

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

Кафедра «Физика»

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Материалы

**VIII Региональной научно-практической конференции
с международным участием
(Омск, 26 апреля 2019 года)**

*Научное текстовое электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2019

УДК 001
ББК 72
А43

Редакционная коллегия:

А. И. Блесман, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. физики ОмГТУ;

В. А. Егорова, канд. техн. наук, доцент каф. физики ОмГТУ;

О. М. Сухарева, ст. преподаватель каф. физики ОмГТУ

Актуальные проблемы современной науки : материалы VIII Регион. А43 науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 26 апр. 2019 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ, каф. «Физика» ; [редкол.: А. И. Блесман, В. А. Егорова, О. М. Сухарева]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019.

ISBN 978-5-8149-2881-8

Рассмотрены вопросы, касающиеся следующих направлений: материаловедения, нанотехнологий, физики.

Издание адресовано научным сотрудникам, аспирантам и студентам, а также всем, кого интересуют проблемы современной науки.

УДК 001
ББК 72

1 электронный оптический диск

Оригинал-макет издания выполнен в Microsoft Office Word 2007/2010 с использованием возможностей Adobe Acrobat Reader.

Минимальные системные требования:

- процессор Intel Pentium 1,3 ГГц и выше;
- оперативная память 256 Мб и более;
- свободное место на жестком диске 260 Мб и более;
- операционная система Microsoft Windows XP/Vista/7/10;
- разрешение экрана 1024×768 и выше;
- акустическая система не требуется;
- дополнительные программные средства Adobe Acrobat Reader 5.0 и выше.

Ответственность за содержание материалов несут авторы

Издается в авторской редакции

Компьютерная верстка О. М. Сухаревой

Подписано к использованию 24.06.19.

Объем 6,38 Мб.

Издательство ОмГТУ
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Эл. почта: info@omgtu.ru

Секция 1
Материаловедение и нанотехнологии

УДК 546.62

С.А. Белякович

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

**ДИФФУЗИОННОЕ СПЕКАНИЕ ДИБОРИДА ГАФНИЯ
С МИКРОПОРОШКОМ АЛЮМИНИЯ**

Аннотация. В настоящей статье исследованы образцы сплава диборида гафния с алюминием, полученные методом диффузионного спекания. Рассмотрены системы на основе необлученного алюминия и СВЧ-активированного алюминия. Проведен рентгенофазовый анализ образцов, согласно которому состав образцов соответствует принципу аддитивности. Измерена плотность образцов без учета открытых и закрытых пор. Было установлено, что образцы на основе СВЧ-активированного алюминия дали большую усадку в процессе диффузионного спекания.

Ключевые слова: керамика, алюминий, диборид гафния, СВЧ-активация, диффузионное спекание.

В настоящее время существует необходимость создания новых материалов для защиты персонала от ионизирующего излучения и нейтронов, связанная с развитием и увеличением масштабов использования ядерных технологий. Важными критериями являются невысокая плотность и низкие массогабаритные характеристики исследуемого материала.

В качестве исследуемой системы выбран материал на основе диборида гафния (HfB_2) и алюминия (Al), так как HfB_2 характеризуется высокой поглощающей способностью нейтронов и γ -излучения, но вместе с тем является керамическим материалом, что предполагает его хрупкость. В связи с этим было принято решение получить сплав HfB_2 с Al и определить его основные характеристики.

Принимая во внимание известные особенности спекания керамических материалов с алюминием, приводящие к созданию малопрочных систем, склонных к образованию трещин, решено также создать систему на основе алюминия, активированного СВЧ-излучением.

В работе получен материал путем диффузионного спекания при нагревании смеси HfB_2 и микропорошка Al. В качестве исследуемых материалов был выбран порошок диборида гафния (HfB_2): изготовлен по ТУ № 6-09-03-418-76; форма частиц – неправильная; размер частиц – 40 мкм. Также использовали порошок алюминия (Al) АСД–6М производства ООО «СУАЛ-ПМ» (г. Шелехов): среднеповерхностный диаметр частиц порошка – 2,3 мкм, форма частиц близка к сферической. Порошок произведен с помощью распыления расплава алюминия в камере со специальной атмосферой [1]. Содержание алюминия в порошке – 97 мас. %. Облучение порошка проводили согласно параметрам и методике, описанным в [2].

Для приготовления образцов материала использовали смеси HfB_2 :Al, состав и масса смесей представлены в таблице 1. Аналогичные смеси получали на основе СВЧ-облученного алюминия. В образец № 4 был добавлен нанопорошок вольфрама (W) с целью увеличить поглощающую способность образца, т.к. W обладает высокими экранирующими свойствами за счет высокой рентгенографической плотности. Помимо этого, W характеризуется крайне высокой температурой плавления, хорошей обрабатываемостью и высоким сопротивлением к воздействию агрессивных сред.

Таблица 1

Состав смесей порошков HfB_2 и Al

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

Навески порошков смешивали путем их перетирания на кальке пробкой, обернутой в кальку, до получения однородной окраски. Полученные смеси прессовали с помощью гидравлического пресса. Давление прессования – 1,5 МПа. Спекание прессованных таблеток осуществляли в муфельной печи при 550 °С в условиях ограниченного доступа кислорода в течение 4 часов.

Рентгенофазовый анализ (РФА) спеченных образцов проводили с использованием дифрактометра «Дифрей-401» (излучение рентгеновской трубки $F_{K\alpha}$, $\lambda = 1,93 \text{ \AA}$). Результаты РФА приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Фазовый состав спеченных образцов материала на основе HfB_2 и необлученного алюминия

№ п/п	Содержание HfB_2 , отн. %	Содержание Al , отн. %	Содержание продуктов спекания, отн. %
1	96	4	0
2	71	29	0
3	11	89	0
4	84	12	4 (B_2O_3)

Таблица 3

Фазовый состав спеченных образцов материала на основе HfB_2 и СВЧ-облученного порошка

№ п/п	Содержание HfB_2 , отн. %	Содержание Al , отн. %	Содержание продуктов спекания, отн. %
1	97	3	0
2	75	25	0
3	48	52	0
4	68	13	18 (B_2O_3)

На поверхности образцов обнаружен бор, окисленный до B_2O_3 . Al_2O_3 на поверхности не был обнаружен.

Согласно полученным результатам фазовый состав спеченных образцов согласуется (таблица 1) с данными таблицы 2 и 3: состав спеченных образцов соответствует правилу аддитивности.

Имеются значимые отличия в результатах РФА для образцов под номерами 3 и 4 (таблицы 2 и 3). В первом случае, для образца 3, это может быть объяснено несовершенством однородности структуры, когда большая часть алюминия оказалась в поверхностном слое образца. Для образца 4 различие в содержании продуктов спекания связано с возможностью окисления добавки (W) при наличии повреждения образца, отмеченного для образцов с необлученным алюминием (имеется скол и трещина в объеме образца).

На образцах на основе необлученного алюминия имеются расколы и трещины. Образцы на основе СВЧ-облученного алюминия имеют более высокие механические характеристики. Была измерена кажущаяся плотность образцов без учета закрытых и открытых пор. Плотность образцов из необлученного Al приведена в таблице 4, СВЧ-активированного Al в таблице 5.

Таблица 4

Плотность образцов на основе HfV₂ и необлученного порошка Al

№ п/п	1	2	3	4
Плотность ρ , г/см ³	1,97	2,05	2,36	2,79

Таблица 5

Плотность образцов на основе HfV₂ и СВЧ-активированного порошка Al

№ п/п	1	2	3	4
Плотность ρ , г/см ³	3,98	1,94	1,97	3,14

Для всех образцов наблюдается усадка и высокая пористость. Из смесей самый плотный образец изготовлен на основе СВЧ-активированного алюминия с составом 90:10 HfV₂:Al, менее плотный на основе СВЧ-активированного алюминия с составом 10:90 HfV₂:Al.

Таким образом, путем диффузионного спекания получены образцы материала на основе HfV₂ и Al, которые пригодны для изготовления защитных экранов путем их заполнения таблетками. Образцы спеченного материала в условиях диффузионного спекания дали большую усадку (таблицы 4, 5) при спекании с порошками алюминия после его облучения СВЧ-излучением.

Библиографический список

1. Пат. 2559080 Российская Федерация, МПК В22 F9/08. Способ получения металлических порошков распылением расплавов / Змановский С. В., Архипов В. А., Жуков А. С., Козлов Е. А., Дюбенко Е. Л., Евсевлев М. Я., Коноваленко А. И. № 2014109340/02; заявл. 11.03.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

2. Мостовщиков А. В., Ильин А. П., Чумерин П. Ю. [и др.]. Влияние СВЧ-излучения на термическую стабильность нанопорошка алюминия // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 7. С.17–22.

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 38Х2МЮА ПОСЛЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ГАДОЛИНИЯ, ИТТРИЯ, СКАНДИЯ И ТИТАНА

Аннотация. Методом сканирующей зондовой микроскопии исследуются топография, шероховатость, характерный размер структуры поверхности стали 38Х2МЮА, модифицированной посредством ионной имплантации скандия, иттрия, гадолиния и титана.

Ключевые слова: ионная имплантация, модификация поверхности, зондовая микроскопия, шероховатость, характерный размер структуры.

На сегодняшний день сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из распространенных методов диагностики наноструктурированных материалов. Широкий спектр режимов СЗМ обеспечивает возможность проведения исследований физико-механических свойств материалов и наноматериалов. В ходе выполнения данной работы изучены топография, шероховатость и характерный размер структуры образцов стали 38Х2МЮА после имплантации ионами Sc, Y, Gd и Ti.

Исследование образцов проводилось в режиме к-АСМ на зондовой нанолaborатории NTEGRA. Предварительная пробоподготовка заключалась в обработке исследуемой поверхности образцов высокоочищенным ацетоном и изопропиловым спиртом. Математическая обработка полученных результатов (топографии поверхности, шероховатости и характерный размер структуры) осуществлялась в программе «SPIP». Сканирование рельефа поверхности стальных образцов проводилось в режиме к-АСМ. Зарегистрированы сигналы «топография поверхности» и дифференциальный сигнал атомно-силового микроскопа (DFL). Полученные АСМ изображения представлены на рисунках 1–6. В программе «SPIP» проведена оценка шероховатости поверхности (R_a), площади 3D поверхности (S_{surf}) и характерного размера структуры (D).

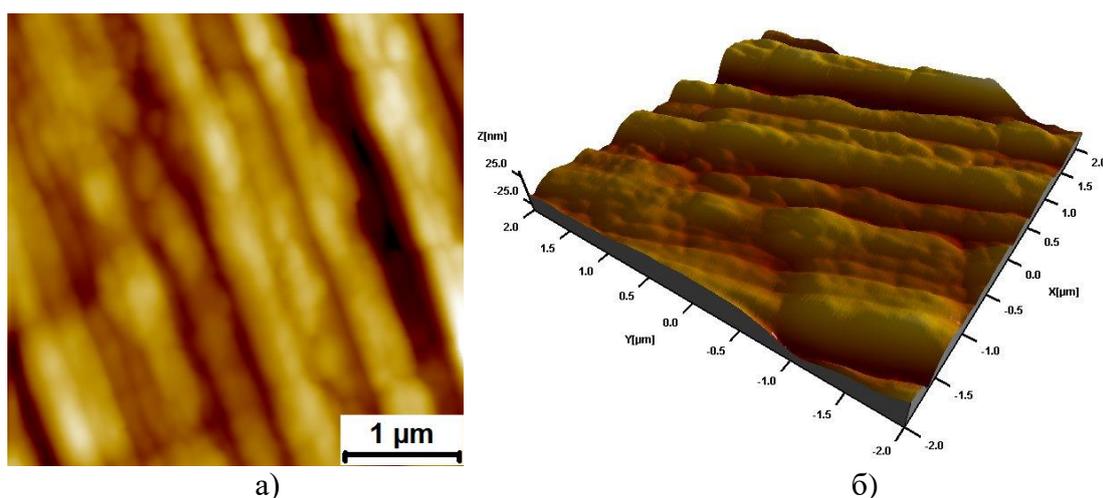
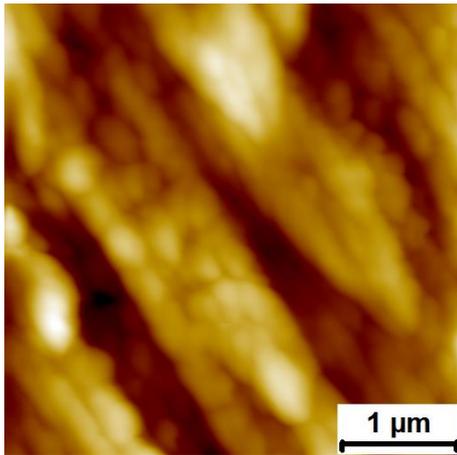
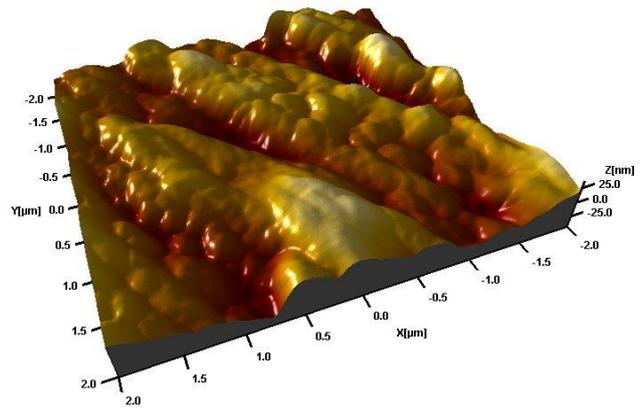


Рис. 1. АСМ изображения рельефа поверхности стального образца без ионной имплантации (а), топография поверхности (сигнал DFL) (б)

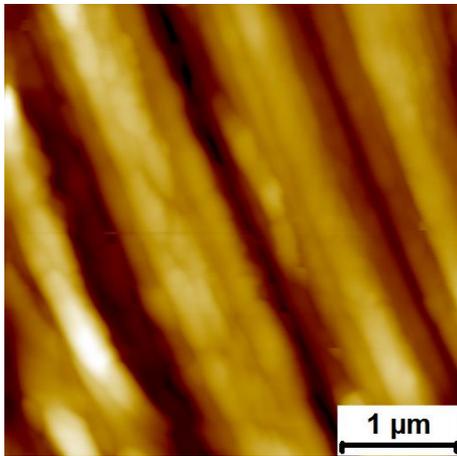


а)

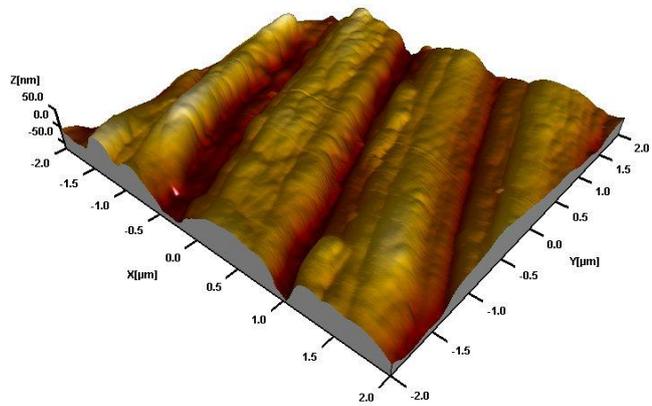


б)

Рис. 2. АСМ изображения рельефа поверхности стального образца с ионной имплантацией скандия (а), топография поверхности (сигнал DFL) (б)

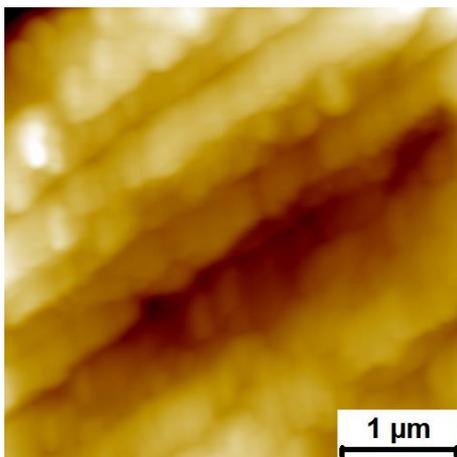


а)

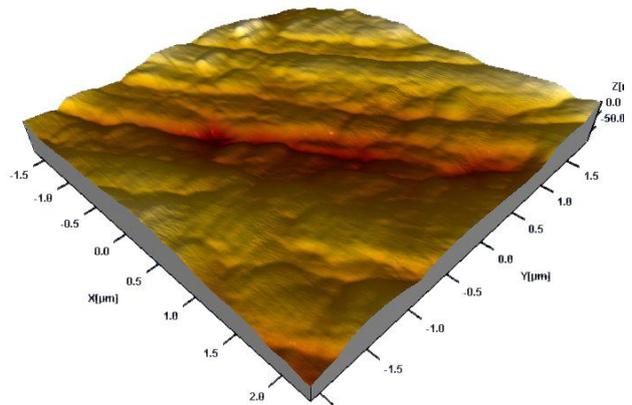


б)

Рис. 3. АСМ изображения рельефа поверхности стального образца с ионной имплантацией иттрия (а), топография поверхности (сигнал DFL) (б)



а)



б)

Рис. 4. АСМ изображения рельефа поверхности стального образца с ионной имплантацией гадолиния (а), топография поверхности (сигнал DFL) (б)

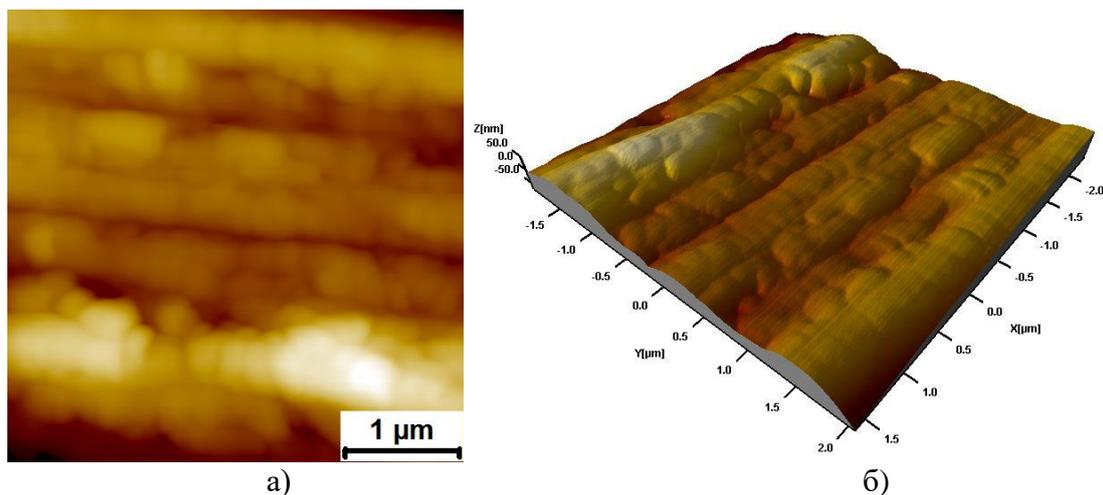


Рис. 5. АСМ изображения рельефа поверхности стального образца с ионной имплантацией Ti^+ (а), топография поверхности (сигнал DFL) (б).

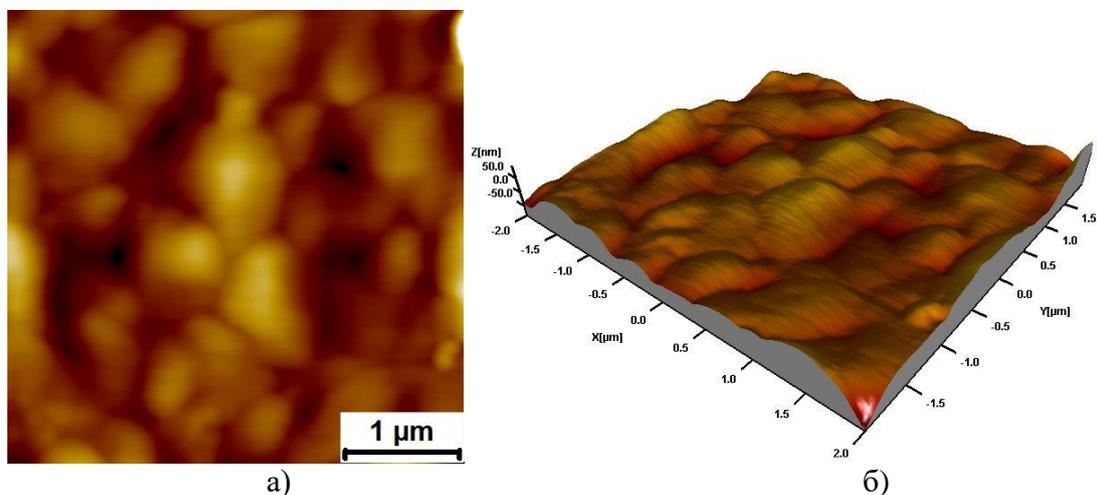


Рис. 6. АСМ изображения рельефа поверхности стального образца с ионной имплантацией Ti^+ и последующим распылением на поверхности TiN (а), топография поверхности (сигнал DFL) (б)

Значения шероховатости поверхности, площади 3D поверхности и характерного размера структуры образцов, модифицированных посредством ионной имплантации скандия, иттрия, гадолиния и титана, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Шероховатость поверхности, площадь 3D поверхности и характерный размер структуры образцов

Образец	D, нм	Ra, нм	$S_{surf}, 10^7 \text{ нм}^2$
Без осаждения	> 260	8.5	1.6073
Ионная имплантация Sc^+	180 ÷ 500	12	1.6098
Ионная имплантация Y^+	130 ÷ 500	18.3	1.6288
Ионная имплантация Gd^+	200 ÷ 500	15.6	1.6016
Ионная имплантация Ti^+	130 ÷ 450	13.6	1.6016
Ионная имплантация Ti^+ после осаждения TiN	180 ÷ 500	13.5	1.6160

Сравнительный анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что структура стальных образцов, имплантированных ионами скандия и титана, обладает характерными размерами от 130 нм, что обуславливает более высокую адгезию модифицированной поверхности. Ионная имплантация приводит к увеличению шероховатости исходной поверхности от 1,4 до 2,2 раз при модифицировании стальных образцов ионами скандия и иттрия соответственно.

