственно; ГП и НП –вырезка образцов из головки ножки зуба на правой поверхности зуба, соответственно;  
б) контрольные точки измерения ОН методом РД

Для измерения ОН, формируемых после зубохонингования по высоте профиля зуба, вырезались образцы (рис.3в) с поверхностями 1, 2 (рис.1 и 3а,б). Измерения проводились в

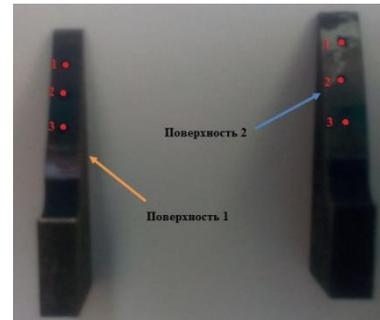
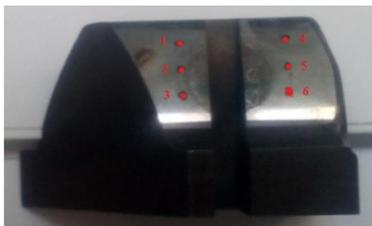
контрольных точках, указанных на рис. 3в. Результаты измерений ОН на поверхности образца, вырезанного на поверхности 1, приведены в таблице 1.



а

б

Рисунок 2 – Эпюры распределения ОН по глубине: а) метод МД; б) метод РД



а

б

в

Рисунок 3 – Контрольные точки измерения ОН: а, б – зуб после вырезки; в – вырезанные образцы

Таблица 1 – Значения ОН в контрольных точках, поверхность 1

№ точки	ОН до вырезки, МПа	ОН после вырезки, МПа
1	-212,1	-64,6
2		59,8
3		73,5

Результаты работы показывают, что ОН, измеренные с использованием разрушающих и неразрушающих методов могут существенно различаться, что подтверждает необходимость проведения детальных исследований по оценке достоверности полученных результатов определения ОН.

#### Список литературы

1. Инструкция по эксплуатации автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса для определения поверхностных остаточных напряжений МерКулОН «ТЕНЗОР-3». – НИИД, 2009. – 61 с.
2. Васильев Д. М. Дифракционные методы исследования. – М.: Металлургия, 1977. – 248 с.

**ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ  
И ОПАСНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*А.С. КУЛЕШ, Д.М. ШМИТОВ, В.П. ХРОМЦОВ*

Томский политехнический университет

E-mail: nathanexplsn@mail.ru

Цель настоящей работы заключается в установлении характера перераспределения среднеквадратичных смещений атомов при циклическом деформировании и их связи с остаточными структурными напряжениями II рода.

Ширина профиля рентгеновской линии обусловлена геометрическим фактором, зависящим от условий рентгеновской съемки, и физическим фактором. Если из экспериментально наблюдаемого профиля исключить геометрический фактор, то профиль линии своей формой будет обязан только лишь свойствам самого исследуемого образца, т.е. микронапряжениями и размерами кристаллитов.

В настоящей работе микронапряжения II рода устанавливались по уширению дифракционных линий с учетом одновременного влияния на уширение профиля от микроискажений и дисперсности.

Если  $\beta$  – физическое уширение профиля, а  $\beta_2$  – часть физического уширения дифракционной линии, обусловленная микронапряжениями, то микронапряжения II рода определяются из выражения [6]:

$$\sigma_{II} = \left( \frac{\beta_2}{4 \cdot \operatorname{tg} \theta} \right) E,$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости;

$\theta$  – брэгговский угол дифракционной линии.

Среднеквадратичные смещения атомов  $\bar{U}^2$  можно установить по выражению:

$$\bar{U}^2 = \frac{3}{4\pi^2} \left( \frac{d}{n} \right)^2 \ln \left( \frac{I}{I'} \right)$$

где  $n$  – порядок отражения;

$d$  – межплоскостное расстояние, Å;

$I'$  – интегральная интенсивность для деформированного образца;

$I$  – интегральная интенсивность для недеформированного образца (эталона).