Заключение

Методом СЗМ в режиме контактной атомно-силовой микроскопии определены характерный размер структуры, шероховатость и удельная площадь поверхности стальных образцов. Сравнительный анализ полученных данных позволяет сделать вывод, о том, что структура образцов, имплантированных ионами скандия и титана, обладает характерными размерами от 130 нм, что обуславливает более высокую адгезию модифицированной поверхности. Ионная имплантация приводит к увеличению шероховатости исходной поверхности от 1,4 до 2,2 раз при модифицировании стальных образцов ионами скандия и иттрия соответственно.

Библиографический список

1. Чижик С. А., Сыроежкин С. В. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро- и наномеханике // Приборы и методы измерений. 2010. №1. С. 85–94.
2. Кулыгин Д. А. Ионная имплантация // Инновационная наука. 2017. № 1-2. С. 14–16.
3. Лигачёв А. Е., Колобов Ю. Р., Жидков М. В, Голосов Е. В., Потемкин Г. В., Ремнев Г. Е. Влияние импульсных ионных пучков на изменение субмикроструктурной структуры приповерхностных слоев аустенитной стали // Физика и химия обработки материалов. 2015. №1. С. 19–25.
4. Овчинников В. В., Боровин Ю. М. Ионная имплантация поверхностных слоев деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. № 6. С. 29–39.
5. Медведева С. С., Коива Д. А., Шемухин А. А., Черных П. Н. Исследование изменения параметров тонкоплёночных структур в процессе ионной имплантации // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2014. №4. С. 7–13.

УДК 621.7

Е.Г. Бушуева, Е.В. Ильин, А.В. Сапина, П.А. Рябинкина, В.А. Батаев

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Исследовано влияние структурных преобразований, происходящих при вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошка аморфного бора, на абразивную износостойкость поверхностных слоев хромоникелевой аустенитной стали. Обнаружено, что при наплавке формируется покрытие с плотным расположением боридов. Методом рентгенофазового анализа установлено, что модифицированный слой практически полностью состоит из сложных боридов $(Cr,Fe)_2B$. Такая структура обеспечивает повышение абразивной износостойкости стали 12X18H9T от 2 до 5 раз в зависимости от вида изнашивания.

Ключевые слова: борирование, хромоникелевая сталь, электронно-лучевая наплавка, износостойкость.

Один из наиболее эффективных технологических подходов к решению проблемы повышения абразивной износостойкости заключается в модифицировании поверхностных слоев материалов высокопрочными частицами, в большинстве случаев используют нитриды, карбиды и бориды металлов. Для повышения уровня износостойкости методом поверхностного легирования упрочняющими частицами может быть рекомендован метод, основанный на вневакуумной электронно-лучевой наплавке порошковых смесей на поверхность стальных заготовок. Его основными достоинствами являются высокие мощность (до 100 кВт), производительность, коэффициент полезного действия, а также вывод электронного пучка непосредственно в воздушную атмосферу, возможность обрабатывать габаритные изделия и формировать наплавленный слой толщиной до нескольких мм [1-3]. Сущность вневакуумной электронно-лучевой наплавки заключается в расплавлении поверхностного слоя основного металла и предварительно нанесенных на обрабатываемый участок порошковых смесей. Введение в ванну расплава высокопрочных тугоплавких частиц различного химического состава обеспечивает повышение эксплуатационных свойств металлов и сплавов, таких как износостойкость, жаропрочность и жаростойкость и др.

Хромоникелевая аустенитная сталь широко применяется в нефтедобывающей, горнодобывающей промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости, технологичности для изготовления деталей сложной конфигурации. Однако существенным недостатком стали данного класса является низкое сопротивление воздействию абразивных частиц породы. В связи с этим формирование износостойкого поверхностного слоя этой стали является актуальной задачей.

В данной работе проводится оценка влияния технологических параметров вневакуумной электронно-лучевой наплавки борсодержащих порошковых смесей на стойкость модифицированных слоев нержавеющей стали в условиях абразивного воздействия.

Поверхностное упрочнение основы проводили посредством воздействия электронного пучка, выведенного в воздушную атмосферу, на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики СО РАН. В качестве материала основы для наплавки использовали хромоникелевую сталь аустенитного класса 12X18H9T (0,05 % C; 17,29 % Cr; 8,98 % Ni; 1,82 % Mn; 0,33 % Si; 0,24 Ti; 0,005 % S; 0,019 % P). Наплавка порошковых смесей реализована на пластинах размером 100x50x16 мм. В процессе обработки заготовка перемещалась относительно пучка электронов со скоростью 10 мм/с. Сканирование обрабатываемой поверхности электронным лучом осуществляли в поперечном направлении. Ширина дорожки составляла 50 мм. Наплавку материалов выполняли при следующих технологических параметрах: ток пучка – 22–24 мА; расстояние от выпускного окна до заготовки – 90 мм; энергия пучка электронов – 1,4 МэВ.

Для формирования износостойких слоев применяли порошок аморфного бора марки А (ТУ 212-001-4953404-2003), равномерно перемешанный с порошком железа (ТУ 6-09-2227-81) и флюса MgF_2 . Масса насыпки составляла 0,45 г на 1 см^2 . Соотношение компонентов в шихте составило 50 % (об.) флюса, 10 % (об.) порошка железа, 40 % (об.) аморфного бора.

Металлографические исследования наплавленных образцов проводили на микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m. Микротвердость полученных материалов измеряли на приборе Wolpert Group 402MVD при нагрузке на алмазный индентор 0,98 Н. Фазовый состав наплавленных слоев определяли на дифрактометре Thermoscientific ARL X'TRA.

Испытания наплавленных слоев на износостойкость проводились в условиях трения о нежестко закрепленные абразивные частицы.

Результаты металлографических исследований свидетельствуют о высоком качестве сформированных покрытий: в структуре модифицированных слоев отсутствуют дефекты в виде пор, газовых раковин, трещин, встречающиеся при реализации металлургических процессов в ходе наплавки. Установлено, что с увеличением тока пучка электронов от 22 до 24 мА толщина покрытия увеличивается от 2,3 до 3 мм.

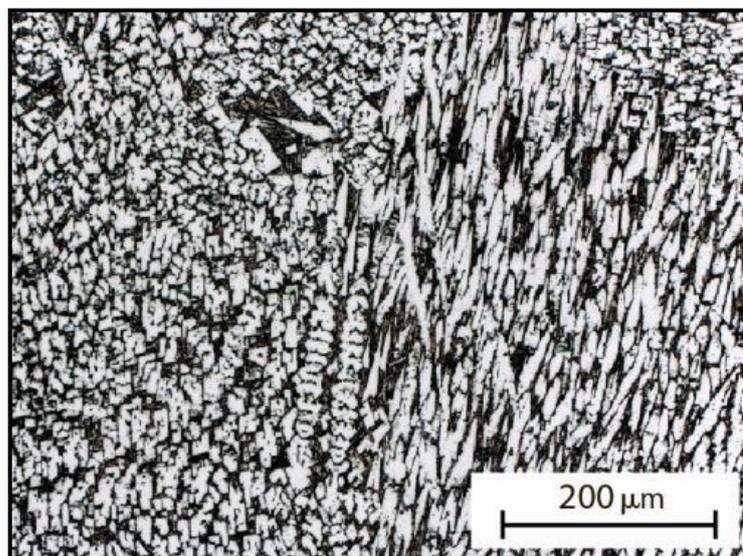


Рис. 1. Микроструктура модифицированных слоев стали 12X18H9Т, сформированных при вневакуумной электронно-лучевой наплавке борсодержащих порошков

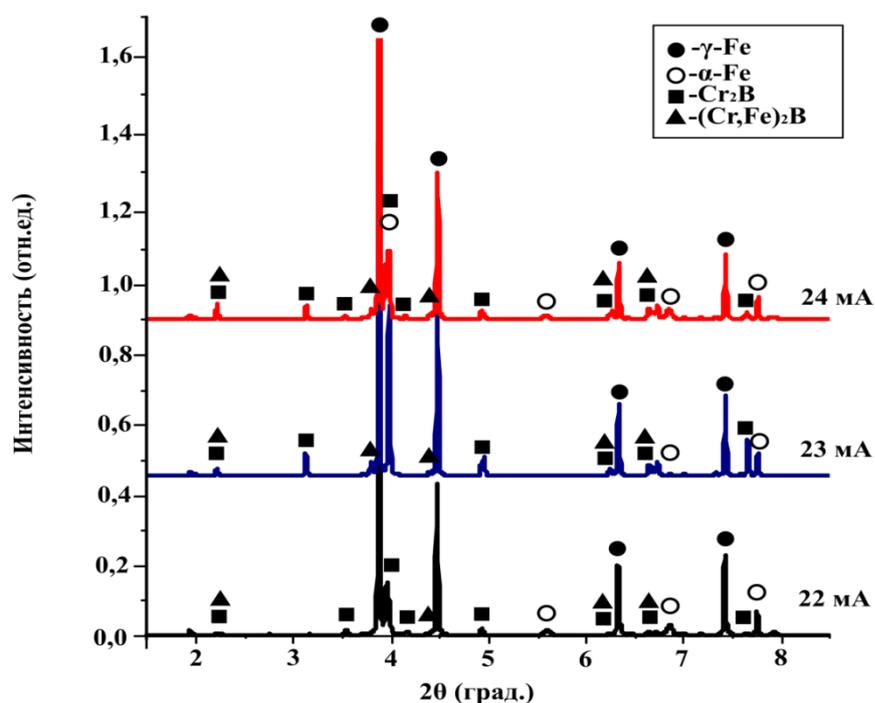


Рис. 2. Рентгенограммы покрытий, полученных при вневакуумной электронно-лучевой наплавке борсодержащих смесей при токе пучка 22 (1), 23 (2) и 24 мА (3)

Исследования структуры поверхности образцов, проведенные методом металлографии, показали, что в процессе наплавки порошка аморфного бора в поверхностных слоях хромоникелевой аустенитной стали формируются покрытия с плотным расположением боридов, см. рис. 1. Между боридами происходит формирование пластинчатой эвтектики, содержание которой постепенно увеличивается при приближении к основному металлу. Данная структура, состоящая из пластин высокопрочных боридов железа (хрома) и пластичного γ -твердого раствора на основе железа, способствует повышению адгезионных свойств наплавленных слоев. Результаты рентгенофазового анализа наплавленных материалов представлены на рис. 2. Упрочненный слой независимо от режимов наплавки преимущественно состоит из сложных боридов железа (хрома), состав которых соответствует $(Cr,Fe)_2B$. Кроме того, в покрытиях зафиксировано наличие γ -Fe.

Максимальная микротвердость (1200–1400 МПа) характерна для покрытий, наплавленных при воздействии тока электронного пучка 22 мА, что существенно превышает микротвердость основного металла (~300 МПа). При увеличении тока пучка до 24 мА микротвердость модифицированного слоя снижается (900–1000 МПа). Это объясняется значительным расплавлением основного металла и, как следствие, уменьшением концентрации бора в поверхностном слое хромоникелевой стали. При этом увеличивается объемная доля вязкой составляющей в структуре покрытия.

Формирование плотного боридного слоя на поверхности хромоникелевой стали приводит к повышению ее износостойкости. При абразивном воздействии незакрепленными частицами зафиксировано повышение износостойкости наплавленных покрытий в 2–7 раз по сравнению с износостойкостью основного металла (рис. 3).

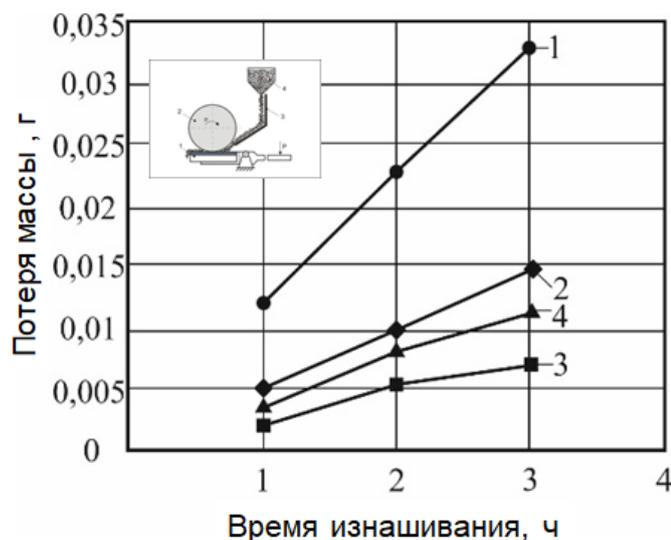


Рис.3 Износостойкость в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц. 1 – эталон (12X18H9T), 2 – Fe, I=22 мА, 3 – Fe, I=23 мА, 4 – Fe, I=24 мА

Анализ результатов триботехнических испытаний свидетельствует о том, что оптимальной абразивной износостойкостью обладают покрытия, полученные при электронно-лучевой обработке с током пучка 23 мА. Сочетание высокопрочных боридов и участков с пластичной эвтектикой приводит к существенному сопротивлению покрытий при воздействии абразивными частицами.

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка борсодержащих порошковых смесей на хромоникелевую аустенитную сталь 12X18H9T позволяет сформировать износостойкие покрытия толщиной до 3мм. Модифицированный слой практически полностью состоит из боридов типа $(Cr,Fe)_2B$. Промежуточный слой представляет эвтектику, состоящую из

высокопрочных пластин $(Cr,Fe)_2B$ и пластичных участков γ -Fe. Микротвердость модифицированного слоя достигает ~ 1400 МПа, что в 4–5 раз превышает твердость основного металла. Микротвердость сформированных боридных покрытий в значительной степени коррелируют с их износостойкостью. В условиях воздействия незакрепленными частицами абразива относительная износостойкость упрочненных слоев в 2–7 раз превышает износостойкость хромоникелевой стали 12X18H9T. Режим наплавки борсодержащих порошковых смесей с током пучка 23 мА обеспечивает максимальную износостойкость покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

Библиографический список

1. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н. Н. Коваля, Ю. Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 304 с.
2. Гнусов С. Ф., Дураков В. Г. Электронный луч в формировании неравновесных структур. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 115 с.
3. Márquez-Herrera A. Fernandez-Munoz J. L., ZapataTorres M. et al. Fe_2B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance // Surface and Coatings Technology. 2014. V. 254. P. 433–439.

УДК 53.06

В.Ю.Варфоломеев, Е.А.Рогачев

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

РОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ МЕДИЦИНСКИХ ИГЛ

Аннотация. В статье представлено экспериментальное исследование степени шероховатости металлической трубки медицинских игл и проведена оценка качества их функциональных способностей. Сравнивались три образца различных производителей, отвечающих современному государственному стандарту качества. Исследование степени шероховатости осуществлялось при помощи зондового микроскопа ИНТЕГРА.

Ключевые слова: медицинская игла, шероховатость, рельеф.

В исследовании была изучена шероховатость медицинских игл трёх фирм-производителей. Первый образец – иглы шприца В. Braun Injekt (Германия). Второй образец – игла шприца, произведённого Sterin Medical Group (Россия). Третий – игла инъекционная, произведённая Обществом с ограниченной ответственностью «Медико-производственная компания «Елец» (г. Елец, Россия).

Исследование степени шероховатости осуществлялось при помощи зондового микроскопа ИНТЕГРА [1]. Каждый образец был расположен горизонтально, вдоль хода кантилевера. Изучены как сама поверхность металлической трубки, так и сварной шов.

В первом образце (рис. 1) отклонение рельефа составляет около 0,3 мкм от среднего значения. Данное отклонение является максимальным среди испытываемых образцов. Иглы

первого образца имеют наиболее выраженный рельеф поверхности. На поверхности металлической трубки определяются множественные впадины, размер которых превышает 2×2 мкм. Эти углубления могут облегчить процесс деформации металлической трубки при инъекции [2]. Безусловно, такие изъяны не могут не сказаться на функциональных возможностях игл. Клинические испытания выявили большую склонность игл к изгибу.

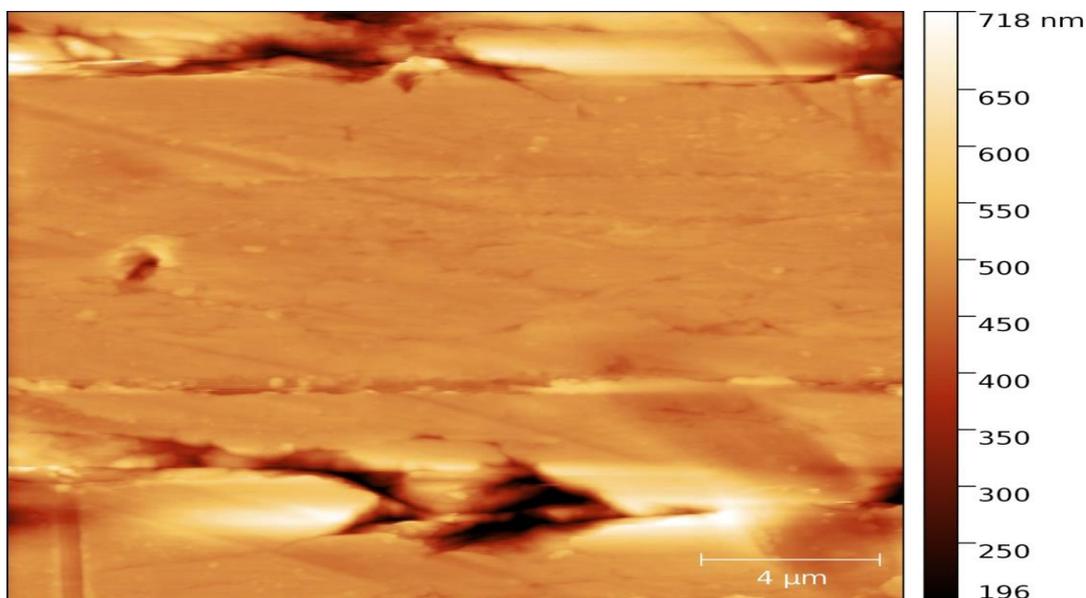


Рис. 1. Электронная фотография в формате 2D медицинской иглы фирмы В.Враун Инjekt

Более высокую информативность рельефа имеет электронная фотография поверхности, сделанная в формате 3D (рис. 2). На ней мы видим технологический шов, образованный при создании трубки из металлической ленты. Сварной шов не усиливает шероховатость поверхности, ввиду высокого качества проработки. Описанные выше дефекты дают гораздо большее отклонение рельефа поверхности.

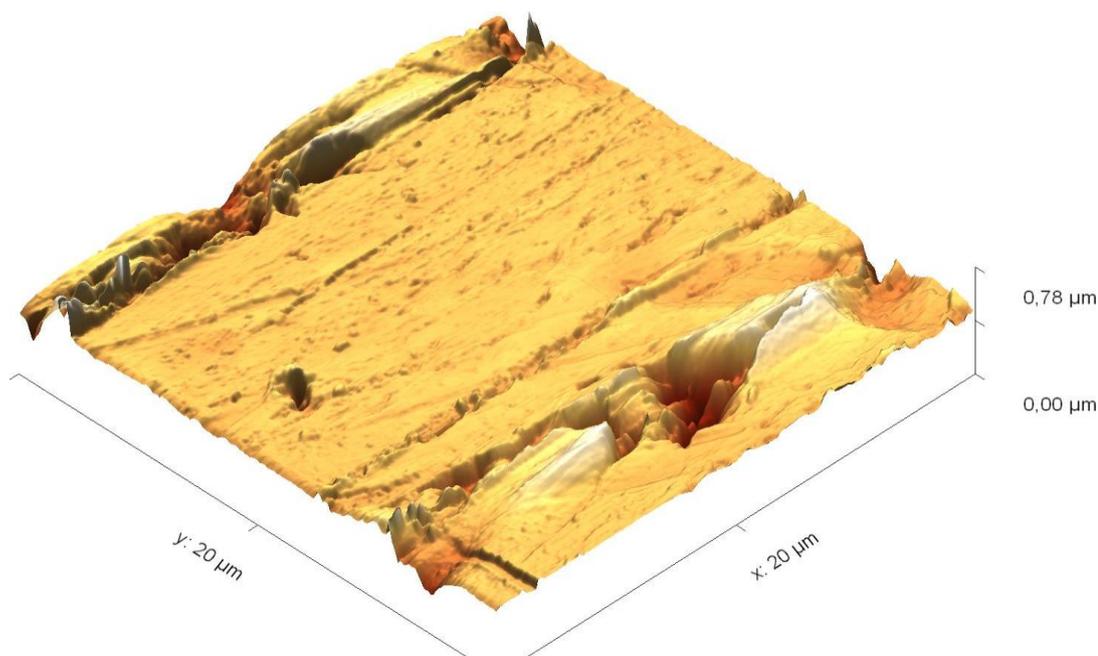


Рис. 2. Электронная фотография в формате 3D медицинской иглы фирмы В.Враун Инjekt

В образце, произведённом компанией Sterin Medical Group, отклонение рельефа составляет около 0,15 мкм от среднего значения. На рис. 3 выявлена высокая зернистость металла, обусловленная термической обработкой, множественные разрывы материала, вызванные профилированием трубки, предварительно прошедшей термическую обработку, что, по-нашему мнению, являются явным дефектом [3]. Клинические испытания показали низкую сопротивляемость металлической трубки медицинской иглы к изгибу, что приводит к ее деформации во время инъекции.