По величине среднеквадратичных смещений  $\bar{U}^2$  можно оценить характеристическую температуру  $\Theta$ :

$$\bar{U}^2 = \frac{3h^2T}{k \cdot m \cdot \Theta^2} \rightarrow \Theta = \sqrt{\frac{3h^2T}{k \cdot m \cdot \bar{U}^2}}, \quad (1)$$

где:  $\pi = 3,141592654$ ;

$h = 6,626\,070\,040(81) \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

$k = 1,38064852(79) \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;

$m$  – масса атома (в данном случае  $m_{Fe} = 9,2736 \cdot 10^{-23}$  г =  $9,2736 \cdot 10^{-26}$  кг);

$T = 295$  К ( $t = 22$  °С).

Из (1) следует, что  $\bar{U}^2 \sim 1/(m\Theta^2)$ . В то же время величина  $(m\Theta^2)$  характеризует прочность межатомной связи, поскольку она пропорциональна силе  $F$ , возвращающей атомы в положение равновесия:  $F \sim m\Theta^2$ .

Изменения среднеквадратичных смещений атомов при циклическом деформировании иллюстрируются графиками представленными на рисунке 1.

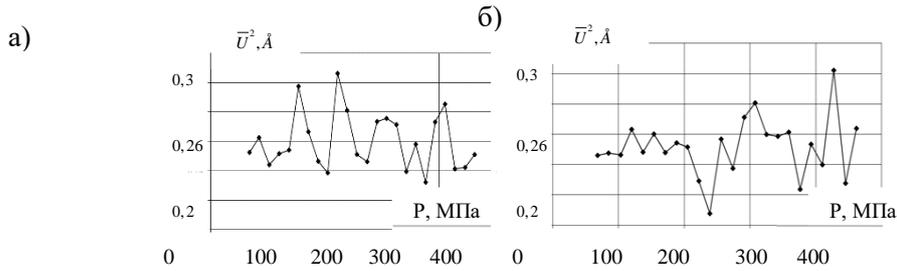


Рисунок 1 – Зависимость среднеквадратичных смещений атомов от внешней нагрузки образца стали 12Х1МФ: а) внутренняя сторона; б) внешняя

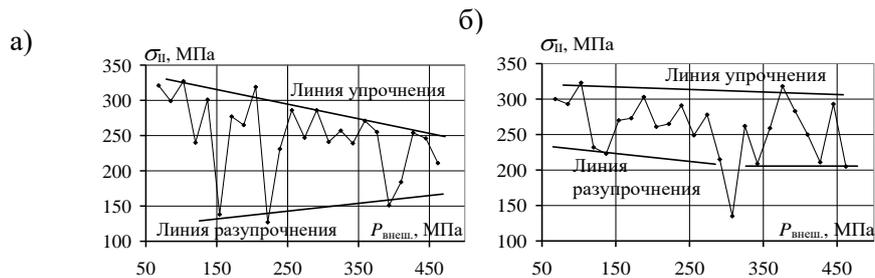


Рисунок 2 – Зависимость внутренних микронапряжений II рода  $\sigma_{II}$  от внешней нагрузки для образца стали 12Х1МФ: а) внутренняя сторона; б) внешняя

Для внутренней стороны достаточная релаксация наблюдается при  $P = 160$  МПа (рис. 2.а). При этом же давлении растет межатомное расстояние (рис. 1.а) и уменьшается, согласно (1), сила межатомного взаимодействия. На наружной стороне образца (рис. 2.б), (рис. 1.а) процессы также начинаются приблизительно в одно и то же время, т.е. начиная с 270 МПа. Таким образом, отмечается хорошее совпадение в изменениях среднеквадратичных отклонений атомов с релаксационными процессами внутренних структурных микронапряжений, доминирующими в процессах образования субмикротрещин и разрушения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ «Фундаментальные основы инженерных наук (проект № 15-08-99544а в 2014г., № 18-08-01265 в 20018 г.)

#### Список литературы

1. Ермаков С.С. Физика металлов и дефекты кристаллического строения. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1989. – 280 с.
2. Глейтер Г., Чалмерс Б. Большеугловые границы / Пер. с англ. С. Н. Горина, В. М. Половова. – М.: Мир, 1975. – 375 с.
3. Friedel J., Gullity B. D., Crussard C. // Acta Met. – 1953. – V.1. – P. 79 – 92.
4. Lyubimova L.L., Tashlykov A.A., Tabakaev R.B., Levin A.A., Popov A.Y. The effect of thermo-mechanical loading on fracture-related parameters of austenitic steel // Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 81. – pp. 45-56.
5. Lyudmila L. Lyubimova, Roman N. Fisenko, Alexander A. Tashlykov, and Roman B. Tabakaev Changes in the State of Heat-Resistant Steel Induced by Repeated Hot Deformation // Met. Mater. Int., Vol. 24, No. 1 (2018), pp. 121-129.
6. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.

**ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ  
МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ПАРОПРОВОДНЫХ ТРУБ**

*А.С. КУЛЕШ, А.С. ВОРОБЬЕВ, Д.М. ШМИТОВ*

Гомский политехнический университет

E-mail: nathanexplsn@mail.ru

Наука о сопротивлении материалов базируется на законах и выводах теоретической механики, но, помимо этого, учитывает способность материалов деформироваться под действием внешних сил [1]. Физико-механические характеристики (предел текучести, предел прочности, модуль упругости и т.п.), необходимые для оценки прочности и деформируемости материалов, определяются при помощи испытательных машин и специальных измерительных приборов – тензометров. Располагая диаграммой испытания и пользуясь разработанными в сопротивлении материалов методами расчёта, полагается, что можно предсказать, как будет вести себя реальная конструкция, изготовленная из того же материала.

Однако в процессе эксплуатации под термическими и механическими нагрузками в твердом теле изменяется взаимное расположение частиц микроструктуры, фазовый состав, наблюдаются межзеренные проскальзывания, возникают новые угловые ориентировки зерен, изменяется плотность дислокаций.

Но даже без внешних воздействий материал сплава на основе железа испытывает естественное старение, приводящее к разной степени распада твердых растворов. При этом будут изменяться и физические свойства материала.

Используемые в сопротивлении материалов приближенные инженерные методы расчета на прочность отличаются схематичностью и, в целом, при построении общей теории рассматриваются идеализированные тела со свойствами, лишь приближённо отражающими поведение реальных объектов. Тела считаются однородными (со свойствами, одинаковыми во всех точках), сплошными (без пустот), обладающими упругостью (способностью восстанавливать свои размеры после снятия нагрузки), изотропными (с одинаковыми упругими свойствами по всем направлениям). Поэтому данные методы требуют продолжения их дальнейшего детального изучения и поиска новых подходов, а также совершенствования традиционных методов контроля.

Оценка внутренней структурной поврежденности металла может базироваться на измерении характеристической температуры, характеризующей прочность межатомных связей.

Колебания атомов в кристаллической решетке реального кристалла весьма сложны, однако, на основании рентгенометрии можно оценивать среднеквадратичные смещения атомов  $\bar{U}^2$  при термическом или механическом циклическом деформировании по выражению [2]:

$$\bar{U}^2 = \frac{3}{4\pi^2} \left( \frac{d}{n} \right)^2 \ln \left( \frac{I}{I'} \right),$$

где:  $n$  – порядок отражения;

$d$  – межплоскостное расстояние, Å;

$I'$  – интегральная интенсивность для деформированного образца;

$I$  – интегральная интенсивность для недеформированного образца (эталона).

По величине среднеквадратичных смещений  $\bar{U}^2$  можно рассчитать характеристическую температуру  $\Theta$ :

$$\bar{U}^2 = \frac{3h^2T}{k \cdot m \cdot \Theta^2} \rightarrow \Theta = \sqrt{\frac{3h^2T}{k \cdot m \cdot \bar{U}^2}}, \quad (1)$$

где:  $\pi = 3,141592654$ ;

*Секция 4 – Проблемы надежности машиностроения  
и машиностроительные технологии*

$h = 6,626\ 070\ 040(81)\ 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  
 $k = 1,38064852(79)\ 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  
 $m$  – масса атома (в данном случае  $m_{Fe} = 9,2736 \cdot 10^{-23}$  г =  $9,2736 \cdot 10^{-26}$  кг);  
 $T = 295$  К ( $t = 22$  °С).

Из (1) следует, что  $\bar{U}^2 \sim 1/(m \Theta^2)$ . В то же время величина  $(m \Theta^2)$  характеризует прочность межатомной связи, поскольку она пропорциональна силе  $F$ , возвращающей атомы в положение равновесия:  $F \sim m \Theta^2$ .

Для целей диагностики в настоящей работе проведено термоциклирование образцов стали 12Х1МФ.

В таблице 1 приведены сведения о среднеквадратичных отклонениях атомов исследованных образцов и значениях характеристических температур.