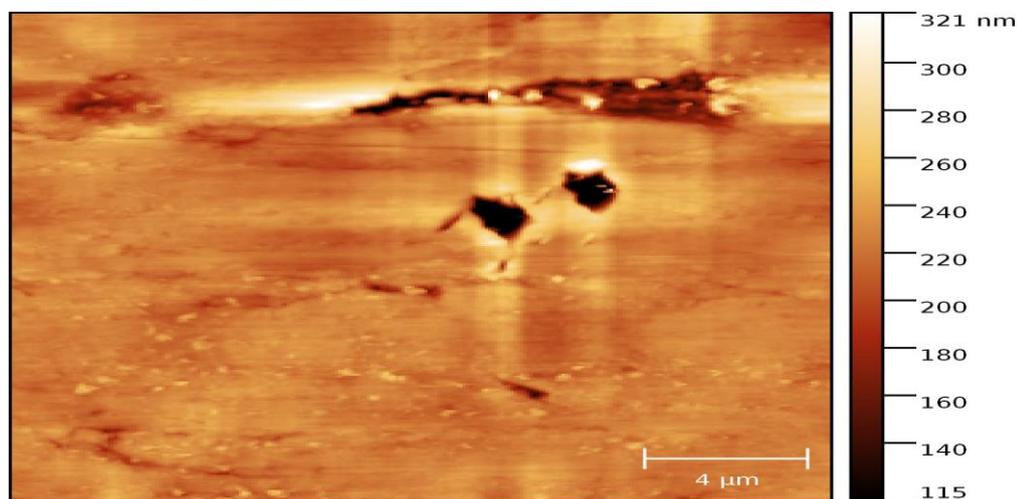


Рис. 3. Электронная фотография в формате 2D медицинской иглы Sterin Medical Group

На рис. 4 особенно выделяются глубокие впадины и горизонтальная (по направлению иглы) полоса деформации. Возможно, она связана с особенностями процесса создания или обработки листового металла, из которого впоследствии будет получена медицинская игла [4]. Сварной шов на данной фотографии не представлен. Он имеет подобные отклонения, как и первый образец. Тем не менее, иглы этого производителя имеют в основном положительные отзывы во время клинических испытаний – они достаточно прочные, устойчивы к изгибам и изломам.

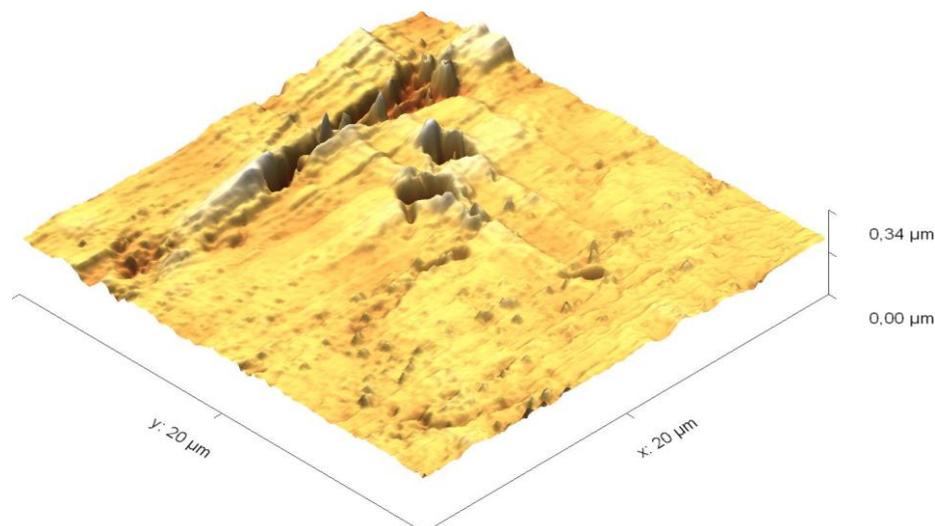


Рис. 4. Электронная фотография в формате 3D медицинской иглы фирмы Sterin Medical Group

В образце, произведённом обществом с ограниченной ответственностью медико-производственная компания «Елец» (рис. 5), отклонение рельефа составляет около 0,26 мкм

от среднего значения. Исследование выявляет высокую пористость и неоднородность металла, о чём свидетельствуют тёмные пятна с размерами до 2,5 мкм в длину и множество просветлений с чёткими контурами, свидетельствующие о наличии множества вкраплений, что позволяет нам сделать предположение о низком качестве металла [5].

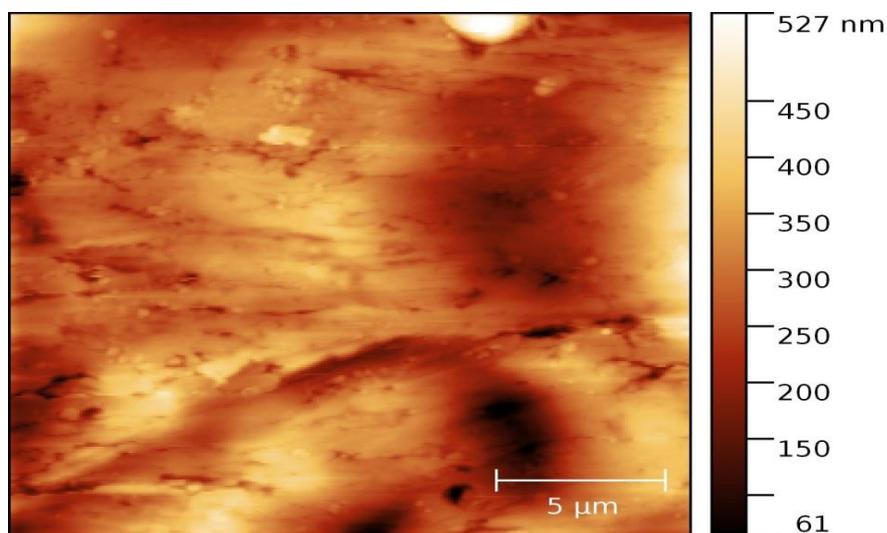


Рис. 5. Электронная фотография в формате 2 D медицинской иглы Медико-производственной компании «Елец»

На фотографии поверхности, сделанной в формате 3D (рис. 6), отчётливо видна пористость поверхности металла, а также низкое качество обработки поверхности, что увеличивает её шероховатость [6]. Сварной шов также имеет изъяны из-за конечной шлифовки низкого качества.

Клинические испытания выявили крайне негативное отношение потребителей к продукту из-за его недостаточного качества.

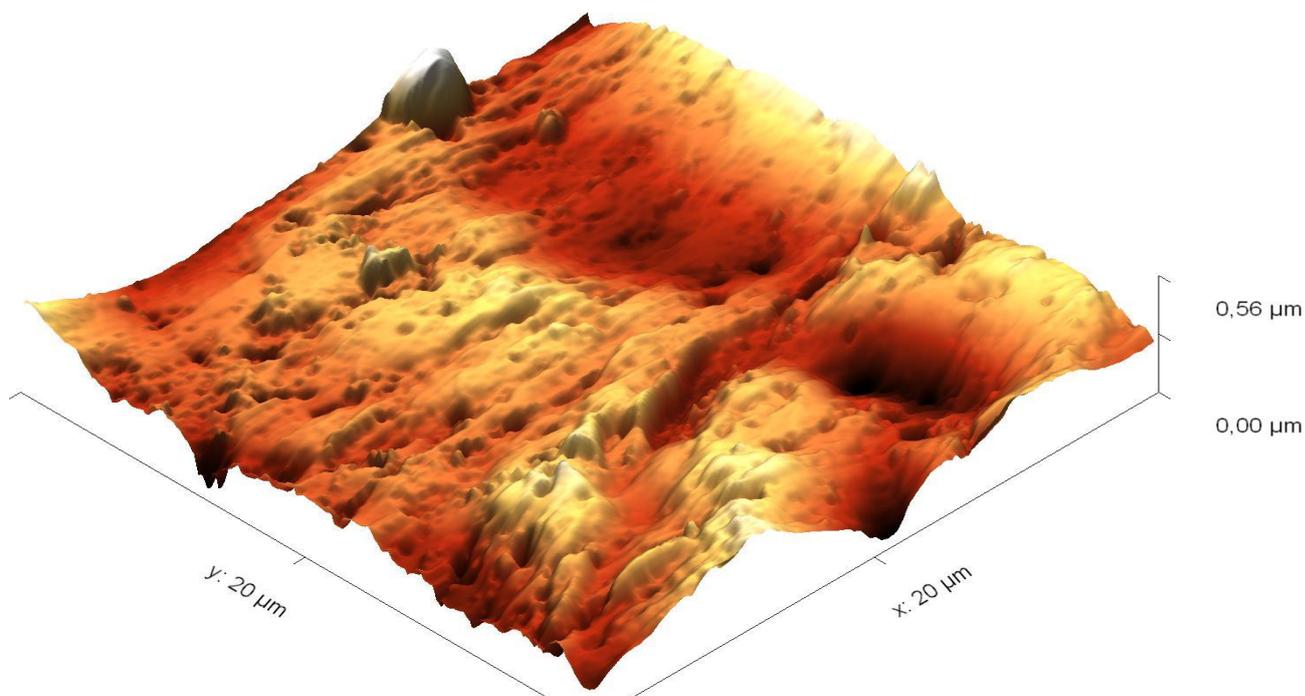


Рис. 6. Электронная фотография в формате 3D медицинской иглы Медико-производственной компании «Елец»

Таким образом, экспериментальное исследование выявило, что наиболее качественное изделие с лучшими функциональными способностями имеет отклонение рельефа около 0,15 мкм от среднего значения, включающего минимальное количество впадин и возвышений, качественный сварной шов, высокое качество шлифовки поверхности и отсутствие разрывов металла.

Библиографический список

1. Рогачев Е. А. Физические основы современных методов исследования материалов: метод. указания к лабораторным работам. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 45с.
2. Рамбиди Н. Г., Берёзкин А. В. Физические и химические основы нанотехнологий. Москва, ООО издательская фирма «Физико-математическая литература», 2008. 456 с.
3. Цуканов А. Ю., Ахметов Д. С., Блесман А. И., Рогачев Е. А. Влияние поверхности мочеточникового стента на инкрустацию и формирование биопленок // Урология. Москва, изд-во Бионика Медиа, 2018. №2. С. 40–45.
4. Блесман А. И., Постников Д. В., Полонянкин Д. А., Рогачев Е. А., Ткаченко Э. А. Влияние температурного поля и внутренних напряжений на срок службы изделий цилиндрической симметрии с защитными покрытиями // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 25–28.
5. Федоров А. А., Полонянкин Д. А., Блесман А. И., Постников Д. В. Исследование микрорельефа стали 12Х18Н10Т после ультразвуковой упрочняющей обработки с использованием маркеров // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 1. С. 108–112.
6. Гаркушин И. К., Лаврентьева О. В., Истомова М. А., Калмыкова О. Ю. Конструкционные материалы: состав, свойства, применение. Самара: изд-во Самарского государственного технического ун-та, 2015. 239 с.

УДК 621.791.947.55

В.В. Громов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ГАФНИЕВЫХ ВСТАВОК ПЛАЗМАТРОНОВ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

Аннотация: Плазменная резка является современной технологией обработки токопроводящих материалов (металлов, сталей и сплавов), обеспечивающей возможность их высокоскоростного и высокоточного резания, минимальный прогрев, а также исключая деформацию обрабатываемых материалов. В работе проведена классификация типов плазматронов, представлено описание их конструктивных преимуществ и недостатков. Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа реализовано сравнительное исследование состава и морфологии поверхности гафниевых вставок–катодов, используемых в технологиях плазменной резки.

Ключевые слова: плазматрон, электрод, вставка-катод, гафний.

Введение. Электроды играют ключевую роль в создании плазмы электрической дуги и зачастую ограничивают возможности применения технологий плазменной резки, сплавления или наплавки. Моделирование взаимодействия плазмы электрической дуги с

поверхностью электрода является многофакторной проблемой технологий плазменной резки благодаря влиянию давления плазмообразующей среды, силы тока и его плотности на процессы образования тлеющего разряда, поджига дуги и горения низкотемпературной плазмы в электродуговых плазменных устройствах.

Поверхность электродов подвержена воздействию плазмы ($T \sim 7000\text{--}8000\text{ K}$), ниже температуры которой электропроводность материала электрода слишком мала, чтобы поддерживать условия стабильного горения. При этом приповерхностные слои электродов, изготовленных из тугоплавких металлов и сплавов или графита, нагреваются до температур, близких к температуре испарения этих материалов (в большинстве случаев порядка 4000 K). Катод выполняет функцию эмиссии термоэлектронов, обеспечивающих образование тлеющего разряда, поджиг дуги и горение плазмы, тогда как анод выступает в роли коллектора и предназначен для поддержания устойчивости плазменной дуги посредством сбора электронов, эмитированных катодом. «Горячие катоды» являются одними из наиболее широко распространенных типов электродов, применяемых в плазматронах малой и средней мощности. В основе функционирования «холодных катодов» мощных и сверхмощных устройств плазменной резки с плотностью тока, достигающей величины 10^9 A/cm^2 , лежат явления взрывной или автоэлектронной (полевой, «холодной») эмиссии электронов. Конструктивной особенностью данного типа электродов, выполненных из меди или серебра, является наличие водяного охлаждения электрода.

К задачам, решаемым в ходе развития технологий плазменной резки и оказывающим непосредственное влияние на увеличение длительности срока службы электродов, КПД и экономичности процесса плазменной резки, относятся разработка оптимальной конструкции катода и анода, снижение степени эрозии их поверхности [1]. Гафний является одним из основных материалов, применяемых для производства вставок-катодов плазматронов малой и средней мощности, функционирующих в воздушной среде, в которой вольфрамовые электроды демонстрируют низкие эксплуатационные характеристики. В этой связи для резки металлов, сталей и сплавов в плазмообразующих средах, содержащих кислород, применяются катоды со вставками из циркония и гафния (термохимические электроды). К данному типу катодов предъявляются следующие требования: 1) значительный эксплуатационный ресурс и удовлетворительные эмиссионные характеристики вставки; 2) термическая устойчивость и «пленкозащитные» свойства вставки, особенно в условиях воздействия окислительных сред; 3) высокая теплопроводность вставки [2]. Ресурс циркониевых и гафниевых вставок-катодов в среде азота также существенно превышает срок службы катодов, изготовленных из вольфрама. По сравнению с циркониевыми катодами, катоды из гафния также характеризуются большим ресурсом, однако обладают и более высокой стоимостью [3]. Поскольку гафний является основным материалом для производства вставок-электродов в плазматроны, предназначенные для плазменной резки в среде кислорода или воздуха, на свойства гафния существенное влияние оказывают содержащиеся в нём примеси; в первую очередь это касается примесей внедрения, особенно кислорода. Так, при повышенном содержании кислорода в гафнии он практически не поддается механической обработке, что значительно ограничивает возможности его применения в виде различных изделий (пруток, лента, труба, проволока). Таким образом, изготовление вставок-катодов плазматронов из высокочистого гафния с высокими эксплуатационными характеристиками является актуальной прикладной задачей современного материаловедения и нанотехнологий [4].

В данной работе помимо классификации существующих типов плазматронов проведено исследование состава и морфологии поверхности гафниевых термохимических катодов вставок-электродов, используемых в технологиях плазменной резки металлов, сталей и сплавов.

1. Классификация плазматронов, описание их конструктивных преимуществ и недостатков. На рис.1 представлена классификация плазматронов по материалу катода, рабочему газу и способу охлаждения, далее в тексте приводится описание преимуществ и недостатков рассматриваемых типов плазматронов [5].

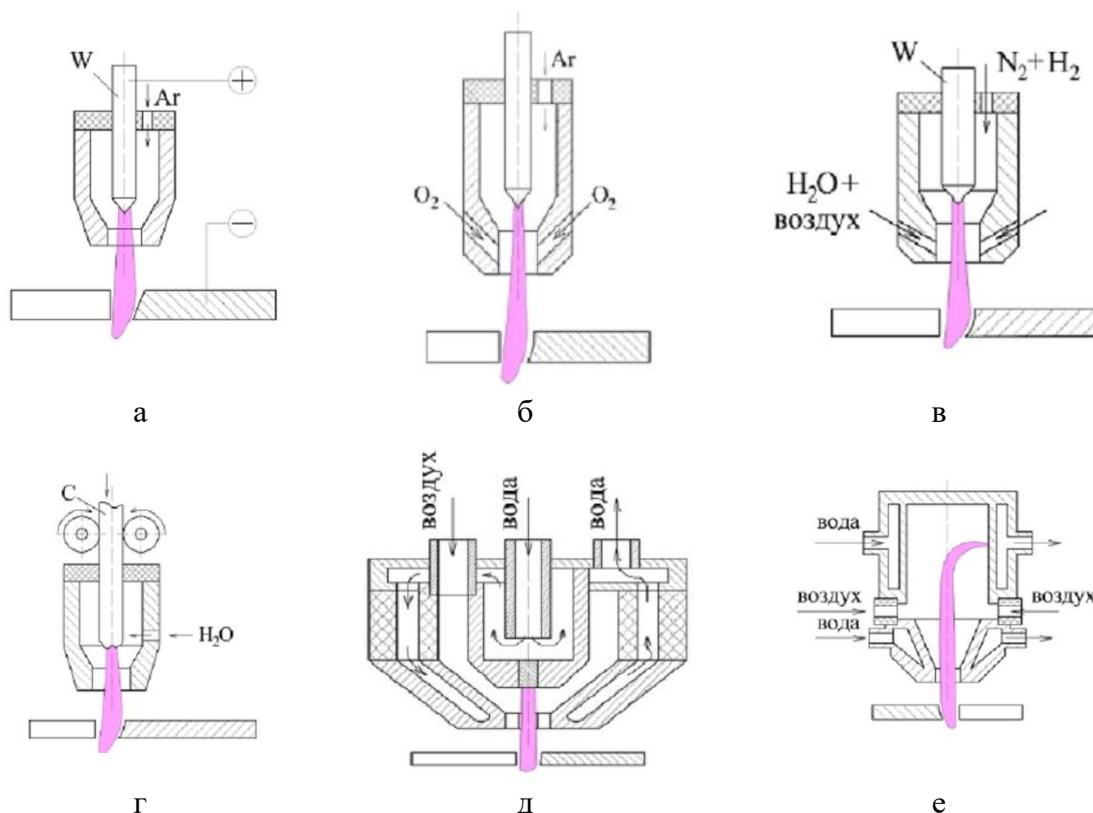


Рис. 1. Классификация плазматронов по материалу катода, рабочему газу и способу охлаждения

Сравнительным преимуществом конструкции плазматрона с вольфрамовым катодом (рис. 1а) является стабильность процесса резания. Недостатками плазматрона этого типа являются высокая стоимость рабочего газа (инертные газы), значительный износ электрода, низкая скорость резки. К преимуществам плазматрона с дополнительной подачей кислорода в электрод относится возможность повышения скорости разрезания заготовки (рис. 1б). Недостатками плазматрона данной конструкции являются сложность технологических операций, а также необходимость приобретения баллонного оборудования. К конструктивным особенностям плазматрона с подачей азота и водорода в рабочую область (рис. 1в) относятся возможность варьирования энергетической мощности и уменьшения зоны термического воздействия. Недостатками плазматрона данного типа являются сложность оборудования и технологии, относительно невысокая стабильность поджига дуги, взрывоопасность рабочего газа. На рис. 1г представлена конструктивная схема плазматрона с графитовым катодом, обеспечивающим возможность повышения температуры плазмы, а также уменьшения ширины реза. Недостатками плазматронов данного типа являются низкая стабильность поджига и горения дуги, высокий расход графитового катода. Компактность и простота конструкции плазматронов с гафниевой вставкой-катодом (рис. 1д), а также высокая плотность эмиссионного тока являются их преимуществами по сравнению с плазматронами других типов. К недостаткам катодов с гафниевой вставкой относятся вероятность ее разрушения при повторных включениях и высокая стоимость материала вставки. Плазматроны с подачей воды и воздуха в электрод (рис. 1е) обладают высоким

ресурсом, обеспечивают возможность варьирования мощности, не требуют использования вставок, выполненных из дорогостоящих тугоплавких металлов. В то же время конструкция плазматронов данного типа исключает возможность поджига дуги от серийно выпускаемых источников питания благодаря неконтролируемому росту напряжения и размеров дуги.

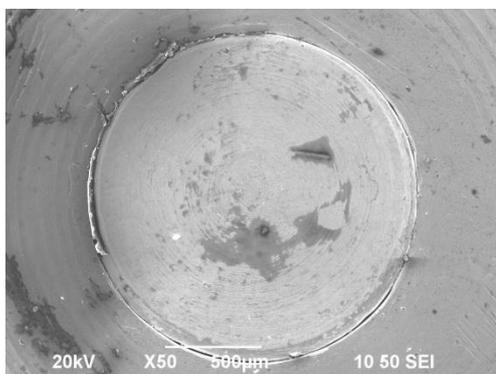
Таким образом, компактность и простота конструкции, а также удовлетворительная плотность эмиссионного тока обуславливают широкое применение плазматронов с гафниевой вставкой-катодом в технологиях плазменной резки металлов, сталей и сплавов.

2. Химический состав и морфология поверхности гафниевых термохимических катодов.

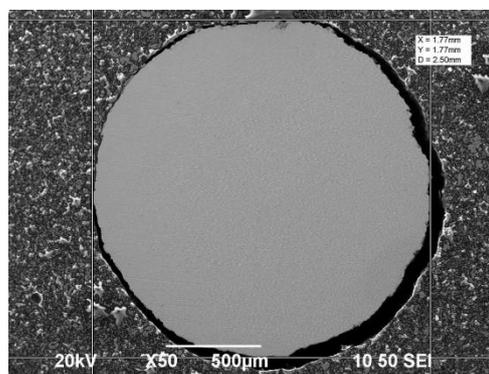
В данной работе проведено исследование морфологии поверхности и химического состава вставки-электрода марки Hypertherm 220971 в состоянии поставки, а также выработавшего ресурс электрода отечественного производителя – производственной компании ООО «Технократ». Исследование состава и морфологии поверхности гафниевых электродов выполнено с применением растрового электронного микроскопа JEOL JCM-5700, оснащенного энергодисперсионным спектрометром JED-2300.

Анализ микрофотографий поверхности гафниевой вставки-катода в электрод марки «Hypertherm» (рис. 2а, 2б, 2в, 2г), полученных с увеличением $\times 50$, $\times 500$, $\times 1000$ и $\times 5000$ крат, позволяет сделать вывод о том, что морфология поверхности вставки характерна для поверхностной пластической деформации сжатия (смятия) металла, в данном случае благодаря механической запрессовке гафниевой вставки-катода в электрод. К особенностям морфологии исследуемой поверхности также следует отнести отсутствие на ней посторонних включений, трещин, признаков коррозии, однако на поверхности присутствуют области незначительного выкрашивания материала вставки (рис. 2в).

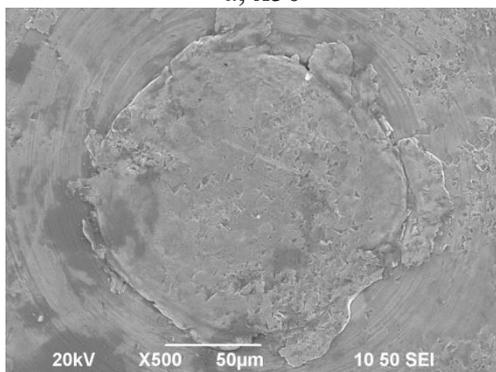
Анализ микрофотографий поверхности гафниевой вставки-катода в электрод, изготовленный ООО «Технократ» (рис. 2д, 2е, 2ж, 2з), полученных с увеличением $\times 50$, $\times 500$, $\times 1000$ и $\times 5000$ крат, позволяет сделать вывод об однородности исследуемой поверхности, характерной для механической обработки металлических материалов (шлифование).



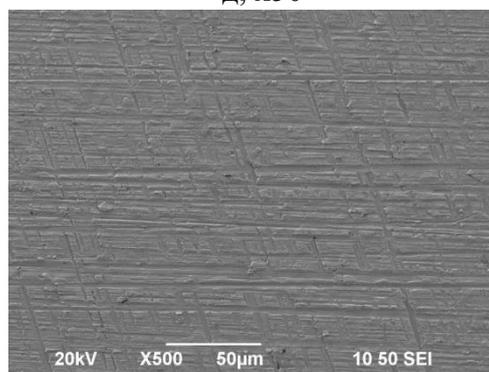
а, $\times 50$



д, $\times 50$



б, $\times 500$



е, $\times 500$

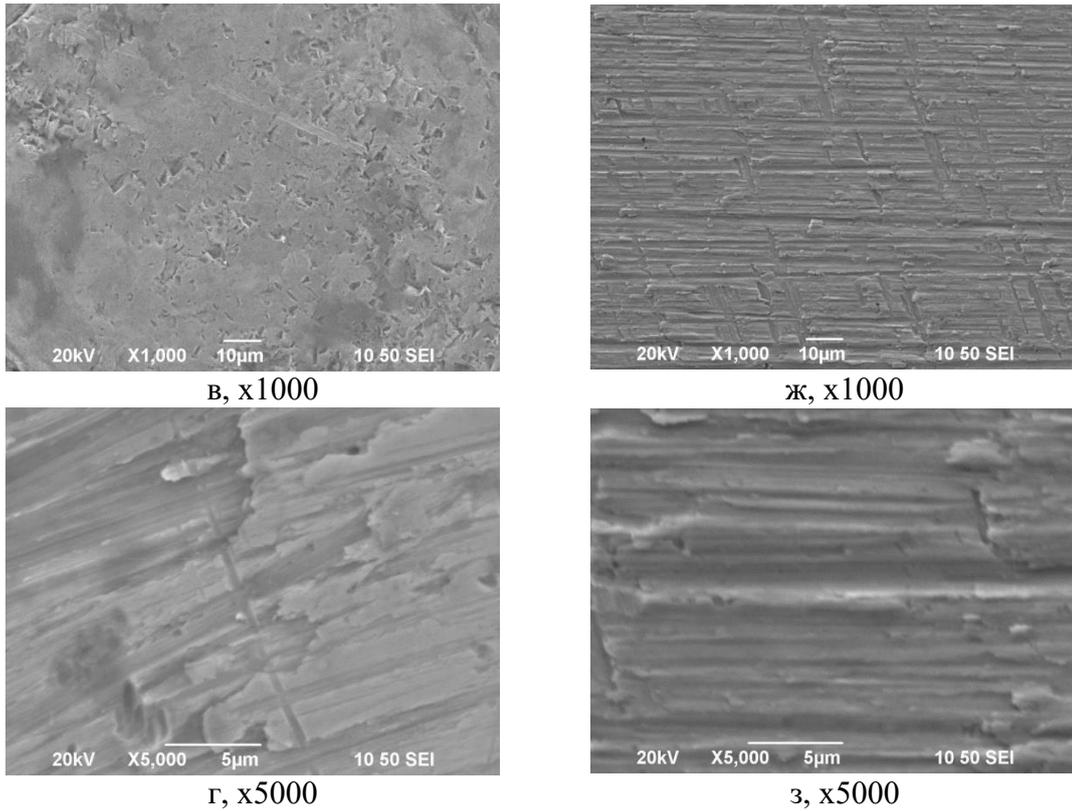


Рис. 2. Микрофотографии поверхности гафниевых вставок, изготовленных «Hypertherm» (а, б, в, г) и ООО «Технократ» (д, е, ж, з), с различным увеличением

На рис. 3 и 4 представлены энергодисперсионные спектры поверхностей гафниевых вставок-катодов, изготовленных соответственно ООО «Технократ» и «Hypertherm».

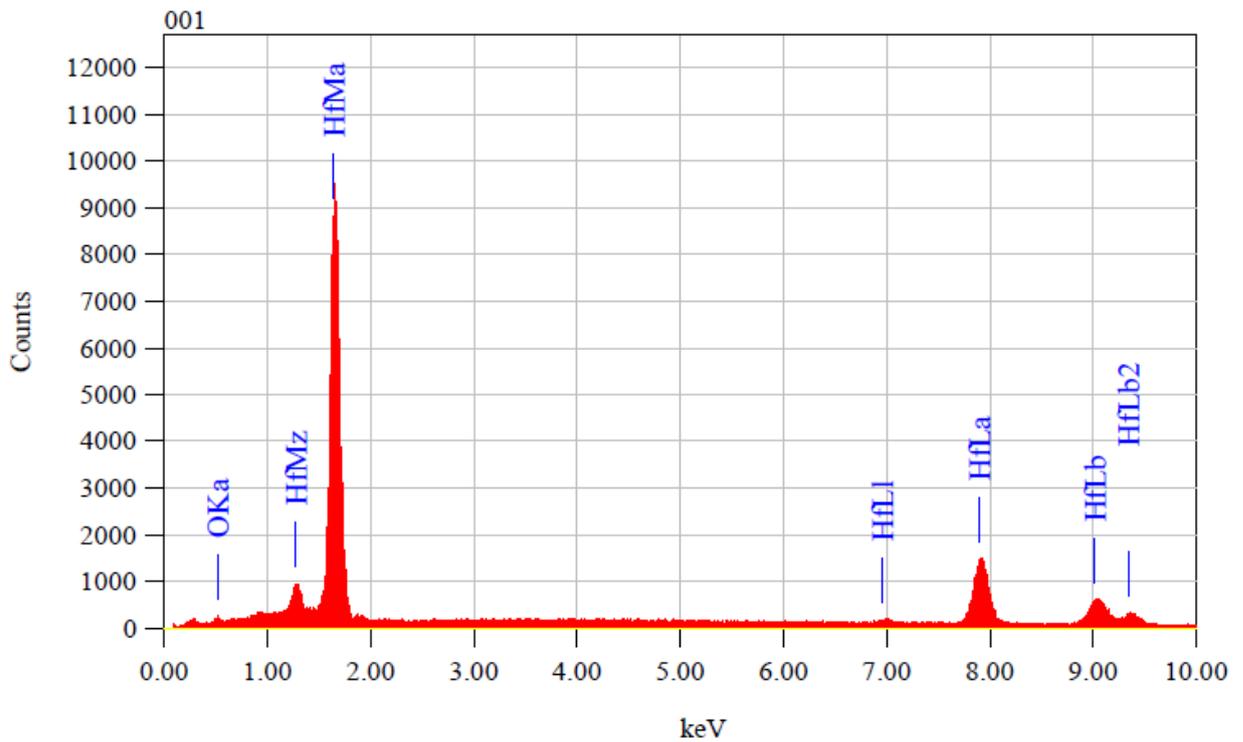


Рис.3. Энергодисперсионный спектр поверхности гафниевой вставки-катада, изготовленной ООО «Технократ»

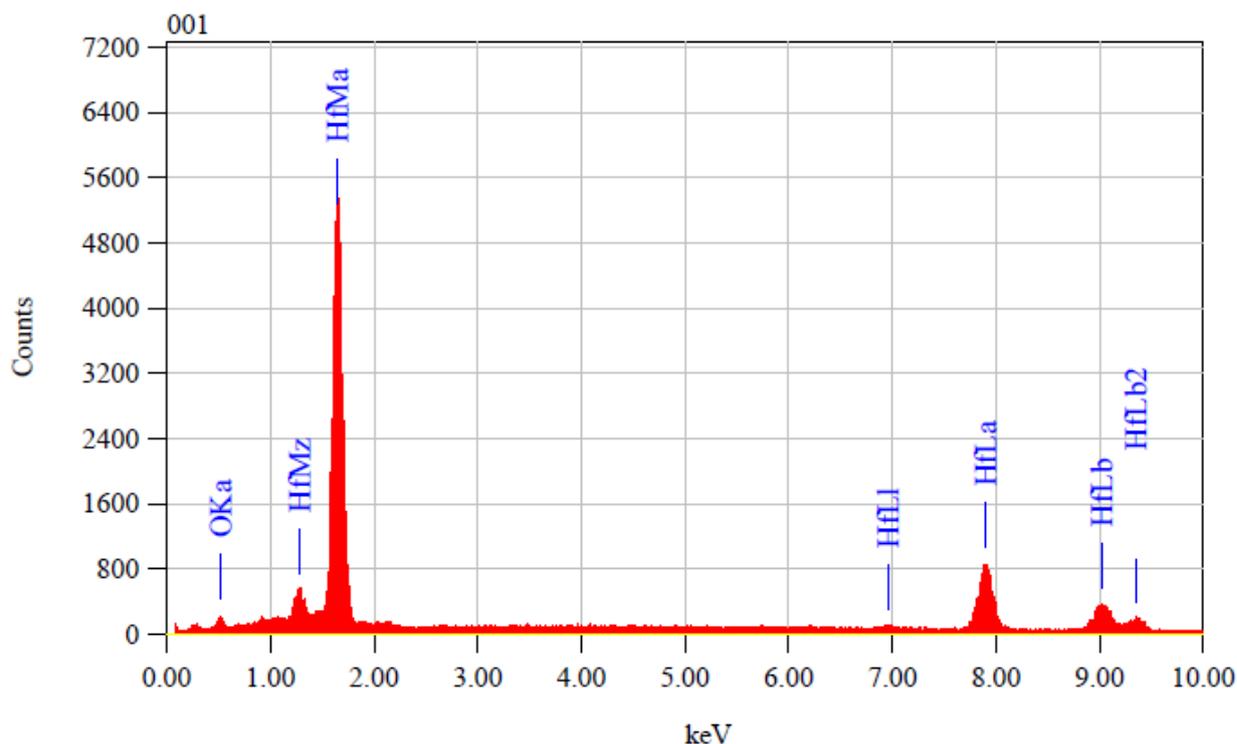


Рис.4. Энергодисперсионный спектр поверхности гафниевого вставки-катода, изготовленной «Hypertherm»

Энергодисперсионные спектры (рис. 3, 4) представляют собой совокупность максимумов характеристического рентгеновского излучения гафния и кислорода (обозначения на спектрах Hf – гафний, O – кислород) на фоне непрерывного (сплошного) излучения.

Близкое к 100% содержание гафния во вставке-катоде (99,33 % по массе), изготовленном ООО «Технократ», отражает высокую степень его относительной чистоты и незначительное содержание кислорода (0,67 % по массе). Концентрация кислорода во вставке-катоде, изготовленной «Hypertherm» (1,27 % по массе), указывает на сравнительно большее содержание кислорода в приповерхностном слое вставки. Соответствующее содержание гафния во вставке-катоде, изготовленном «Hypertherm», составляет 98,73 % по массе.

Библиографический список

1. Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Electrode phenomena in plasma sources // Handbook of thermal plasmas. 2016. P. 1–43. DOI: 10.1007/978-3-319-12183-3_13-1.
2. Ghorui S., Meher K. C., Kar R., Tiwari N., Sahasrabudhe S. N. Unique erosion features of hafnium cathode in atmospheric pressure arcs of air, nitrogen and oxygen // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49, no 29. P. 295201. DOI: 10.1088/0022-3727/49/29/295201.
3. Javidi Shirvan A., Choquet I., Nilsson H. Effect of cathode model on arc attachment for short high-intensity arc on a refractory cathode // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49, no 48. P. 485201. DOI: 10.1088/0022-3727/49/48/485201.
4. Дмитренко А. Е., Пельх В. Н., Пилипенко Н. Н. Рафинирование гафния методом электронно-лучевой плавки // Вопросы атомной науки и техники. 2004. Вып. 3. С. 112–115.
5. Жумалиев Ж. М. Компьютерное моделирование износа электрода плазматрона с вращающимся шаровым электродом с применением программы 3ds max // Известия вузов. 2015. Вып. 1. С. 54–61.

С.В. Данилов, В.А. Егорова, А.А. Щеглова, М.А. Бессонова
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Аннотация. Методом вакуумного адиабатического калориметра проведены исследования температурных зависимостей теплоемкости двухкомпонентных композиционных материалов триботехнического назначения с углеродными наполнителями на основе ПТФЭ. По полученным результатам рассчитаны термодинамические характеристики ПКМ. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о большей структурной и кинетической активности наполнителя УВ по сравнению с СКГ.

Ключевые слова: теплоемкость, политетрафторэтилен, композиты, фазовые переходы, термодинамические функции.

Для длительной и надежной эксплуатации трибосистем материалы, используемые в узлах трения, должны обеспечивать эффективный отвод тепла из зоны контакта и поддерживать в ней оптимальный градиент температуры [1]. Поэтому разработка новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) триботехнического назначения должна проводиться с учетом теплофизических свойств и термодинамических функций компонентов (матрицы и наполнителей) и синтезированных материалов. ПКМ, имеющие высокую теплоемкость и теплопроводность, в процессе фрикционного взаимодействия могут снижать интенсивность нарастания температуры в зоне трения, тем самым способствуя повышению износостойкости композита [1, 2].

Как известно, для повышения износостойкости в политетрафторэтилен (ПТФЭ) – полимер антифрикционного назначения – вводятся наполнители различной природы. При этом углеродные наполнители обладают повышенной структурной активностью [3], что позволяет осуществлять многоуровневую структурную модификацию матрицы.

Теплоемкость образцов ПТФЭ различной степени кристалличности подробно изучена ранее [4-6]. В работе [6] эти данные проанализированы и обобщены, а также определены значения теплоемкости для полностью кристаллического и полностью аморфного образцов полимера для области 0–700 К.

В качестве углеродных наполнителей для ПТФЭ (ГОСТ 10007-80), которым приписывается высокая структурная, а также кинетическая активность, выбраны углеродное волокно (УВ - ГОСТ 28005–88) и скрытокристаллический графит (СКГ - ГОСТ 5420-74) [1, 7]. Теплоемкость и термодинамические функции УВ и СКГ были изучены нами ранее в интервале 7–650 К [8]. В работе [8] приведены основные характеристики и технология получения данных наполнителей.

Цель настоящей работы – на основе калориметрических исследований в области 7–340 К частично кристаллического ПТФЭ и двухкомпонентных композитов на его основе с углеродными наполнителями провести качественную оценку уровня взаимодействия углеродных наполнителей с матрицей.

При синтезе композиций политетрафторэтилена с наполнителями использовали стандартную для данных ПКМ технологию твердофазного синтеза, включающую измельчение и смешивание компонентов, холодное прессование и последующее спекание [1].

Теплоемкости C_p ПТФЭ и ПКМ с УВ и УГС в области 7–340 К измерялись на теплофизической установке БКТ–3 – полностью автоматизированном адиабатическом вакуумном калориметре. Конструкция БКТ–3 и методика измерений описаны в работах [9, 10]. Величина калориметрической ступеньки составляла 0,5 – 1,0 К в области регулярного изменения теплоемкости и 0,1 – 0,2 К в области фазовых превращений. Погрешность измерений C_p при гелиевых температурах согласно методике составляет около 2%, с повышением температуры до 40 К снижается до 0,5% и при температурах больше 40 К имеет величину порядка 0,2%. Полученная зависимость удельной теплоемкости образца ПТФЭ – матрицы композита – приведена на рис. 1.

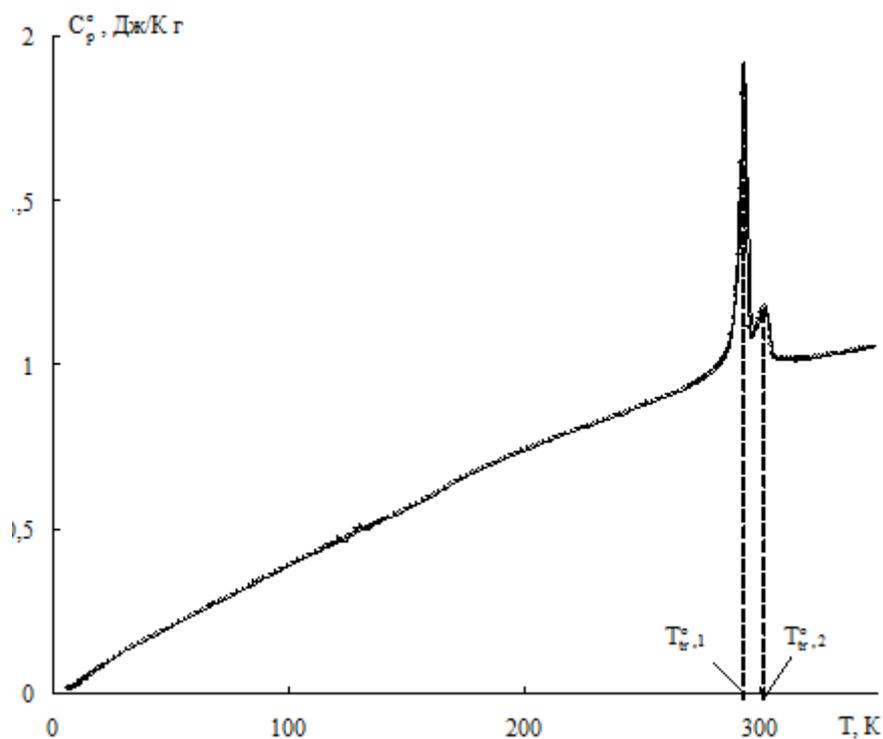


Рис. 1. Температурная зависимость удельной теплоемкости ПТФЭ

Полученные результаты находятся в полном соответствии с результатами для изученных ранее образцов ПТФЭ [5, 6]: при $T_{tr1} = 293,3$ К и $T_{tr2} = 302,4$ К зарегистрированы два максимума теплоемкости, соответствующие фазовым превращениям. Первый переход связан со структурными изменениями в ПТФЭ. В соответствии с данными работы [5], ниже 293 К повторяющиеся звенья ПТФЭ составляют триклинную элементарную ячейку с конформацией цепи в виде спирали 1*13–6. Выше 293 К структура звеньев ПТФЭ иная: гексагональная элементарная ячейка с конформацией цепи в виде спирали типа 1*15–7. Второй переход при 302,4 К связан с разупорядочением вдоль оси спирали [5].

Для изученных образцов двухкомпонентных ПКМ, содержащих помимо основы из ПТФЭ по 10 масс. % углеродных наполнителей (УВ и СКГ), получены аналогичные температурные зависимости теплоемкости, по которым определены температуры фазовых переходов и рассчитаны термодинамические характеристики, приведенные в таблице 1.

Согласно методике эксперимента по расчетам площадей, ограниченных экспериментальными кривыми температурных зависимостей удельной теплоемкостей образцов в области переходов и экстраполяционными кривыми регулярных температурных зависимостей теплоемкостей в этих же областях, вычислены суммарные энтальпии

переходов $\Sigma\Delta H_{tr}$ и энтропии переходов $\Sigma\Delta S_{tr}$ (табл. 1). Рассчитанные величины приведены на единицу массы образца.