Таблица 1 – Определение характеристической температуры и среднеквадратичных смещений

№ п/п	Тип стороны	d, Å	I, имп	U, Å	θ, К
Образец №1 (500 – 900) °С	внешняя	2,0230	80756	0,5330	326,3720
	внутренняя	2,0290	75223	0,5530	314,3830
Образец №2 (500 – 1000) °С	внешняя	2,0230	86366	0,5130	339,3220
	внутренняя	2,0230	98529	0,4700	369,5520
Образец №3 (100 – 500) °С	внешняя	2,0280	83181	0,5240	332,0580
	внутренняя	2,0300	90050	0,5000	347,8630
Образец №4 (исходный)	внешняя	2,0320	89296	0,5030	345,7640
	внутренняя	2,0320	105315	0,4480	387,6950
Образец № 5 (500 – 780) °С	внешняя	2,0350	109000	0,4370	397,9160
	внутренняя	2,0350	114552	0,4180	415,2740
Образец № 6 (естественное старение в течение 14 лет)	внешняя	2,0320	143476	0,3230	538,7010
	внутренняя	2,0320	153627	0,2880	604,4910

Примечание: d – межплоскостное расстояние для рефлекса (110)

При естественном старении твердого раствора (таблица 1, образец № 6) характеристическая температура существенно увеличивается. Этот эффект можно объяснить тем, что атомы отдельных зародышей новой фазы распада и атомы обедненного исходного твердого раствора, претерпевшие частичный разрыв межатомных связей, колеблются как несвязанные изолированные атомы с малой амплитудой (см. таблица 1 и выражение 1).

Из таблицы 1 следует, что характеристическая температура не является константой, а представляет собой функцию температуры, давления и структурного состояния вещества.

Характеристическая температура имеет смысл показателя микроповрежденности, связанной с разрывами межатомных связей, который может быть определен количественно – по параметру решетки, интегральной интенсивности дифракционной линии и среднеквадратичным смещениям атомов в кристаллической элементарной ячейке.

Работа выполнена при поддержке РФФИ «Фундаментальные основы инженерных наук (проект № 15-08-99544а в 2014г., № 18-08-01265 в 20018 г.)

**Список литературы**

1. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Альянс, 2014.– 624 с.
2. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ.– М.: МИСИС, 2002. – 360 с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАКЕТНЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ БЛОЧНОЙ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ

В.В. ШИЛЕР<sup>1</sup>, А.В. ШИЛЕР<sup>1</sup>, И.И. ГАЛИЕВ<sup>1</sup>, Е.Н. ПАШКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

E-mail: epashkov@tpu.ru

Для проведения макетных испытаний были изготовлены макеты колесных пар блочной конструкции (БКП), представленной на рисунке 1 [1]. Эта конструкция состоит из двух независимо вращающихся колес 3 и 5. Направляющее колесо 3 жестко насажено на ось 8, которая имеет возможность вращаться в буксовых подшипниках 9. Направляющее колесо 3 по периметру имеет форму гребня стандартного бандажа и воспринимает горизонтальные направляющие силы от боковой поверхности рельсов. Опорное колесо состоит из колесного центра 5 посредством пары подшипников 13 установлено на оси колесной пары 8 и передает вертикальную нагрузку веса подвижного состава посредством упругой прокладки 11 на бандаж 1, который катится по поверхности катания рельса. Таким образом, в блочной конструкции реализовано независимое вращение поверхностей катания колес, которые в процессе движения контактируют с поверхностями головок рельсовых нитей. За счет резиновой прокладки гибкий бандаж подрессорен относительно колесного центра, что обеспечивает упругое гашение колебаний, вызванное наличием неровностей на поверхностях катания колес и рельсов.

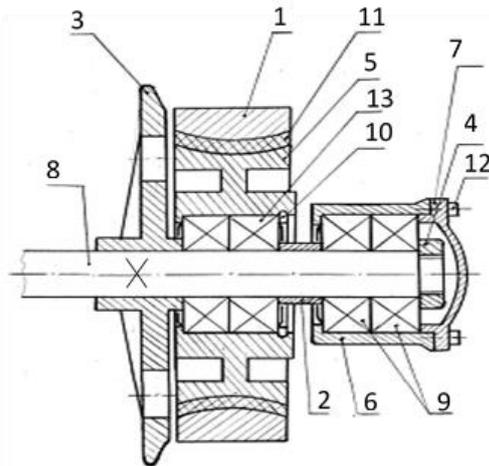


Рисунок 1 – Новая конструкция колеса колесной пары железнодорожного транспортного средства.