Таблица 1

Термодинамические характеристики фазовых переходов

Состав образца, масс %			Температуры фазовых превращений		$\Sigma\Delta H_{tr}$, Дж/г	α %	$\Sigma\Delta S_{tr} \cdot 10^3$ Дж/(К·г)
ПТФЭ	СКГ	УВ	T_{tr1} , К	T_{tr2} , К			
100	-	-	293,3	302,4	$5,39 \pm 0,06$	63,4	31,5
90	10	-	292,3	300,5	$4,00 \pm 0,05$	52,3	25,8
90	-	10	293,2	301,4	$2,80 \pm 0,04$	36,6	24,3

Расчет степени кристалличности α исследованных образцов (табл. 1) основывали на данных работы [6], где доказывается, что суммарное значение энтальпий переходов при комнатной температуре прямо пропорционально степени кристалличности ПТФЭ, а $\Sigma\Delta H_{tr}$ для ПТФЭ, имеющего стопроцентную степень кристалличности, составляет 8,499 Дж/г.

Рассчитанные термодинамические функции позволяют качественно оценить наличие взаимодействия матрицы и наполнителя. Несмотря на потенциальную структурную и кинетическую активность, использованные наполнители не оказывают значительного влияния на температуры переходов. Вместе с тем ширина и интенсивность пиков на зависимости теплоемкости от температуры для образцов исследованных ПКМ отличается от таковых для ПТФЭ. Это указывает на влияние наполнителей на фазовые переходы и проявление ими структурной активности. Кроме того суммарная энтальпия и энтропия фазовых переходов существенно снижаются при введении в полимер как УВ, так и СКГ. Это приводит к значительному снижению степени кристалличности матрицы композита: на 17,5% для СКГ и на 42,3% для УВ по сравнению с исходным значением.

В работе [6] предлагается использовать коэффициент $\beta = \frac{\Sigma\Delta H_{tri}}{\Sigma\Delta H_{tr1}}$, равный отношению

энтальпии фазового перехода в ПКМ к энтальпии этого перехода в чистом ПТФЭ для оценки степени взаимодействия наполнителя с матрицей. Если β совпадает с концентрацией матрицы, то взаимодействие между матрицей и наполнителем отсутствует, если же β меньше концентрации матрицы, то наполнитель вступает во взаимодействие с матрицей и оказывает на нее влияние. Для исследованных нами образцов получается: $\beta = 0,74$ для СКГ и $\beta = 0,52$ для УВ, что говорит о более значительном влиянии наполнителя УВ на свойства ПКМ.

Дополнительно проведенный расчет удельной теплоемкости исследованных образцов ПКМ по принципу аддитивности дал результаты, меньшие полученных экспериментально. Отклонение экспериментальных значений от рассчитанных по закону аддитивности может объясняться появлением межфазного слоя на границе «полимер-наполнитель» [11] с происходящим под действием кинетически активного наполнителя изменением молекулярной подвижности макромолекул матрицы [12]. Для оценки степени влияния указанных наполнителей на молекулярную подвижность полимера необходимо проведение исследований вязкоупругих свойств данных материалов.

Библиографический список

1. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Модификация структуры и свойств композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М.: Машиностроение, 2005. 240 с.
2. Рубан А. С., Егорова В. А. Исследование тепловых процессов в металлополимерных трибосистемах // Межвузовский сборник трудов молодых ученых,

аспирантов и студентов. Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2007. С. 258–263.

3. Липатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. 260 с.

4. Douglas T. B., Harman A. W. Relative enthalpy of polytetrafluoroethylene from 0 to 440 °C // J. Res. Natl. Bur. Stand. 1965. V. 69A. P. 149–157.

5. Вундерлих Б., Баур Г. Теплоемкость линейных полимеров. М.: Мир, 1972. 238 с.

6. Failau S., Suzuki H., Wunderlich B. The thermodynamic properties of polytetrafluoroethylene // J. Polym. Sci: Polym. Phys. Ed. 1984. V. 22. P. 379–405.

7. Истомин Н. П., Семенов А. П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981. 146 с.

8. Машков Ю. К., Данилов С. В., Егорова В. А. [и др.]. Теплоемкость углеродного волокна и скрытокристаллического графита в области от 7 к до 650 К // Материаловедение. 2003. № 6. С. 34–37.

9. Малышев В. М., Мильнер Г. А., Соркин Е. Л., Шibaкин В. Ф. Автоматический низкотемпературный калориметр // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 6. С. 195–197.

10. Varushchenko R. M., Druzhinina A. I., Sorkin E. L. Low-temperature heat capacity of 1-bromoperfluorooctane // J. Chem. Thermodyn. 1997. V. 29. № 3. P. 623–637.

11. Шут Н. И. Тепловые процессы и релаксационные явления в полимерах и композициях на их основе: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 1989. 403 с.

12. Барановский В. М., Ненахов А. В., Феклина Л. И. и др. Теплофизические свойства композиций на основе политетрафторэтилена и графита. Киев, 1990. 10 с. Деп. в УкрНИИНТИ 04.06.90, № 927.

УДК: 678.743.41

Л.Ф. Калистратова, Л.В. Зайнуллина

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЛЩИНЫ ДЕФОРМИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОМПОЗИТОВ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПТФЭ С ВОЛОКНИСТЫМ И ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Аннотация. В статье приводятся результаты теоретического расчета коэффициента линейного поглощения рентгеновского излучения для политетрафторэтилена с волокнистым (ПТФЭ+УВ) и дисперсным (ПТФЭ+СКГ) наполнителями в области концентраций до 30 масс. %. Линейный коэффициент поглощения при возрастании содержания наполнителей уменьшается по линейному закону в обеих системах. Глубина половинного слоя поглощения при отражении рентгеновских лучей от образца считается сопоставимой по порядку величины с толщиной деформированного слоя материала композита в режиме его эксплуатации и оценивается единицами микрометра. В области изученных концентраций дисперсного наполнителя наблюдается линейное увеличение глубины слоя поглощения для композитов системы ПТФЭ+СКГ. В системе композитов ПТФЭ+УВ концентрационная зависимость глубины проникновения является сложной функцией содержания углеродного волокна. Неоднозначный ход указанных концентрационных зависимостей подтверждает более ранние результаты о существовании в этих системах двух разных структурных организаций полимерной матрицы композитов при незначительных (структура типа I) и больших концентрациях наполнителей (структура типа II).

Ключевые слова: коэффициент линейного поглощения рентгеновских лучей, толщина половинного слоя поглощения, полимер, рентгенограмма, структура, наполнитель.

Введение. Аморфно-кристаллический политетрафторэтилен (ПТФЭ) и композиционные материалы на его основе широко применяются в узлах трения технических систем вследствие высоких прочностных и антифрикционных свойств. Основные сведения о влиянии волокнистого наполнителя в виде углеродного волокна (УВ) и дисперсного наполнителя в виде скрытокристаллического графита (СКГ) на формирование структуры надмолекулярной организации композиционных материалов на основе ПТФЭ и на их механические, антифрикционные и вязкоупругие свойства представлены исследователями во многих статьях и систематизированы в нескольких монографиях, например [1]. Результаты многочисленных исследований позволили авторам высказать мнение о существовании в композиционных полимерных материалах на основе ПТФЭ двух совершенно разных надмолекулярных структурных организаций полимерной матрицы при содержании наполнителей до 7–10 масс. % (структура типа I) и содержании наполнителей свыше 15 масс. % (структура типа II). Указанные структуры характеризуются разным ходом концентрационных зависимостей характеристик различных свойств, среди которых можно отметить степень кристалличности, модуль упругости, коэффициент трения, скорость изнашивания и другие.

Следует отметить, что в настоящее время интерес исследователей к композиционным материалам ПТФЭ не ослабевает. Так появились работы, в которых более подробно изучается модификация структуры именно аморфной фазы ПТФЭ. Авторам работ [2, 3] впервые удалось определить отдельный вклад двух частей аморфной фазы – условно упорядоченной и неупорядоченной. Авторами работ [4, 5] в рассмотрение теоретического расчета плотности ПТФЭ введена новая характеристика структуры аморфной фазы – степень ее упорядочения, обозначаемая далее как α . Показано, что степень упорядочения аморфной фазы зависит от технологии изготовления как самого ПТФЭ, так и композиционного материала на его основе. Для чистого ПТФЭ α составляет величину, равную 0,4 – 0,6. Оказалось, что α является весьма чувствительной характеристикой к содержанию наполнителей. При изучении двойных систем ПТФЭ с волокнистым и дисперсным наполнителями авторами работы [6] конкретно показано, что концентрационные зависимости величины α полимерной матрицы композиций структурных типов I и II значительно различаются. Это позволило высказать предположение, что степень упорядочения аморфной фазы является дополнительным аспектом к тем шести аспектам механизма формирования НДС аморфно-кристаллических полимеров, которые были ранее рассмотрены в работе [7].

При структурных исследованиях материалов важно знать значение линейного коэффициента поглощения рентгеновского излучения в вещество, поскольку через него можно рассчитать толщину поверхностного слоя, участвующего в образовании дифракционной картины на рентгенограмме этого вещества. Поскольку структурные параметры и плотность композиций ПТФЭ определяются на основе рентгенограмм, то естественно возник вопрос о толщине слоя композита, участвующего в образовании дифракционной картины на рентгенограмме. Дело в том, что именно этот слой и ответственен за надежную работу полимерного композиционного материала (ПКМ) в режиме его эксплуатации.

Толщину деформированного поверхностного слоя можно теоретически определить только по значению коэффициента линейного поглощения рентгеновских лучей, который не так просто определить для сложных, тем более слабо поглощающих рентгеновское излучение полимерных материалов. Данные литературных источников в этом вопросе отсутствуют.

Целью настоящей работы является изучение влияния волокнистого и дисперсного наполнителя на глубину половинного слоя поглощения рентгеновских лучей в композициях двойных систем ПТФЭ. Поставленная цель решается на основе расчетов линейного коэффициента поглощения композиций, экспериментальная плотность вещества которых известна.

Методики и объекты исследования. Объектами исследования являются композиционные материалы на основе ПТФЭ с углеродным волокном (УВ) и со скрытокристаллическим графитом (СКГ), представленные в работе [6]. Методики получения образцов чистого ПТФЭ и ПТФЭ с наполнителями подробно описаны в монографиях, написанных под общим руководством профессора, д. т. н., Машкова Ю. К. [1 и др.]. Содержание наполнителей в композициях систем ПТФЭ+УВ и ПТФЭ+СКГ изменялось до 30 масс. %. Значения экспериментальных плотностей композитов, плотности углеродного волокна и скрытокристаллического графита ($\rho_{УВ} = 1,70 \text{ г/см}^3$, $\rho_{СКГ} = 2,11 \text{ г/см}^3$) определены методом гидростатического взвешивания [7].

Для простых веществ значения коэффициента линейного расширения μ и массового коэффициента поглощения μ/ρ , где ρ – плотность вещества, можно найти в справочнике [8]. Массовый коэффициент поглощения лучей в сложном веществе определяется законом аддитивности и является арифметической суммой массовых коэффициентов поглощения всех образующих это вещество элементов:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i, \quad (1)$$

где n_i – весовая доля каждого элемента; $(\mu/\rho)_i$ – массовые коэффициенты ослабления каждого отдельного элемента; ρ – плотность вещества.

Значения массовых коэффициентов поглощения рентгеновских лучей для композитов ПТФЭ с разной концентрацией наполнителей также можно вычислить по закону аддитивности:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_к = c_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{ПТФЭ}} + c_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{наполн.}}, \quad (2)$$

где величины c_1 и c_2 означают процентное содержание соответственно полимерной матрицы в композите и наполнителя.

Толщина поверхностного слоя, участвующая в формировании дифракционной картины на рентгенограмме, полученной в режиме отражения, и уменьшающая интенсивность рентгеновского излучения в два раза, определяется по формуле [8].

$$t = \frac{\ln 2 \cdot \sin \theta}{2\mu} \quad (3)$$

При съемке рентгенограммы в Cu -излучении дифракционная картина полимерных материалов на основе ПТФЭ сосредоточена в небольшом интервале углов дифракции $2\theta = (10 - 50)^\circ$. Расчеты величины t в режиме отражения рентгеновских лучей проводятся для угла скольжения $\theta = 20^\circ$. Следует отметить, что в режиме съемки образца на просвет глубина половинного слоя поглощения t вычисляется по формуле

$$t = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение. Расчет линейных коэффициентов композиций ПТФЭ проводится для структурной организации ПТФЭ, имеющей химическую формулу $(\text{CF}_2)_{15/7}$. При температурах выше 19°C звено, состоящее из 7 витков и 15 групп CF_2 , формирует гексагональную решетку с параметрами кристаллической ячейки: $a = b = 0.564 \text{ нм}$, $c = 1.68 \text{ нм}$ и углами между соответствующими кристаллографическими осями: $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ [1, 9].

Табличные данные для расчета формул (1) – (4) являются следующими [8]:
 - молярные массы M элементов С, F, формульной единицы CF_2 и макромолекулы $(-\text{CF}_2-)_{15}$: 12; 19; 50 и 750 г/моль;

- весовые доли элементов: $n_C = 0.24$ и $n_F = 0.76$;
- массовые коэффициенты поглощения μ/ρ элементов С и F, формульной единицы $-CF_2-$ и макромолекулы $(-CF_2-)_{15/7}$ соответственно равны: 5.5; 17.5; 14.62; 219.30 $см^2/г$;
- массовые коэффициенты поглощения μ/ρ наполнителей УВ и СКГ приняты одинаковыми: 12 $см^2/г$.

Результаты вычислений линейных коэффициентов поглощения ПТФЭ и его композиций приводятся в табл. 1. В частности, линейный коэффициент поглощения ПТФЭ при плотности $\rho = 2.20$ $г/см^3$ равен $\mu = 482$ $см^{-1}$, наполнителя УВ при плотности $\rho = 1.70$ $г/см^3$ $\mu = 9,35$ $см^{-1}$, наполнителя СКГ при плотности $\rho = 2.11$ $г/см^3$ $\mu = 11.60$ $см^{-1}$.

При увеличении содержания наполнителей величина μ по сравнению с μ ПТФЭ уменьшается: для композиций с 30 масс. % УВ она уменьшилась в 1.9 раза, а для композиций с 30 масс. % СКГ – в 1.5 раза. Поскольку величины μ и t между собой обратно пропорциональны, то величина $t_{отраж.}$ – во столь же раз увеличивается. В достоверности полученных данных можно убедиться, сравнив величины μ и t для ПТФЭ и для металла: например, для железа $\mu/\rho = 324$ $см^2/г$ [8], его плотность $\rho = 7.8$ $г/см^3$, тогда $\mu = 2530$ $см^{-1}$. Такие данные в одинаковых условиях съемки рентгенограммы соответствуют значению $t_{отраж.} = 0.47$ $мкм$, рассчитанному по формуле (3). Для аморфно-кристаллического ПТФЭ глубина проникновения рентгеновского излучения в вещество равна 2.49 $мкм$, что в 5.3 раза больше, чем для металла. Это, конечно, соответствует действительности, так как политетрафторэтилен является веществом, слабо поглощающим рентгеновское излучение.

Концентрационные зависимости линейного коэффициента поглощения μ и глубины проникновения рентгеновского излучения на просвет, рассчитанные по формуле (4), представлены на рис. 1. При увеличении концентрации наполнителей значения величины μ в обеих двойных системах линейно уменьшаются, при этом угловой коэффициент линейных зависимостей композитов в системе ПТФЭ+УВ больше в 2 раза по сравнению с таковыми в системе ПТФЭ+СКГ. Значения величин $t_{просвет}$ для ПТФЭ и его композитов в 5.8 раза больше значений $t_{отраж.}$

Таблица 1

Плотность, линейный коэффициент поглощения, толщина половинного слоя поглощения рентгеновских лучей для композитов ПТФЭ

Концентрация наполнителей %	ПТФЭ +УВ			ПТФЭ +СКГ		
	$\rho_k,$ $г/см^3$	$\mu_k,$ $см^{-1}$	$t_{отраж.}$ $мкм$	$\rho_k,$ $г/см^3$	$\mu_k,$ $см^{-1}$	$t_{отраж.}$ $мкм$
0	2.20	482	2.49	2.20	482	2.49
3	2.18	465	2.55	2.19	467	2.54
7	2.17	444	2.67	2.18	446	2.65
10	2.10	417	2.84	2.18	431	2.75
15	2.00	376	3.15	2.18	410	2.89
20	1.87	333	3.56	2.16	384	3.08
30	1.65	259	4.57	2.10	330	3.59

Следует отметить, что ход зависимостей $t_{просв.} = f$ (% СКГ) и $t_{просв.} = f$ (% УВ) практически одинаков при содержании обоих типов наполнителей до 7 масс. %. (рис. 1). Как показано ранее, это соответствует структурному состоянию матрицы композитов обеих

систем, обозначенному как тип I. Наполнители, как показано ранее в [1], при небольшом содержании только улучшают характеристики прочностных и антифрикционных свойств.

Указанные графики расходятся при содержании наполнителей свыше 15 масс %, что соответствует структурному типу II в обеих полимерных системах. Результаты для величины $t_{\text{просв.}}$ расходятся: во-первых, для композитов системы ПТФЭ+УВ численное значение величины $t_{\text{просв.}}$ больше, чем для композитов системы ПТФЭ+СКГ, во-вторых, отклонения значений носят уже нелинейный характер. В композитах структурного типа II дисперсный наполнитель, имея плотность, сравнимую с плотностью ПТФЭ, при концентрации 30 масс. % СКГ увеличивает толщину слоя поглощения примерно в 1.5 раза, тогда как волокнистый наполнитель, имея плотность в 1.3 раза меньшую плотности ПТФЭ, при такой же концентрации увеличивает толщину слоя поглощения почти в 1.8 раза.

В композициях со структурой типа II в системе ПТФЭ+УВ значительное снижение линейного коэффициента поглощения при увеличении содержания волокнистого наполнителя действительно отражает сведения о процессах, приводящих структуру аморфной фазы как к уменьшению коэффициента ее упорядочения [7], так и повышению рыхлости аморфной фазы [1] полимерной матрицы композитов. В такой структуре возможно образование многочисленных пустот разного размера, что и приводит к значительному уменьшению величины μ . Большое содержание волокнистого наполнителя в ПТФЭ негативно влияет на состояние аморфной фазы полимерной матрицы композитов, что сопровождается ухудшением прочностных и эксплуатационных свойств полимерного вещества [1].

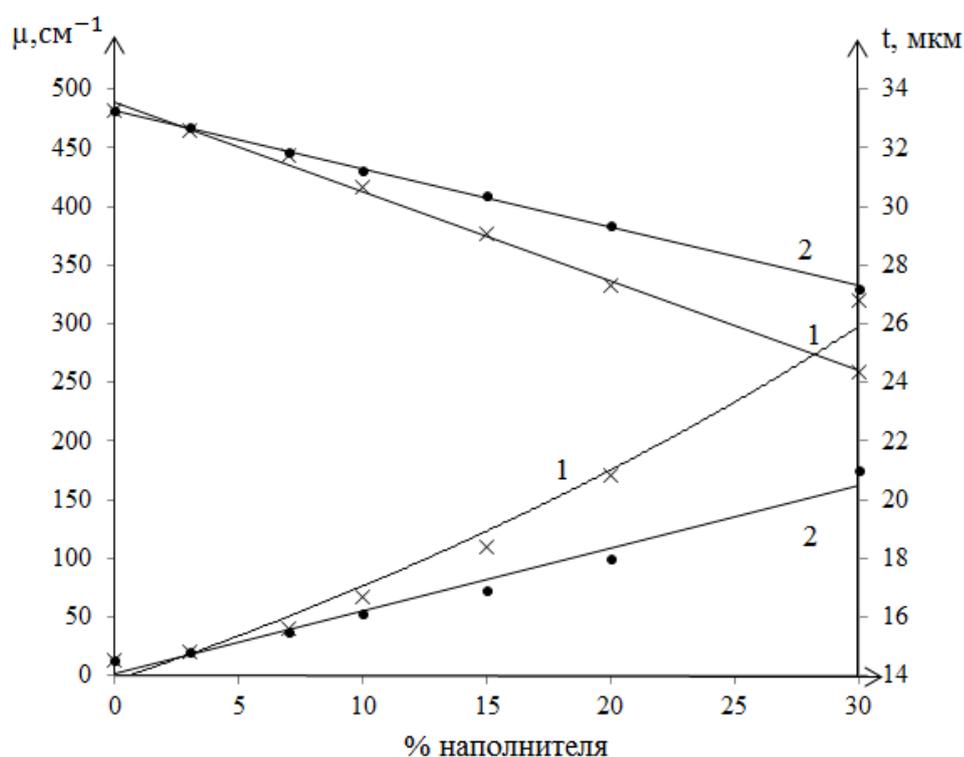


Рис. 1. Концентрационная зависимость линейного коэффициента поглощения и толщины на просвет половинного слоя поглощения рентгеновских лучей для композитов систем ПТФЭ+УВ (1) и ПТФЭ+СКГ (2)

В композициях двойной системы ПТФЭ+СКГ структурного типа II увеличение содержания дисперсного наполнителя свыше 15 масс. % также приводит к дальнейшему линейному снижению величины μ (линейному увеличению толщины поглощающего слоя), но линейный ход концентрационной зависимости сохраняется. Ухудшение

эксплуатационных свойств материала композитов с большим содержанием дисперсного наполнителя здесь можно объяснить увеличением жесткости [1] аморфной фазы полимерной матрицы за счет наполнителя при сохранении ее упорядочения [7].

Выводы.

1. Впервые для композитов двойных полимерных систем ПТФЭ+УВ и ПТФЭ+СКГ теоретически вычислены коэффициенты линейного поглощения рентгеновского излучения μ , что позволило оценить толщину поверхностного слоя $t_{\text{отраж}}$, участвующего в образовании дифракционной картины при съемке рентгенограммы на отражение, и толщину поверхностного слоя $t_{\text{просв.}}$ на просвет: $t_{\text{просв.}}$ почти в 6 раз больше $t_{\text{отраж}}$.

2. В рамках структурного типа I (содержание наполнителей до 7 масс. %) указанные величины практически одинаковы для обеих систем и незначительно отличаются от ПТФЭ, для которого $\mu = 482 \text{ см}^{-1}$, $t_{\text{отр.}} = 2,5 \text{ мкм}$, $t_{\text{просвет}} = 14,5 \text{ мкм}$.

3. В рамках структурного типа II (содержание наполнителей свыше 15 масс. %) влияние волокнистого наполнителя становится значительнее по сравнению с дисперсным наполнителем. Это проявляется в более значительном снижении значений μ для композитов системы ПТФЭ+УВ по сравнению с таковыми для системы ПТФЭ+СКГ и в отклонении концентрационной зависимости $t = f(\% \text{ УВ})$ от прямолинейной зависимости.

4. Полученные результаты еще раз подтверждают сделанные ранее выводы о существовании в композитах систем ПТФЭ+УВ и ПТФЭ+СКГ двух различных структурных типов I и II полимерной матрицы при незначительном и большом содержании наполнителей, имеющих неодинаковое влияние на характеристики различных свойств.

Библиографический список

1. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация: моногр. М.: Машиностроение, 2005. 240 с.
2. Антипов Е. М., Игнатъева Л. Н. [и др.] Рентгенографический фазовый анализ политетрафторэтилена // Кристаллография. 2010. Т. 55, № 4. С. 651–656.
3. Поликарпов В. М., Лазарев С. И., Головин Ю. М., Лазарев Д. С. Метод исследования некристаллических фаз полимерных систем и их мембран // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. №4. С. 121–129.
4. Калистратова Л. Ф., Машков Ю. К., Егорова В. А. Расчет рентгеновской плотности аморфно-кристаллического полимера с учетом степени упорядочения аморфной фазы // Материаловедение. 2018. № 1. С. 3–9.
5. Kalistratova L., Kireev A. Ordering and density amorphous phase of carbon-fiber polymer matrix PTFE-composites // Bulletin of Science and Practice. 2018. Т. 4. №1. С. 137–144.
6. Калистратова Л. Ф., Егорова В. А. Упорядочение аморфной фазы как одна из характеристик надмолекулярной структуры аморфно-кристаллического полимера // Материаловедение. 2019. № 1. С. 3–9.
7. Машков Ю. К., Калистратова Л. Ф. Методологические аспекты теории синтеза и эволюции структуры ПТФЭ-композитов. // Материаловедение. 2016. № 4. С. 39–44.
8. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Физматгиз, 1961. 863 с.

ЛИНЕЙНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ CdSe–ZnSe

Аннотация. В статье приводятся результаты теоретического расчета коэффициента линейного поглощения рентгеновского излучения для системы твердых растворов CdSe – ZnSe, в которой при увеличении концентрации ZnSe наблюдается структурный фазовый переход из гексагональной ячейки (сфалеритная модификация) CdSe в кубическую ячейку ZnSe (вюрцитная модификация). Теоретическими расчетами установлено, что при увеличении содержания ZnSe в обеих структурных модификациях твердых растворов значения линейного коэффициента поглощения монотонно уменьшаются по линейному закону, не испытывая изломов. В твердых растворах CdSe–ZnSe толщина половинного слоя поглощения рентгеновского излучения на просвет варьируется в диапазоне от 7 до 20 мкм. Концентрационная зависимость толщины половинного слоя поглощения рентгеновского излучения в области концентраций 65–70 % претерпевает излом с увеличением углового коэффициента более чем в 5 раз. Показано, что линейный коэффициент поглощения не является характеристикой, определяемой структурным фазовым переходом в системе CdSe – ZnSe, а толщина половинного слоя поглощения рентгеновского излучения, наоборот, является таковой, наряду с плотностью вещества и объемом элементарной ячейки.

Ключевые слова: коэффициент линейного поглощения рентгеновских лучей, толщина половинного слоя поглощения, рентгенограмма, структура, твердый раствор, фазовый переход.

Введение. В настоящее время одной из главных причин повышенного интереса к соединениям A^2B^6 является их широкое применение не только в радиотехнических устройствах, но и в солнечных батареях, принцип действия которых заключается в использовании электрических свойств халькогенидных соединений. Существенную роль в практическом применении халькогенидных соединений играет выяснение степени и характера взаимодействия вещества с различными средами [1–3].

Важной особенностью селенида кадмия является то, что он обладает способностью к образованию непрерывного ряда твердых растворов с селенидом цинка. Соединения типа A^2B^6 , к которым относятся оба соединения, имеют две структурные модификации: кубического типа (вюрцит) или гексагонального типа (сфалерит). Стабилизации той или иной модификации способствует способ их изготовления, введение различных добавок или создание особых условий. В работе [4] твердые растворы системы CdSe – ZnSe были получены введением в состав CdSe, кристаллическая ячейка которого соответствовала гексагональной сингонии, ZnSe с кубической элементарной ячейкой. При рентгенографической аттестации образцов твердых растворов указанной системы было установлено возникновение фазового структурного перехода в интервале концентраций (50–80) % ZnSe, характеризующегося скачкообразным изменением объема элементарной ячейки. Поскольку основную цель своей работы автор посвятил изучению адсорбционных свойств системы твердых растворов CdSe – ZnSe, то сам структурный переход остался за порогом внимания, т. е. не была определена конкретная концентрация ZnSe, при которой происходит упомянутый фазовый переход. В результате обработки дополнительных рентгенограмм твердых растворов CdSe–ZnSe были вычислены объемы элементарных ячеек и рентгеновская плотность [5]. Установлено, что в твердых растворах системы CdSe – ZnSe структурный

фазовый переход соединений со структурой сфалерита (родоначальник CdSe) в соединения со структурой вюрцита (чистый ZnSe) наблюдается при концентрации (68 ± 5) % селенида цинка. Структурный переход сопровождается скачкообразным увеличением в 2 раза объема кристаллической ячейки и уменьшением в 4 раза углового коэффициента линейной концентрационной зависимости плотности.

Новые сведения о рентгеновской плотности твердых растворов обуславливают возможность расчета линейного коэффициента поглощения рентгеновского излучения μ , по значению которого определяется глубина слоя половинного поглощения t . Анализ литературных источников позволяет сделать вывод об отсутствии результатов расчетов линейного коэффициента поглощения для твердых растворов CdSe–ZnSe. Кроме того, этот вопрос напрямую связан с определением толщины используемых в солнечных батареях тонких пленок, величина которых соизмерима с глубиной половинного слоя поглощения рентгеновских лучей [2, 3].

Цель настоящей работы заключается в выяснении вопроса о том, как изменяются упомянутые выше величины μ и t при увеличении содержания ZnSe в структуре CdSe и реагируют ли они на фазовый структурный переход наряду с плотностью и объемом кристаллической ячейки. Поставленная цель решается на основе расчетов линейного коэффициента поглощения твердых растворов, экспериментальная рентгеновская плотность вещества которых известна.

Методики и объекты исследования. Для получения поликристаллических образцов твердых растворов селенидов цинка и кадмия была использована стандартная методика непосредственного сплавления соответствующих компонентов [1]. Аттестация состава полученных образцов и изучение их структурного состояния проводились по рентгенограммам, полученным на рентгеновском дифрактометре в медном монохроматическом излучении [4]. Расшифровка рентгенограмм для определения параметров кристаллической ячейки производилась по квадратичным формам, описывающим гексагональную и кубическую сингонию кристаллических ячеек [6]. Вычисленные значения рентгеновской плотности твердых растворов заимствованы из работы [5].

Для простых веществ значения коэффициента линейного расширения μ и массового коэффициента поглощения μ/ρ , где ρ – плотность вещества, можно найти в справочнике [6]. Массовый коэффициент поглощения лучей в сложном веществе определяется законом аддитивности и является арифметической суммой массовых коэффициентов поглощения всех образующих это вещество элементов:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i, \quad (1)$$

где n_i – весовая доля каждого элемента; $(\mu/\rho)_i$ – массовые коэффициенты ослабления каждого отдельного элемента; ρ – плотность вещества.

Значения массовых коэффициентов поглощения рентгеновских лучей твердыми растворами с разной концентрацией ZnSe также можно вычислить по закону аддитивности:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{мв.р-н}} = c_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{CdSe}} + c_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{ZnSe}}, \quad (2)$$

где величины c_1 и c_2 означают процентное содержание соответственно CdSe и ZnSe в твердом растворе CdSe – ZnSe.

Толщина поверхностного слоя t , обеспечивающая формирование дифракционной картины в режиме отражения рентгеновских лучей, и уменьшающая интенсивность рентгеновского излучения в два раза, определяется по формуле [6].

$$t_{\text{отр.}} = \frac{\ln 2 \cdot \sin \theta}{2\mu} \quad (3)$$

При съемке рентгенограмм твердых растворов соединений типа A^2B^6 в Cu–излучении интервал углов дифракции 2θ варьируется в диапазоне $(20-70)^\circ$. Расчеты величины t проведены для угла скольжения $\theta = 20^\circ$. В работе [2] показано, что для халькогенидных соединений величина t сравнима с толщиной тонких пленок, используемых в солнечных

батареях. Следует отметить, что в режиме съемки образца на просвет толщина половинного слоя поглощения t вычисляется по другой формуле

$$t_{\text{прос.}} = \frac{\ln 2}{\mu} . \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение. Табличные данные для элементов Cd, Se и Zn являются следующими:

- молярные массы M элементов Cd, Se и Zn соответственно: 112.4; 78.96 и 65.37 г/моль;
- весовые доли элементов в CdSe: $n_{\text{Cd}} = 0.5874$ и $n_{\text{Se}} = 0.4126$;
- весовые доли элементов в ZnSe: $n_{\text{Zn}} = 0.4529$ и $n_{\text{Se}} = 0.5471$;
- массовые коэффициенты поглощения μ/ρ элементов Cd, Se и Zn соответственно: 234.0; 82.8; 59.0 $\text{см}^2/\text{г}$ [6];
- плотности ρ «родоначальников» твердых растворов CdSe и ZnSe соответственно: 5.61 и 5.29 $\text{г}/\text{см}^3$ при относительной погрешности не менее 5 % [5].

Вычисленные по формуле (1) значения массовых коэффициентов поглощения CdSe и ZnSe соответственно равны: 172 и 72 $\text{см}^2/\text{г}$. Их линейные коэффициенты поглощения равны: 963 и 381 см^{-1} .

Результаты расчетов величин μ и $t_{\text{отр.}}$ в режиме отражения (формула (3)) рентгеновских лучей для твердых растворов приведены в табл. 1. Концентрационные зависимости величин μ и $t_{\text{прос.}}$ (формула (4)) представлены на рис. 1.

Таблица 1

Плотность, коэффициенты поглощения рентгеновских лучей и глубина половинного слоя поглощения рентгеновских лучей в режиме отражения для твердых растворов CdSe – ZnSe

ZnSe %	ρ , $\text{г}/\text{см}^3$	μ/ρ , $\text{см}^2/\text{г}$	μ , см^{-1}	$t_{\text{отр.}}$, мкм
0	5,61	172	960	1,23
10	5,55	162	890	1,33
20	5,48	152	830	1,42
25	5,45	147	800	1,48
30	5,45	142	770	1,54
40	5,40	132	710	1,66
50	5,36	122	650	1,81
65	5,32	107	570	2,08
70	5,36	102	550	2,17
80	5,34	92	490	2,41
90	5,30	82	440	2,73
100	5,29	72	380	3,11

Результаты вычислений показывают, что для CdSe значение величины $\mu = 960 \text{ см}^{-1}$, а для ZnSe – $\mu = 380 \text{ см}^{-1}$. При увеличении содержания ZnSe величина μ в твердых растворах о монотонно линейно уменьшается от значения 960 см^{-1} во всем интервале концентраций (рис.1). Таким образом, величина μ не является характеристикой, которая обуславливает структурный переход в твердых растворах CdSe – ZnSe.

Для CdSe значение величины $t_{\text{отр.}} = 1.3 \text{ мкм}$, $t_{\text{прос.}} = 7.2 \text{ мкм}$; для ZnSe – $t_{\text{отр.}} = 3.1 \text{ мкм}$, $t_{\text{прос.}} = 18.2 \text{ мкм}$ (табл. 1). В исследуемых халькогенидных соединениях толщина половинного слоя поглощения рентгеновских лучей $t_{\text{прос.}}$ превышает значение $t_{\text{отр.}}$ в 6 раз. Концентрационная зависимость величины $t_{\text{прос.}}$ претерпевает излом в области фазового перехода, при этом тангенс наклона концентрационной зависимости увеличивается в 5,8 раза (рис. 1).

В достоверности полученных данных можно убедиться, сравнив величины μ и t для чистых соединений CdSe и ZnSe и для металла. В одинаковых условиях получения рентгенограммы, например, для железа $\mu/\rho = 324 \text{ см}^2/\text{г}$ [6], его плотность $\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$, $\mu = 2530 \text{ см}^{-1}$, что соответствует величине $t_{\text{отр.}} = 0.48 \text{ мкм}$, т. е. для изделий из чугуна и стали глубина половинного слоя поглощения рентгеновского излучения составляет десятые доли мкм, а в халькогенидных соединениях $t_{\text{отр.}}$ измеряется единицами микрометров.

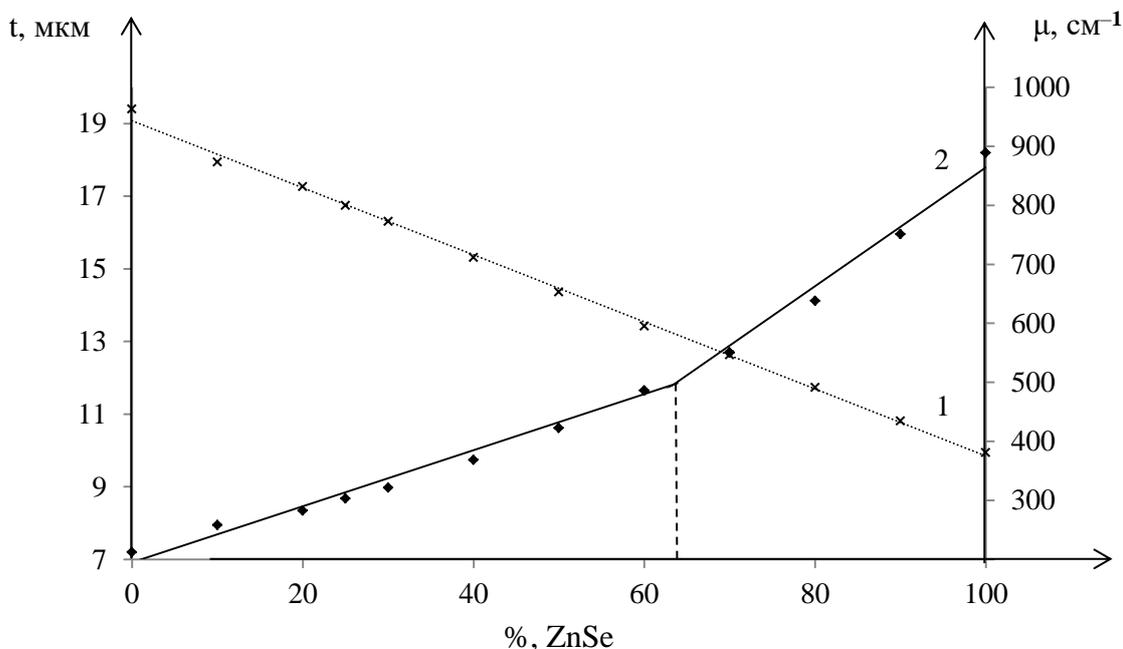


Рис. 1. Концентрационные зависимости линейного коэффициента поглощения (1) и толщины половинного слоя поглощения рентгеновских лучей на просвет (2) твердых растворов CdSe – ZnSe

Выводы.

1. Впервые для твердых растворов халькогенидных соединений CdSe – ZnSe теоретически вычислены коэффициенты линейного поглощения рентгеновского излучения μ . Значения величины μ для твердых растворов последовательно линейно уменьшаются от значения 960 см^{-1} , соответствующего CdSe, до значения 380 см^{-1} , соответствующего ZnSe.

Линейный коэффициент поглощения является величиной, не зависящей от структурных фазовых переходов в твердых растворах халькогенидных соединений CdSe – ZnSe.

2. Толщина половинного слоя поглощения рентгеновского излучения в твердых растворах CdSe – ZnSe в режиме получения рентгенограмм составляет 1 –3 мкм, в режиме на просвет соответствующая величина больше примерно в 6 раз.

3. При увеличении содержания ZnSe до 65 % величина $t_{\text{прос.}}$ линейно возрастает, а в области концентраций $(65 \pm 5) \% \text{ ZnSe}$ возникает преломление линейной концентрационной зависимости t с увеличением углового коэффициента в 5,8 раза. При дальнейшем увеличении содержания ZnSe снова наблюдается линейное увеличение этой величины. Толщина половинного слоя поглощения рентгеновского излучения является характеристикой, зависящей от фазового перехода в твердых растворах CdSe – ZnSe.

Библиографический список

1. Брус В. В., Солован М. Н., Майструк Э. В. и др. Особенности оптических и электрических свойств поликристаллических пленок CdTe, изготовленных методом термического испарения // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, № 10. С. 1886–1890.

2. Даньшина В. В., Калистратова Л. Ф. Сравнительный анализ толщины и электрической проводимости тонких халькогенидных полупроводниковых плёнок // Физика твердого тела, 2017. Т. 59, №1. С.172–175.

3. Даньшина В. В., Калистратова Л. Ф. Влияние типа и давления газовых сред на электрические свойства полупроводниковых тонких пленок // Динамика систем, механизмов и машин. Материалы X Международная IEEE научно-техническая конференция. Омск. 2016. № 2. С. 246–252.

4. Буданова Е. М. Кислотно-основные и адсорбционные свойства поверхности полупроводниковых твердых растворов системы ZnSe – CdSe: автореф. дис. к-та хим. наук. Омск, 1999. 140 с.

5. Калистратова Л. Ф., Березин Д. П. Структурный фазовый переход в системе твердых растворов CdSe – ZnSe // Актуальные проблемы современной науки: материалы VII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, апр. 2018 г.). Омск, 2018. С. 24–28.

6. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / под ред. Я. С. Уманского. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. 863 с.

УДК 576.31-022.532

Г.Н. Камшилов, А.А. Николаева, В.В. Даньшина, А.Е. Рогачев, Н.С. Евдокимов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КЛЕТОК ДРОЖЖЕЙ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Аннотация. Проведены исследования дрожжей штамма *Rhodospiridium diobovatum* КБП У-5316 методом атомно-силовой микроскопии на зондовом микроскопе NTEGRA. Изучены морфологические особенности поверхности дрожжей. Определены размеры клеток дрожжей и их форма.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, морфология, дрожжи.

Изучение биологических объектов в нанометровом диапазоне является наиболее перспективной областью исследований в микробиологии и медицине. Применение различных методов изучения биологических нанообъектов даёт возможность получать разностороннюю информацию о структурных единицах живых организмов и отдельных клетках. Информация о форме, размерах, а также особенностях морфологии индивидуальных клеток играет существенную роль в биотехнологии, так как от них зависят уникальные физиологические свойства как непосредственно клетки, так и макроорганизма или микробного сообщества, частью которых она является. Однако биологические объекты имеют низкую механическую жесткость внешних мембран, что требует использования специальных методов изучения их поверхности, а также особенностей пробоподготовки [1]. Данной специфике проведения исследований наиболее полно соответствует метод сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

СЗМ – это уникальная платформа, способная в кратчайшие сроки всесторонне анализировать биологический материал на уровне отдельных клеток и биомолекул. Главное преимущество СЗМ состоит в возможности использования большого количества методик анализа образца и их предельно высокой чувствительности.

Одним из наиболее перспективных методов СЗМ, используемых в научных исследованиях, является атомно-силовая микроскопия (АСМ). Данный метод представляет собой сочетание общепринятых оптических методик с методами сканирующей зондовой микроскопии, а именно получение оптических изображений объектов без потери качества и использование всех возможностей СЗМ, таких как измерения локальной адгезии, нанометровое разрешение, манипулирование сканирующим зондом, измерение силовых кривых и др. [2]. Оптическая наводка микроскопа дает возможность делать измерения в любых участках образца, что позволяет выбирать качественно различные области интересующих нас биологических объектов. Кроме того, методом АСМ проводятся исследования живых систем в условиях, максимально приближенных к естественным. Таким образом, можно получить не только геометрические размеры организмов, но и исследовать как процессы жизнедеятельности отдельных биообъектов, так и их взаимодействие между собой.

В АСМ геометрические (форма, размеры клеток и их отдельных частей, тонкая структура плазматической мембраны) и механические свойства (жесткость, сила адгезии между зондом и образцом, величина деформации под действием АСМ зонда) клеток используются в качестве индикаторов, отражающих состояние этих объектов [3]. Отклонение параметров клеток от нормальных значений может свидетельствовать о протекании внутри патологических процессов. Последнее имеет значительную ценность для медицины с точки зрения использования АСМ в диагностике заболеваний и при поиске путей лечения различных патологий на клеточном уровне.

Целью данной работы является исследование морфологии клеток дрожжей с использованием полуконтактного метода атомно-силовой микроскопии.