Основанием для изготовления физической модели блочной колесной пары является теория подобия механических систем, которая составляет содержание фундаментальной теоремы, так называемой « $\pi$  – теоремы» анализа размерностей в её классическом варианте [2, 3]. Для того чтобы системы (оригинал и модель) были механически подобны выполнены требования по геометрическому, материальному и кинематическому подобию.

Модели верхнего строения пути, тележек и колесных пар трех вариантов конструкций выполнены в масштабе геометрического подобия, который принят равным  $\lambda=20$ . Такой масштаб позволяют исследовать основные физические явления, происходящие в предлагаемой системе [2].

Для оценки характеристик блочной колесной пары при проведении макетных и натуральных испытаний используется вторая конкурирующая модель тележки со стандартными колесными парами. Это дает возможность выявить реальные преимущества блочной конструкции колесной пары и дает адекватные оценки проведенных натуральных и макетных исследований независимо от многочисленных факторов, влияющих на динамическое взаимодействие в системе «колесная пара – рельсовая колея». Процесс испытаний на физических

моделях имеет эвристический характер. Поэтому в соответствии с целью и планом модельных испытаний была составлена методика и система документирования результатов измерений в виде специальных таблиц.

Сравнительные испытания конкурирующих моделей колесных пар производились при варьировании следующих параметров системы «колесная пара – путь»:

- количество волн горизонтальных неровностей на одной из рельсовых нитей в прямом участке пути (в натуральном измерении длина волн горизонтальных неровностей  $l = 1,1$  м и амплитуда  $h = 0,001$  м);
- величина ширины рельсовой колеи в прямом участке пути;
- количество волн ( $n$ ) волнообразного износа на одной из рельсовых нитей в прямом участке пути;
- величина непараллельности колесных пар в тележке при движении в кривом и в прямом участках рельсовой колеи.

По результатам проведённых натуральных испытаний БКП на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в Щербинке установлено, что динамические показатели тележки с БКП соответствуют действующим в ОАО «РЖД» нормативам. Коэффициенты вертикальной динамики по раме тележки в порожнем режиме не превышали 0,83 при допускаемых не более 0,9. В груженом режиме коэффициенты динамики не превышали 0,39 при допускаемых не более 0,85. Коэффициенты горизонтальной динамики составили 0,36 и 0,26, соответственно, в порожнем и груженом режиме при допускаемых значениях не более 0,4 и 0,38. Коэффициенты запаса устойчивости были не менее 1,47 в порожнем и не менее 1,88 в груженом режимах при допускаемом значении не менее 1,3. Вертикальные ускорения кузова в зоне пятника над первой тележкой (БСГК) были не более 0,38g в порожнем режиме и не более 0,29g в груженом. Над второй тележкой (со стандартными колесами) эти величины составили, соответственно, не более 0,56g и 0,42g.

Все динамические показатели тележки с БКП соответствуют оценке «хорошо» (ГОСТ 33211, табл. 14). В порожнем режиме некоторые динамические показатели тележки со стандартными колесами были на 30-40% (табл.8) хуже и соответствовали оценке «удовлетворительно». В груженом режиме обе тележки получили оценку «хорошо», при этом динамические показатели тележки со стандартными колесами были на 10-25% хуже.

#### **Выводы**

1. На основании результатов статических, тормозных и ходовых испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» установлено, что прочностные и тормозные показатели тележки опытного вагона с блочными колесными парами, в порожнем и груженом режимах соответствуют требованиям «Норм расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм [4]» и РД 24.050.37 [5].

2. Блочная колесная пара с жесткими опорными колесами и при наличии второй тележки в грузовом вагоне со стандартными колесными парами имеет на 10 – 40% ниже уровень динамических показателей, чем стандартная колесная пара.