Объектом исследования являются кормовые базидиальные дрожжи штамма *Rhodospodium diobovatum* КБП У-5316. Штамм выделен из листьев олеандра. Накопительная культура дрожжей получена на среде Сабуро и суспендирована в 0,9%-водном растворе хлорида натрия.

В качестве подложки используется предметное стекло, выбранное с учётом свойств материала с целью препятствовать возможному влиянию материала и топографии подложки на образец. Предметное стекло обезжиривается перед нанесением образца. После подготовки поверхности на подложку наносится капля образца. Нанесенная суспензия высыхает от пяти до пятнадцати минут, для того чтобы зонд имел контакт с твердой поверхностью образца. Анализ проводился при влажности воздуха 67%, температуре 24°C.

СЗМ-измерения дрожжевой колонии производились при помощи зондовой нанолaborатории NTEGRA Prima (НТ-МДТ, Россия). После получения изображений поверхности клеток данные были обработаны с помощью ПО «Gwyddion». Данная обработка дала возможность определить размеры клеток дрожжей и их форму.

На рис. 1 представлена морфология поверхности исследуемого объекта. Клетки дрожжей имеют округлую форму. Поверхность неоднородная, ярко выражены возвышения, соответствующие клеткам, и резкие провалы, которые относятся к впадинам и пустым местам между ними. На отдельных клетках наблюдаются неровности – рубцы почкования, являющиеся результатом почкования на материнских и дочерних клетках.

Из анализа отдельного фрагмента исходного образца можно заключить, что клетки образуют связную цепь со средней плотностью 16 клеток на 100 мкм^2 .

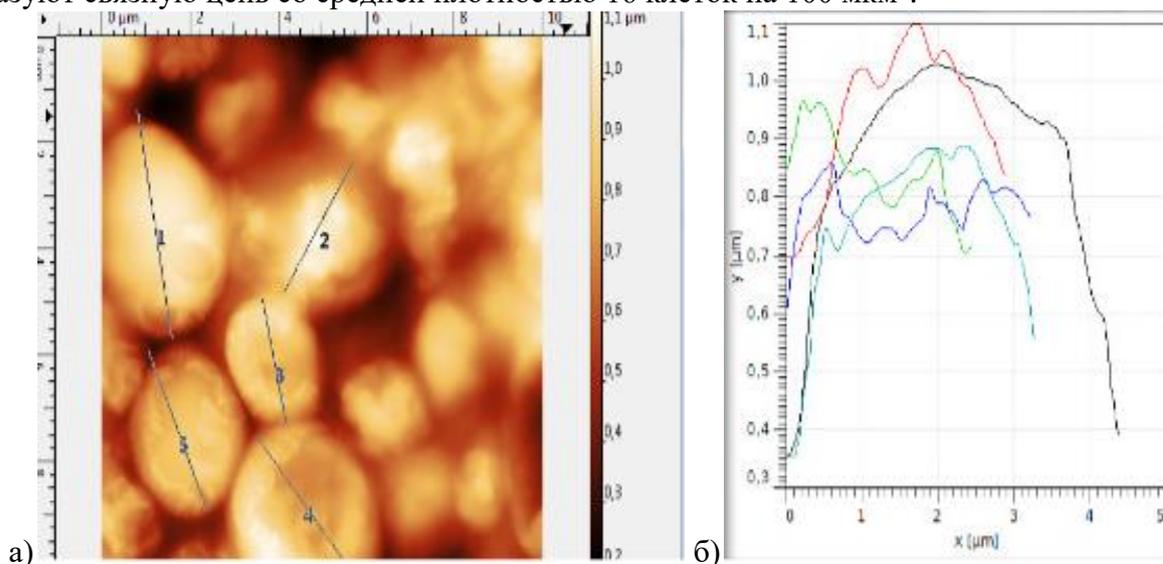


Рис. 1. Изображение клеток дрожжей (а), и профиль поверхности отдельных клеток (б)

Анализ изображения показал, что некоторые клетки деформированы, что, вероятно, обусловлено особенностями пробоподготовки. Деформированные клетки характеризуются наличием впадин (рис. 2), а недеформируемые имеют профиль, близкий к овалу. Средний диаметр клеток – $3,27 \text{ мкм}$ (рис. 1), что совпадает с предполагаемыми данными [4, 5]. Количество клеток на участке в $30 \times 30 \text{ мкм}$ составило 120 клеток (рис. 2), что соответствует плотности дрожжевых клеток в колонии, из которых на 4% можно заметить следы механического воздействия. Применённый метод исследования позволяет обнаружить клетки в процессе деления, а также рубцы деления на отдельных клетках.

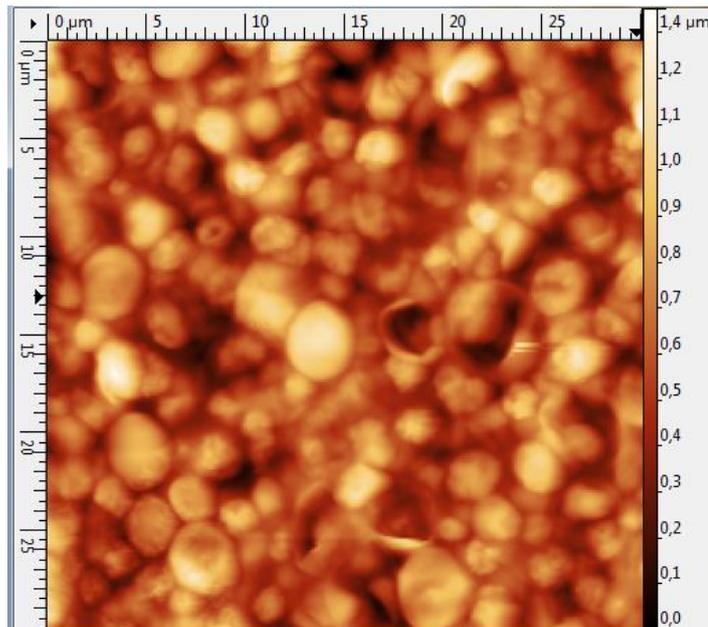


Рис. 2. Поверхность исходного образца

Для более наглядной визуализации морфологии поверхности в вертикальной плоскости образец представлен в 3D-изображении (рис. 3). По данным профиля выявлен разброс высоты клеток: от 2,607 мкм до 3,866 мкм, при средней высоте в 3,225 мкм.

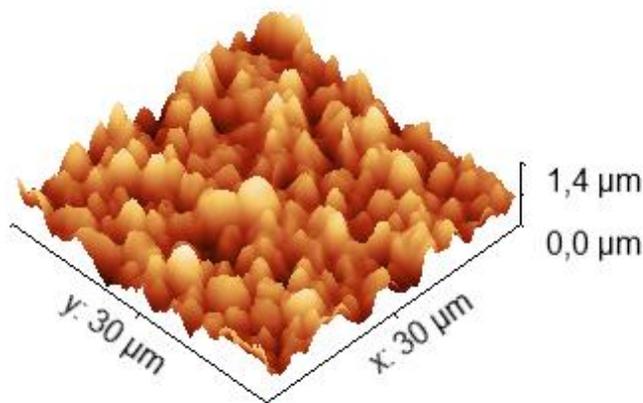


Рис. 3. 3D изображение поверхности исходного образца

При использовании градиента цвета, показывающего расположение точек по высоте, установлено, что на верхнем слое находятся около 20% клеток в подготовленном образце (рис. 4); математический расчёт распределения, предоставленный программным обеспечением, позволяет заключить, что большая часть клеток располагается под клетками первого слоя. На рис. 5 представлено распределение клеток по высоте с использованием статистических функций, из которого можно заключить, что клетки располагаются в пространстве неупорядоченно, в несколько слоёв, представляющих собой колонию дрожжей в объеме.

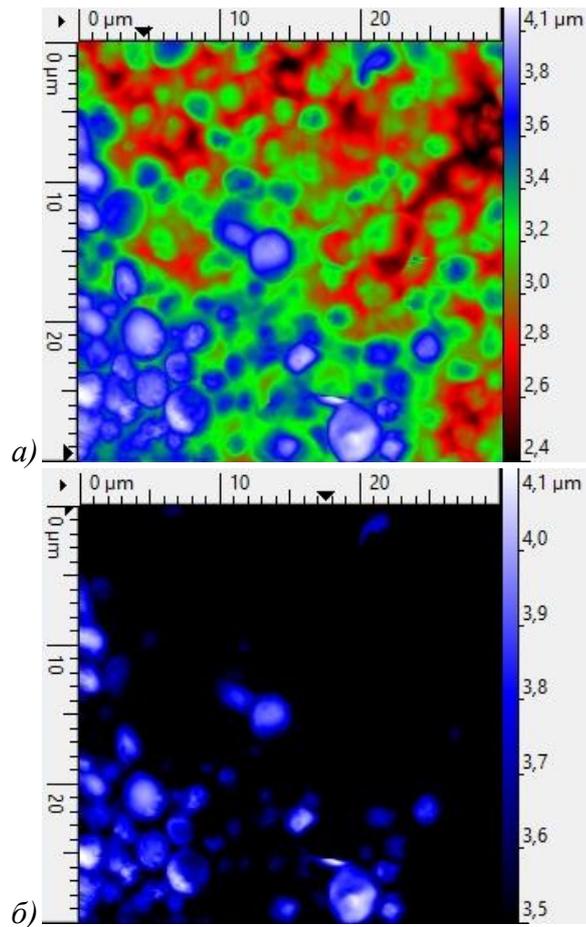


Рис. 4. Распределение клеток дрожжей по уровням:
 а) многоуровневое изображение, б) верхний уровень

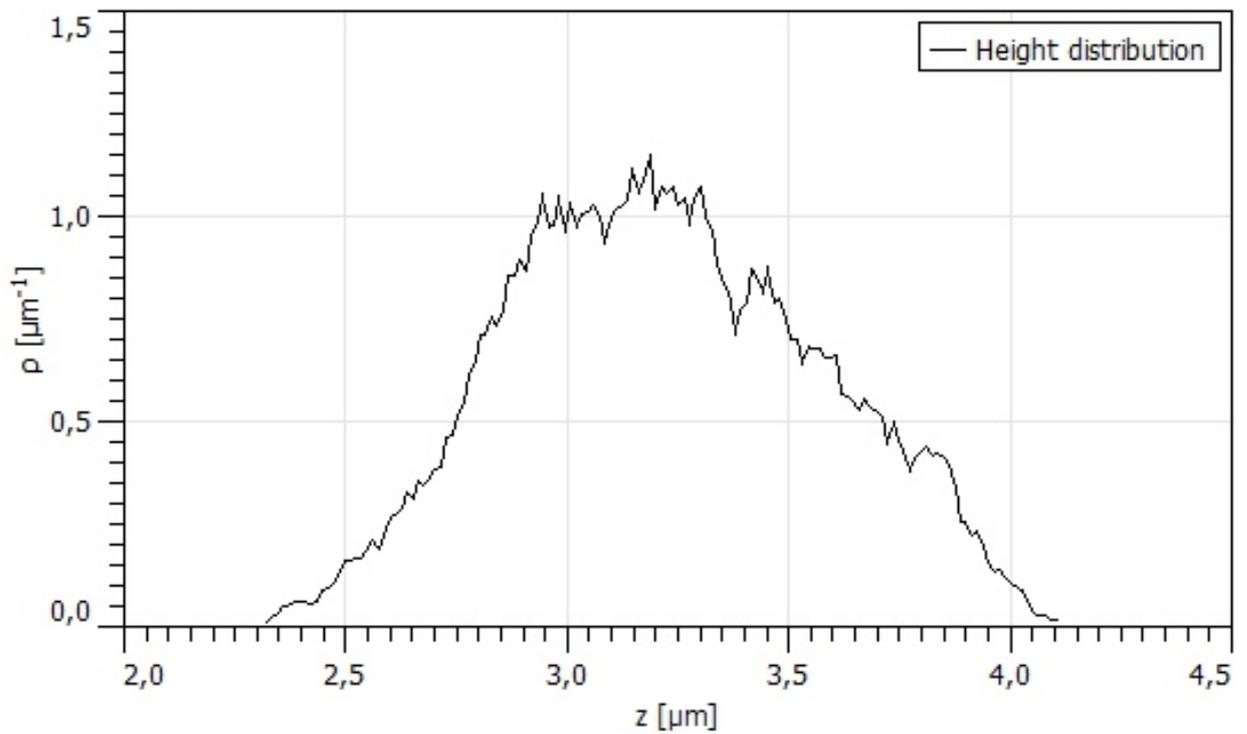


Рис. 5. Распределение клеток дрожжей по высоте

Несмотря на то что атомно-силовая микроскопия была разработана в основном для изучения объектов с жесткой поверхностью, со временем она стала важным инструментом для исследования мягких биологических образцов. АСМ исследование клеток не требует сложной пробоподготовки, при этом дает возможность изучать морфологию этих объектов с высоким пространственным разрешением.

В работе изучена морфология поверхности дрожжей, определены размеры и количество клеток, распределение их по высоте и по уровням. Метод АСМ можно рекомендовать для более быстрого определения состояния биологических объектов по сравнению с традиционными методами.

Библиографический список

1. Чернов И. Ю. Дрожжи в природе. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 336 с.
2. Ерохин П. С.: Атомно-силовая микроскопия как инструмент определения чувствительности бактерий к факторам биотической и абиотической природы. Саратов, 2015. 126 с.
3. Халисов М. М. Применение атомно-силовой микроскопии для детектирования отклика нативных клеток на внешние воздействия: дис. ...д-ра физ-мат. наук. Санкт-Петербург. 2017.
4. Kurtzman C. P. The Yeasts. / C. P. Kurtzman, J. W. Fell, T. Boekhout – Elsevier Science, 2010. 2354 p.
5. Nasirian N. Lipid and carotenoid synthesis by *Rhodospiridium diobovatum*, grown on glucose versus glycerol, and its biodiesel properties / N. Nasirian, M. Mirzaie, N. Cicek // Canadian Journal of Microbiology. 2018. V. 64(4). P. 277–289.

УДК 536.21

К.В. Короткова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КРИСТАЛЛА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Аннотация. В работе проводилось исследование спектров излучения полупроводниковых источников света на основе гетероструктур GaN/InGaN с вертикальной и планарной конструкцией кристаллов. Исследовалась интенсивность их свечения, а также изменение цветовой температуры при повышении температуры корпуса источника света. Показано, что полупроводниковые источники с вертикальной конструкцией имеют большую эффективность и долговечность.

Ключевые слова: полупроводниковый источник света, кристалл, люминофор, эффективность.

Главным элементом конструкции любого полупроводникового источника света является излучающий кристалл. В производстве светодиодов и полупроводниковых источников света на основе нитрида галлия используются два основных типа конструкции

кристаллов: вертикальная и планарная. В кристаллах вертикальной конструкции подложка, на которой была выращена эпитаксиальная структура, удаляется с помощью лазера, а в кристаллах планарной конструкции оба контакта формируются на поверхности эпитаксиальной структуры, а вывод света осуществляется через прозрачную сапфировую подложку. В процессе работы в полупроводниковом излучающем кристалле выделяется большое количество тепла. В кристаллах планарной конструкции оно отводится через сапфир, который имеет низкий коэффициент теплопроводности (30 Вт/мК), что приводит к возникновению повышенного теплового сопротивления порядка 5–10 °С/Вт. Это и является главным недостатком планарной конструкции. Вертикальная же конструкция лишена этого недостатка, в этой связи можно ожидать, что долговечность и эффективность полупроводниковых источников света с такими кристаллами будет выше [1].

В данной работе были исследованы полупроводниковые источники света (рис. 1) на основе кристаллов вертикальной и планарной конструкции производства компании *SemiLEDs* с длиной волны излучения 445-450 нм в корпусе 5050 сборки АО НИИПП (г. Томск). Использовались люминофоры марки СДЛ производства НИИ Платан, заливка марки *DowCorning OE-6662*.

На изготовленных образцах было проведено исследование электрических и фотометрических характеристик источников света с разными люминофорами (СДЛ2700, СДЛ3000, СДЛ3500, СДЛ4000). Были проведены исследования цветовой температуры и спектра излучения источников света при разных значениях температуры корпуса.

На рис. 2 представлены спектры излучения источника света с вертикальной конструкцией кристалла при температуре корпуса 30 °С и 100 °С, из которых следует, что при повышении температуры корпуса источника света происходит заметное снижение интенсивности свечения, а также увеличение полуширины спектра. Из сравнения спектров источников с вертикальной конструкцией кристалла со спектрами источников с планарной конструкцией следует, что первые имеют более высокую температурную устойчивость [2].



Рис. 1. Внешний вид исследуемых полупроводниковых источников света

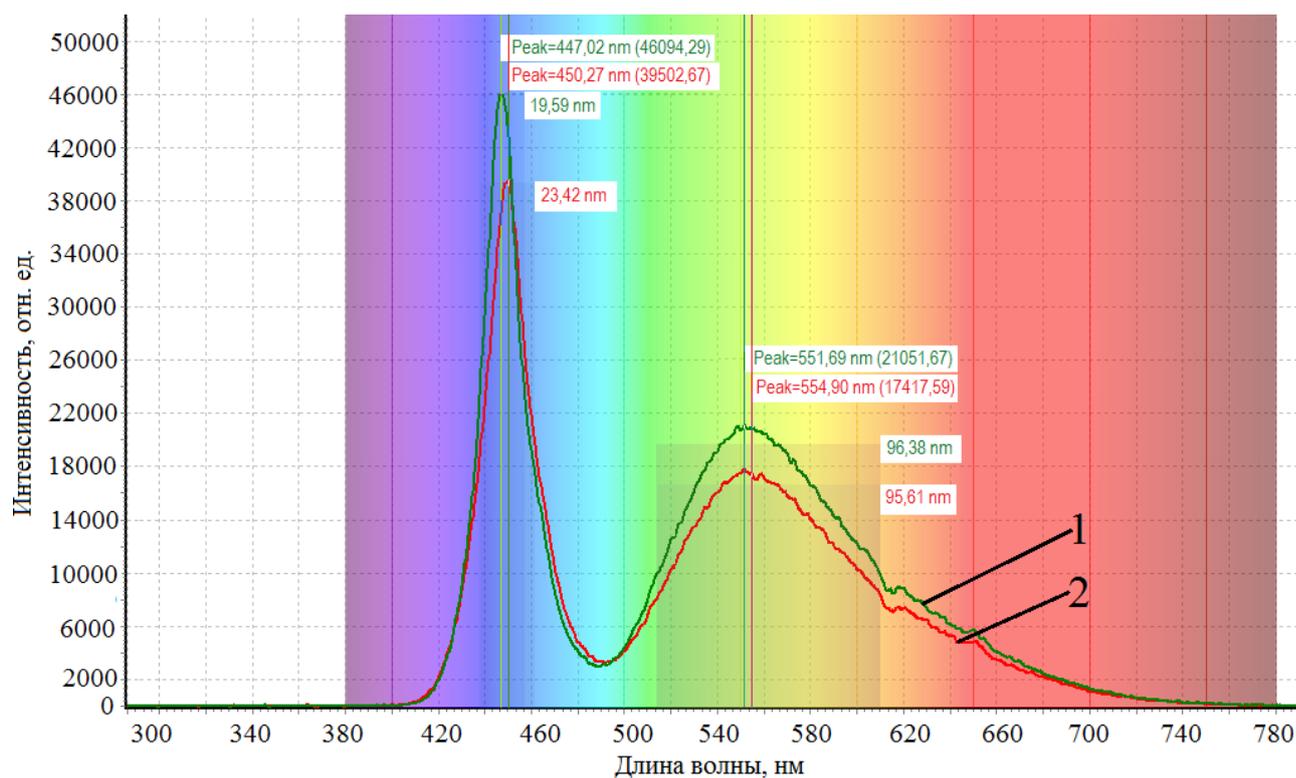


Рис. 2. Спектры излучения полупроводникового источника света с люминофором СДЛ3500 при разных температурах корпуса:
 1 – $T_{\text{корп}}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $T_{\text{корп}}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 3 представлена температурная зависимость полуширины спектра излучения кристалла полупроводниковых источников света вертикальной и планарной конструкции, из которых видно, что при повышении температуры корпуса источников света происходит уширение спектра их излучения. Поскольку полуширина спектра излучения связана с температурой активной области кристалла [3, 4], то можно сделать вывод, что вертикальная конструкция позволяет ее снизить на 8–10 °С.