#### **Список литературы**

1. Патент № 2207250 (РФ) Колесо рельсового транспортного средства/ Шилер В.В., Шилер А.Н., Головаш А.Н., Рубежанский П.Н. – Оpubл. в БИ, 2003, № 18.
2. Шаповалов Л. А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. 288 с /Ред.кол.: В. А. Светлицкий (пред.) и др.).
3. Натурный эксперимент: Информационное обеспечение экспериментальных исследований/А. Н. Белонов, Г. М. Солодихин, В. А. Солодовников и др.; Под ред. Н. И. Бакла-шова. — М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 г. (с дополнениями и изменениями)
5. РД 24.050.37 95 «Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества» ГосНИИВ, 1995.

**МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ТРУБНОЙ СТАЛИ 17Г1С, ПОДВЕРГНУТОЙ ИМПУЛЬСНОЙ  
МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

*А.В. ЯКОВЛЕВ<sup>2</sup>, И.В. ВЛАСОВ<sup>1</sup>, А.С. СМИРНОВА<sup>1</sup>,  
Р.В. СТАНКЕВИЧ<sup>2</sup>, Ю.И. ПОЧИВАЛОВ<sup>1</sup>, Д.В. ВАЛУЕВ<sup>3</sup>, С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

<sup>3</sup>Юргинский технологический институт ТПУ

E-mail: alexandryakov1@gmail.com

Основной проблемой при обработке деталей с помощью методов поверхностного пластического деформирования, включая фрикционную обработку, является локализация процессов преимущественно в поверхностном слое [1]. При этом происходит повышение твердости, а также нивелируются либо трансформируются в сжимающие негативно влияющие на усталостную прочность и коррозионную стойкость растягивающие напряжения, возникающие при кристаллизации металла после сварки [2,3]. Однако глубина такого слоя крайне мала. Повышение интенсивности пластического деформирования поверхностного слоя без эффективной диссипации энергии в нижележащие слои может привести к его разрушению, сопровождаемому формированием множества микротрещин. Нагрев детали (послесварочный отжиг) позволяет менять структуру металла по всей глубине (например, для снятия сжимающих напряжений), однако такой способ модификации не подходит для деталей прошедших многоступенчатую термическую обработку, а также экономически весьма затратен [4].

В ИФПМ СО РАН разрабатывается комбинированный способ обработки, который позволяет существенно увеличить глубину слоев, в которых развиваются процессы пластической деформации и массопереноса. Это не должно сопровождаться разрушением поверхностного слоя, а также существенным нагревом материала. Известно, что при ударном механическом воздействии упрочнение материала происходит в результате прохождения и многократного переотражения в объеме металла упругих волн, генерируемых взаимодействующим на поверхность бойками (инструментом). Высокая вязкость трубных сталей не способствует эффективному пластическому деформированию далее поверхностного слоя, в результате чего воздействие упругих УЗ-волн преимущественно преобразуется в тепло (рассеивается) и пластическую деформацию зёрен. В то же время в нижележащих слоях в определенной степени может происходить интенсивное деформирование, сопровождающееся повышением плотности дислокаций и двойников.

В качестве развития ультразвукового воздействия предложено целенаправленное возбуждение кристаллической решётки и интенсификации процессов массопереноса за счет пропускания высокочастотного импульсного электрического тока в сочетании с механическим воздействием. Такая обработка должна повысить глубину и интенсивность модификации вместе с более равномерным распределением пластической деформации. На основании этого, в ИФПМ СО РАН, разработана импульсная механо-электрофизическая обработка (ИМЭО).

В качестве объекта исследования была выбрана конструкционная низколегированная сталь 17Г1С широко применяемая как в строительстве трубопроводных систем, так и для изготовления сварных изделий. Одним из наиболее эффективных способов упрочнения сварных соединений вязких сталей является поверхностное пластическое деформирование. Ее развитие в поверхностном слое увеличивает твердость, снижает шероховатость, возникают сжимающие напряжения, которые могут заметно повышать усталостную долговечность [7, 8]. Относительно несложным и доступным методом поверхностного пластического деформирования является ультразвуковая обработка (УЗО). Однако такая обработка приводит к существенной модификации лишь поверхностного слоя, при

разрушении или истирании которого механические свойства снижаются до прежнего уровня. Таким образом, разрушение детали будет происходить с прежней интенсивностью.

Целью данного исследования является изучение влияния импульсной механо-электрофизической обработки на структуру и механические свойства сварного соединения стали 17Г1С.

В ходе проведённых исследований показано, что в процессе УЗО основное воздействие концентрируется в поверхностном слое (не более 500 мкм). Микроструктура образца после ИМЭО имеет схожую структуру, однако, пластическая деформация в поверхностном слое развивается в меньшей степени. Это подтверждают результаты измерения микротвёрдости: образцы после УЗО имеют в среднем более высокие ее значения по сравнению с образцами после ИМЭО.

При статическом растяжении образцов со сварными соединениями (рис. 1), подвергнутыми УЗО и ИМЭО, наблюдается повышение предела прочности по сравнению с необработанным сварным швом. Также наблюдается снижение величины относительного удлинения; данный эффект в наименьшей степени проявляется в образцах с неразъемным соединением после ИМЭО. Сохранение пластичности после ИМЭО, в первую очередь, объясняется более равномерной модификацией структуры в поверхностном слое за счёт добавления импульсного электрофизического воздействия. Дальнейшие исследования авторов будут нацелены на оптимизацию режима ИМЭО с целью более эффективной структурной модификации сварного шва (на большие глубины), а также для улучшения структуры и повышения свойств материала в зоне термического влияния.

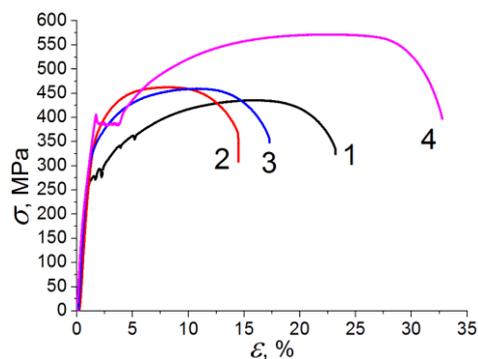


Рисунок 1 – Кривые статического растяжения: 1) необработанный сварной шов; 2) шов после УЗО; 3) шов после ИМЭО; 4) сталь в состоянии поставки (без шва)

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00679.

#### Список литературы

1. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В., Почивалов Ю.И. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий - эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов // ФММ. - 2007. - Т.104, № 6. - С. 1-11.
2. Романова В.А., Зиновьева О.С., Балохонов Р.Р., и др. Влияние модифицированного поверхностного слоя на эволюцию деформационного рельефа в поликристаллических стальных образцах. Численное моделирование // Физ. мезомех. - 2013. - Т. 16, № 6. - С. 59-69.
3. Абрамов В. О., Абрамов О. В., Артемьев В. В. и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. - М.: Янус-К, 2006. — 688 с.
4. Сараев, Ю. Н., Лебедев, В. А., Новиков, С. В. Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва // Russian Internet Journal of Industrial Engineering . 2016, p16-26. 11p.

## БЕЗБОЙКОВЫЙ ГИДРОИМПУЛЬСНЫЙ МЕХАНИЗМ И ЕГО ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ

*А. К. УДОВИК*

Томский политехнический университет  
E-mail: artem1marsell@gmail.com

Нефтегазовый сектор является одним из важнейших сфер российской экономики. В нефтегазовом деле, существует огромный инновационный резерв, а кроме того и денежные средства для его последующего осуществления, без широкого использования новых технологий невозможно дальнейшее развитие и продуктивное функционирование нефтяной и газовой промышленности. На данный момент, как в России, так и во всем мире происходит качественное усложнение условий освоения ресурсов нефтегазовой отрасли. Проанализировав результативность использования различных способов бурения можно прийти к выводу, что в настоящее время в различных областях промышленности большое место занимают ударные машины.

Одно из прогрессивных направлений в нефтегазовой промышленности, а именно в разработке малых диаметров скважин при горизонтально-направленном бурении – это безбойковые механизмы, силовые импульсные системы с гидравлическим приводом. В Национально Исследовательском Томском Политехническом Университете с 1976 года по настоящее время проводятся разработка и исследования безбойковых гидроимпульсных механизмов для усиления разрушения пород.

Впервые гидроимпульсный силовой механизм предложен такими учеными, как В.Ф. Горбунов, П.Я. Крауиньш, Л.А. Саруев, В.А. Барашков. Принципиальная схема гидроимпульсного силового механизма показана на Рисунке 1.

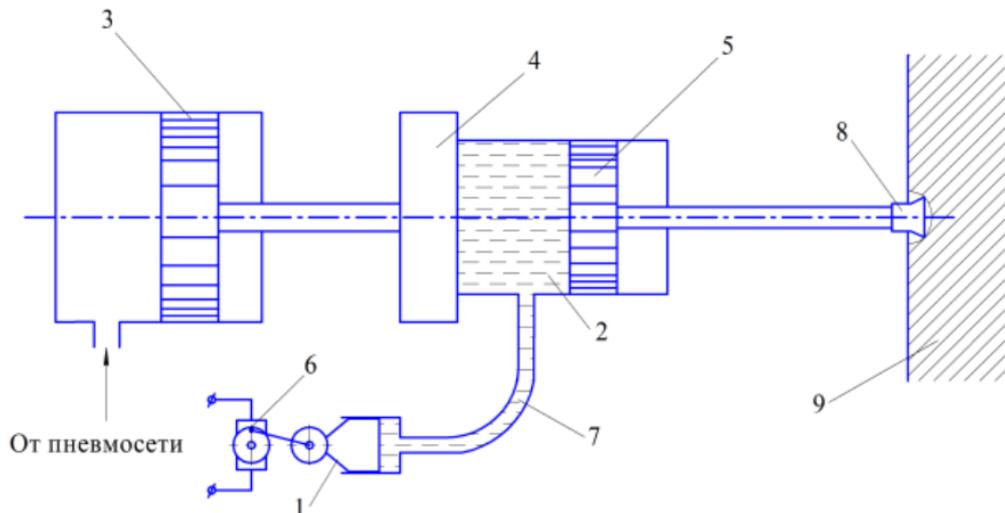


Рисунок 1 – Принципиальная схема гидроимпульсного силового механизма: 1) гидропульсатор; 2) замкнутый объем жидкости; 3) подающее устройство(пневмоподатчик); 4) активная масса с гидроцилиндром; 5) поршень гидроцилиндра с хвостовиком колонны бурильных труб; 6) электродвигатель; 7) рукав высокого давления; 8) свая; 9) порода [1]

Создаваемые импульсы формируются при возвратно-поступательном движении плунжера, при этом образуются импульсы давления жидкости, которые посылаются в гидроцилиндр. Поскольку гидроцилиндр поджат упругой силой, происходит его раскачка совместно с инерционной массой. При этом происходит периодическое преобразование кинетической энергии массы в потенциальную энергию деформированной системы жидкости и рукава – повышению давления в системе и обратно. При режиме работы системы

близко к резонансной, возникают импульсы давления значительной величины, которые через поршень и буровую штангу передаются на обрабатываемую среду [2].

Преимущества:

- теоретически высокий к.п.д. машины благодаря отсутствию возвратно-поступательного движения бойка и перемещения жидкости внутри системы (система замкнута);

- отсутствие бойка, а соответственно и отсутствие шума, вызываемого при ударах о хвостовик буровой колонны при вращательно-ударном способе бурения;

- искробезопасность;

- за счет большего времени давления импульса, создается большая энергия, передаваемая на буровой инструмент.

Разработанный безбойковый гидравлический механизм, может заменить ударные механизмы буровых установок ударно-вращательного действия, а также может быть использован как дополнительный компоновочный элемент, приводящий к интенсификации вращательного бурения, путем формирования направленных, высокоэнергетических силовых импульсов. Импульсы формируются в замкнутом контуре с нелинейной характеристикой упругого элемента практически без перетекания в нем жидкости. Данный метод подходит для разработки и геологоразведки скважин малого диаметра [3].

#### **Список литературы**

1. Пономарев А.В., Пашков Е.Н. Гидроимпульсный механизм в работе сваебойной машины. Сб. трудов XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии»
2. Пашков Е. Н., Зиякаев Г. Р., Юровский П. Г. Повышение эффективности бурения шпуров применением безбойковой гидроимпульсной системы – Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2013 – Вып. S4
3. Пашков Е. Н., Зиякаев Г. Р., Новосельцева М. В. Анализ эффективности гидроимпульсного механизма бурильных машин // Молодой ученый. — 2015. — №10. — С. 282-287.

Научное издание

**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

**ВТСНТ-2018**

Сборник научных трудов  
VII Международной научно-технической конференции  
молодых ученых, аспирантов и студентов

Компьютерная верстка *Е.А. Кулинич*

**Зарегистрировано в Издательстве ТПУ  
Размещено на корпоративном портале ТПУ**

---



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