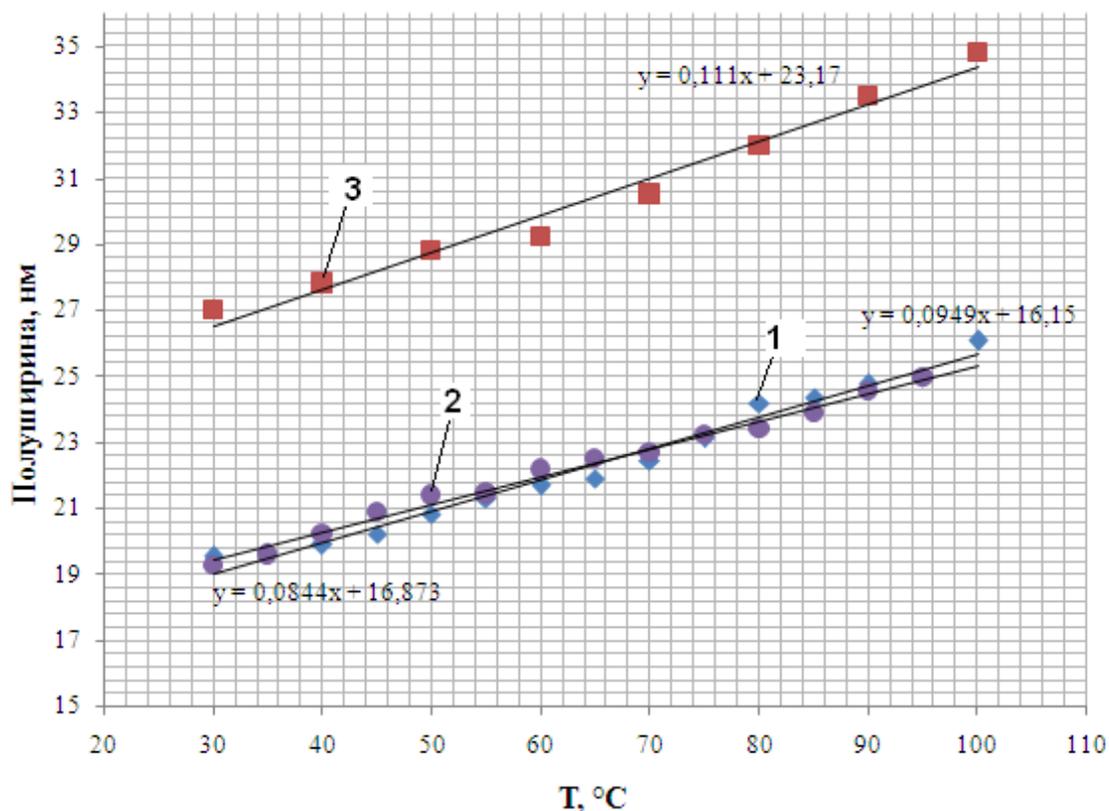


Рис. 3. Температурная зависимость полуширины спектров излучения источников света на длине волны 455 нм: 1, 2 – вертикальная конструкция кристалла; 3 – планарная конструкция кристалла

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что вертикальная конструкция позволяет снизить температуру активной области кристалла, и, как следствие, уменьшить тепловое сопротивление. На основании чего можно сделать вывод, что вертикальная конструкция кристалла может обеспечивать более высокую эффективность и долговечность полупроводниковых источников света и применение такой конструкции является более перспективным.

Библиографический список

1. Коняев П. А., Левицкий М. Е., Симонова Г. В. Исследование лазерного отстрела пленки GaN от эпитаксиальной подложки излучением эксимерного KRF-лазера // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9–2. С. 122–124.
2. Короткова К. В., Романова М. А., Смирнов С. В. Температурная и временная стабильность колориметрических параметров полупроводниковых источников света // Доклады ТУСУР. 2017. № 2 (36). С. 38–40.
3. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / пер с англ. под редакцией А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 496 с.
4. Гончарова Ю. С., Романова М. А., Смирнов С. В. Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света // Доклады ТУСУР. 2015. № 2 (36). С. 38–40.

С.В. Поздняков, Д.Б. Солодовникова, К.А. Скороход, А.А. Никулина
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОФАЗНОГО ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ СПЕКАНИЕМ СТРУЖКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. Работа посвящена исследованию структуры гетерофазного железоуглеродистого сплава, полученного методом электроискрового спекания стружки разнородных сталей 12X18H10T и У8. Структурные исследования проведены методами растровой электронной и световой микроскопии. Химический состав определяли на энергодисперсионном анализаторе INCA. Показано, что полученные материалы характеризуются гетерофазным строением, включающим перлитную, аустенитную и мартенситную составляющие.

Ключевые слова: электроискровое спекание, разнородные стали, структура.

Электроискровое спекание относится к современным технологиям порошковой металлургии. Технология характеризуется быстрым и равномерным спеканием токопроводящих частиц с приложением одноосного давления [1]. Метод позволяет получать гетерофазные материалы, в том числе железоуглеродистые сплавы, которые характеризуются в некоторых случаях уникальными свойствами по сравнению с обычными сталями. Связано это с наличием нескольких фаз в структуре гетерофазных материалов, которые существенно отличаются по свойствам [2–5]. В настоящее время активно идет изучение двух- и многофазных сталей [6–9], однако метод электроискрового спекания для получения данных гетерофазных железоуглеродистых сплавов практически не рассматривается.

Целью работы является исследование структурных особенностей гетерофазного железоуглеродистого сплава, полученного методом электроискрового спекания стружки разнородных сталей 12X18H10T и У8, находящихся исходно в аустенитном и перлитном состоянии, соответственно.

Стружки сталей У8 и 12X18H10T перемешивались в планетарной мельнице в течение 20 минут со скоростью вращения барабана 100 об/мин. Спекание выполняли на установке SPS10-4 Advanced Technology в токопроводящей графитовой пресс-форме с внутренним диаметром 30 мм при температуре 1100 °С и выдержкой 20 мин. Форма и порошок отделялись графитовым слоем для исключения взаимодействия материала и формы. Структурные исследования проводились с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP с энергодисперсионным анализатором INCA. Микротвердость оценивали на микротвердомере для испытаний по Виккерсу 402MVD Wolpert Group. Исходные материалы показаны на рис. 1а. Стружка обеих сталей характеризуется неправильной удлиненной формой.

Общий вид материала, полученного электроискровым спеканием, представлен на рис. 1б. Светлые области соответствуют исходным аустенитным частицам, темные – перлитным. Структуры данных областей представлены на рис. 2. Среднее значение микротвердости аустенитных областей составляет 400 ± 50 HV, для перлитных участков – 210 ± 89 HV. Размер аустенитных зерен составляет 2 – 4 мкм. По границе раздела зерна наблюдается присутствие карбидных фаз. При спекании разнородных сталей между ними образуется переходная область (рис. 3). Содержание хрома и никеля в данной зоне меньше, чем в исходной хромоникелевой стали и составляет 3 – 6 Cr % вес. и 1 – 5 Ni % вес. Это

приводит к тому, что при охлаждении в данных областях формируется аустенитно-мартенситная структура.

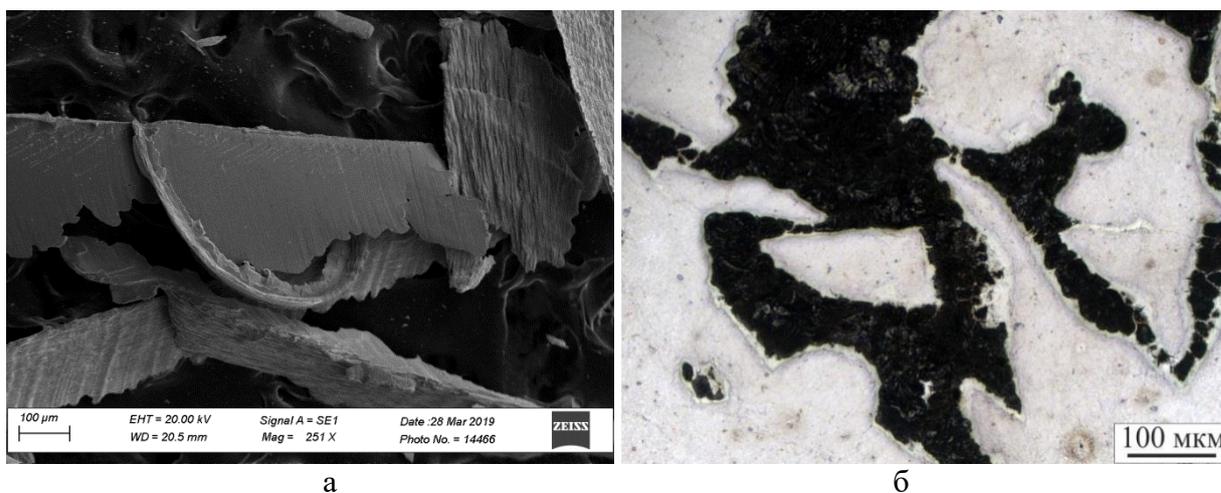


Рис. 1. Смесь стружки сталей У8 и 12Х18Н10Т (а) и общий вид материала, полученного электроискровым спеканием (б)

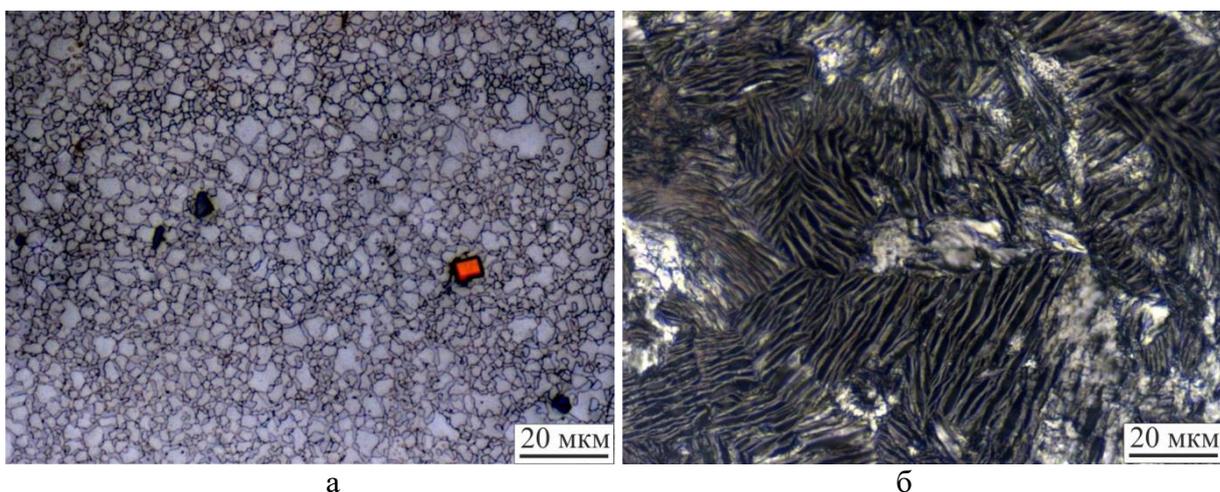


Рис. 2. Аустенитная (а) и перлитная составляющая (б) спекленного материала.

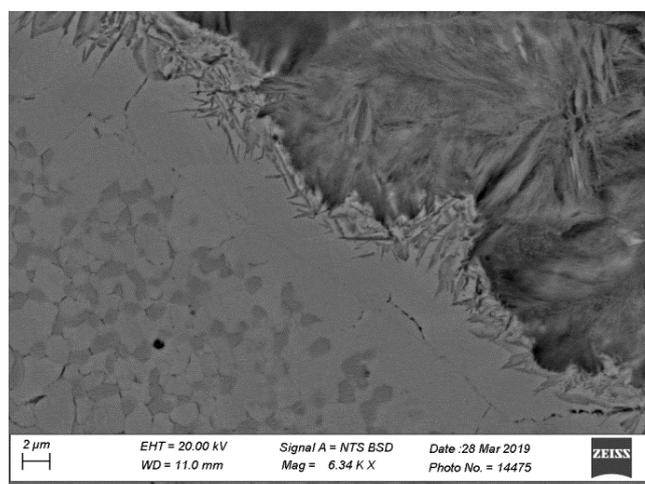


Рис. 3 Микрофотография границы раздела фаз, сформировавшихся при электроискровом спекании сталей У8 и 12Х18Н10Т.

Таким образом, метод электроискрового спекания можно успешно применять для формирования гетерофазных железоуглеродистых сплавов. Использование аустенитных и перлитных частиц приводит к формированию таких же областей в спеченном материале, а также зон взаимодействия, которые характеризуются отличным составом и структурой.

Библиографический список

1. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока : М.: Металлургия, 1987. 128 с.
2. Xiong Z. P. et al. Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting //Materials & Design. 2015. Vol. 88. P. 537–549.
3. Li C. et al. Microstructure and mechanical properties of dual phase strip steel in the overaging process of continuous annealing //Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 627. P. 281–289.
4. Zhang M. D. et al. Microstructure and mechanical properties of high strength and high toughness micro-laminated dual phase steels //Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 618. P. 168–175.
5. Goto S., Kami C., Kawamura S. Effect of alloying elements and hot-rolling conditions on microstructure of bainitic-ferrite/martensite dual phase steel with high toughness //Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 648. P. 436–442.
6. Rosenberg G., Sinaiová I., Juhar L. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators //Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 582. P. 347–358.
7. Misra R. D. K. et al. Ultrahigh strength martensite–austenite dual-phase steels with ultrafine structure: the response to indentation experiments //Materials Science and Engineering: A. 2013. Vol. 560. P. 693–699.
8. Maresca F., Kouznetsova V. G., Geers M. G. D. Deformation behaviour of lath martensite in multi-phase steels //Scripta Materialia. 2016. Vol. 110. P. 74–77.
9. Radwański K. Structural characterization of low-carbon multiphase steels merging advanced research methods with light optical microscopy //Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16, no. 3. P. 282–293.

УДК 542.6.063

А.П. Солоненко, А.И. Блесман¹, Ю.И. Видимкина¹

Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИК ИЗ АПАТИТА И ГИДРОСИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ ПОСЛЕ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Аннотация. Выполнено исследование морфологии и состава поверхностного слоя керамик из синтетических композитов на основе плохоокристаллизованного гидроксиапатита и гидросиликата кальция после их взаимодействия с прототипом плазмы крови человека. Установлено, что на поверхности, контактировавшей с основным объемом раствора, образуются сферические частицы аморфного фосфата кальция. В условиях

ограниченного контакта с жидкой фазой на поверхности композитов формируются кристаллы CaCO_3 .

Ключевые слова: поверхностный слой, кристаллизация, аморфный фосфат кальция, кальцит, биоактивность.

В ходе исследований материалов, предлагаемых к использованию в медицине для восстановления костных тканей, большое внимание уделяется явлениям, которые происходят на их поверхности при взаимодействии с биологическими жидкостями. В лабораторных условиях для предварительной оценки свойств препаратов часто применяется предложенный Т. Kokubo [1] способ, основанный на выдерживании материалов в прототипе плазмы крови человека (simulated body fluid, SBF). На основании результатов таких экспериментов способность синтетического материала интегрироваться в живую систему определяется по образованию на его поверхности слоя апатита.

В данной работе выполнено исследование изменения морфологии и состава поверхностного слоя керамик из синтетических композитов на основе плохоокристаллизованного гидроксиапатита (ГА) и гидросиликата кальция (ГСК) после их взаимодействия с SBF.

Для проведения экспериментов синтетические порошки, содержащие ГА и ГСК (с примесью карбоната кальция (КК)), прессовали в таблетки диаметром 15 мм и высотой 2 мм. Полученные образцы помещали в пластиковые сосуды, заливали 50 мл раствора SBF с $\text{pH} = 7.40 \pm 0.05$, приготовленного согласно [1], и выдерживали в течение 14 суток при 37°C в статических условиях. По истечении заданного времени таблетки извлекали из растворов, аккуратно промывали дистиллированной водой и высушивали до постоянной массы. Образцы керамик до и после экспериментов исследовали методом растровой электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп «JCM-5700», оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «JED-2300», JEOL) и РФА (дифрактометр «XRD-7000», Shimadzu).

На рис. 1 приведены микрофотографии поверхности таблеток до и после контакта с SBF. Морфология поверхности верхней и нижней сторон керамик показана на рис. 1б, в. Установлено, что на верхней стороне керамик (рис. 1б), контактировавшей с основным объемом раствора, в ходе эксперимента формируются сферические частицы. Их количество и размер увеличиваются по мере повышения доли ГСК в составе материала. Локальный анализ химического состава гранул показал, что их основными компонентами являются Ca (32.3 ± 4.1 масс.%), P (21.9 ± 2.3 масс.%) и O (36.5 ± 5.6 масс.%). Также частицы содержат углерод в количестве 4.4 ± 1.2 масс.%. Это дает основание полагать, что на поверхности керамик в процессе их выдерживания в SBF формируется слой сферических частиц аморфного фосфата кальция с изоморфно включенными группировками CO_3^{2-} .

Исследование методом РЭМ нижней стороны таблеток, которая на протяжении всего эксперимента была обращена ко дну сосуда, позволило установить, что морфология поверхности данной части керамик существенно отличается от верхней стороны. Так, поверхность образцов сравнения из ГА или ГСК после выдерживания в SBF остается фактически неизменной, новых морфологических форм на ней не обнаруживается. В отличие от них керамики, сформованные из композитных порошков, покрыты тригональными призматическими кристаллами, растущими из подложки. Плотность покрытия ими поверхности уменьшается по мере роста доли ГСК в образце. Одновременно с этим увеличивается размер частиц. Для выяснения состава обнаруженных кристаллов проведен локальный химический анализ. Установлено, что их основными компонентами являются Ca (37.0 ± 2.5 масс.%), С (12.1 ± 1.4 масс.%) и О (50.3 ± 3.9 масс.%). Следовательно, в ходе эксперимента на нижней стороне композитных керамик формируются кристаллы CaCO_3 .

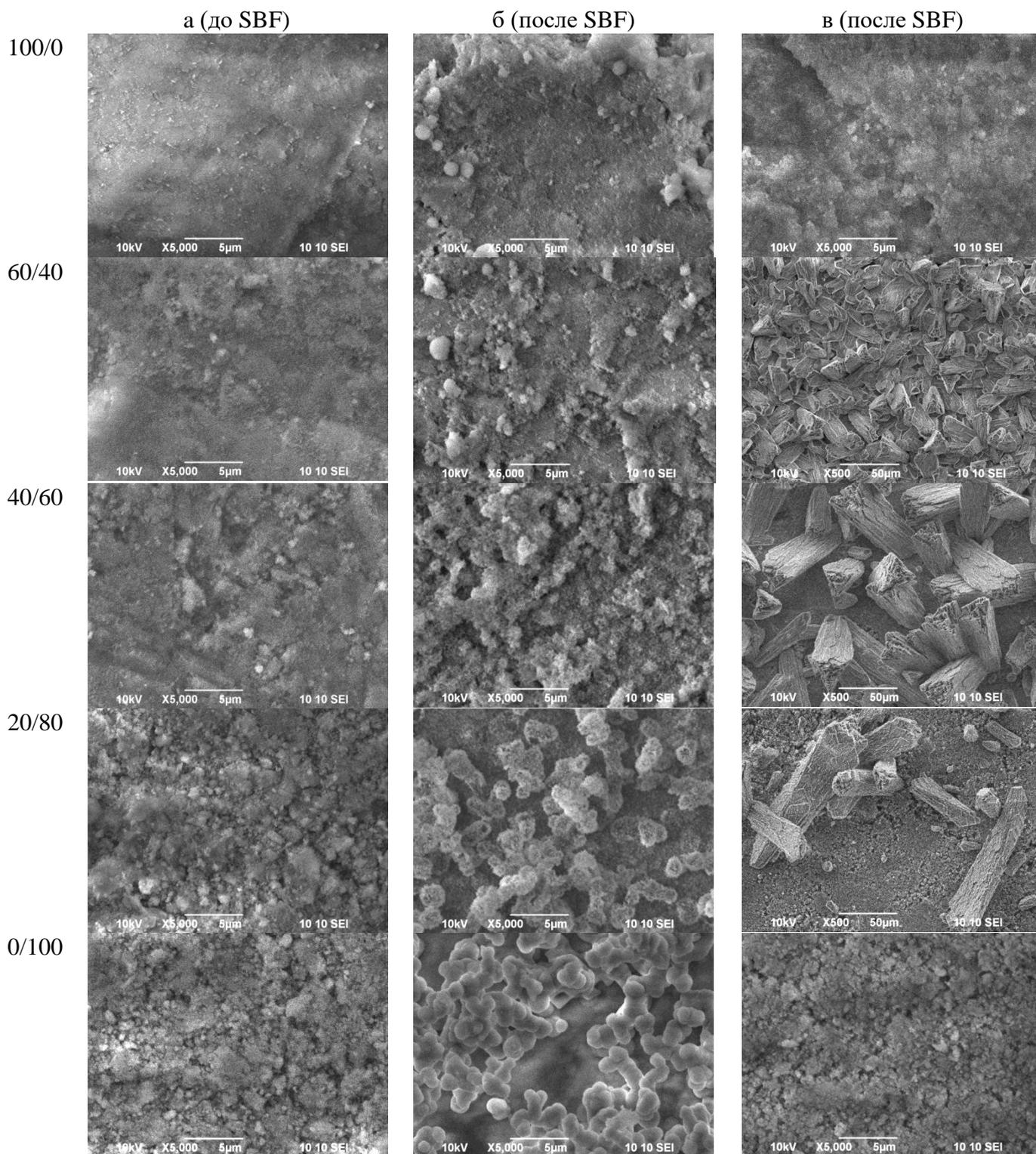


Рис. 1. Микрофотографии поверхности керамик из ГА, ГСК и их композитов до и после выдерживания в SBF в течение 14 дней.

* Обозначения слева указывают на соотношение ГА/ГСК в образцах (в масс.%).

Для верификации фазового состава поверхностного слоя образцов, подвергшихся выдерживанию в SBF, выполнено их исследование методом РФА. Установлено, что дифрактограммы композитных материалов до и после контакта с SBF содержат пики КК (в форме кальцита) и плохоокристаллизованного апатита. При сравнении данных РФА, полученных для исходных керамик и их верхней стороны после выдержки в модельном

растворе (рис. 2а), отмечен рост интенсивности рефлексов апатита относительно пиков КК. Причиной этого является образование слоя фосфата кальция на поверхности таблеток в ходе эксперимента, что установлено методом РЭМ. Противоположные изменения зафиксированы при анализе дифрактограмм, снятых с нижних сторон композитных керамик (рис. 2б). Так, по истечении 14 суток контакта образцов с SBF интенсивность пиков кальцита существенно возрастает, ввиду его образования на поверхности таблеток, обнаруженного при исследовании материалов методом РЭМ.

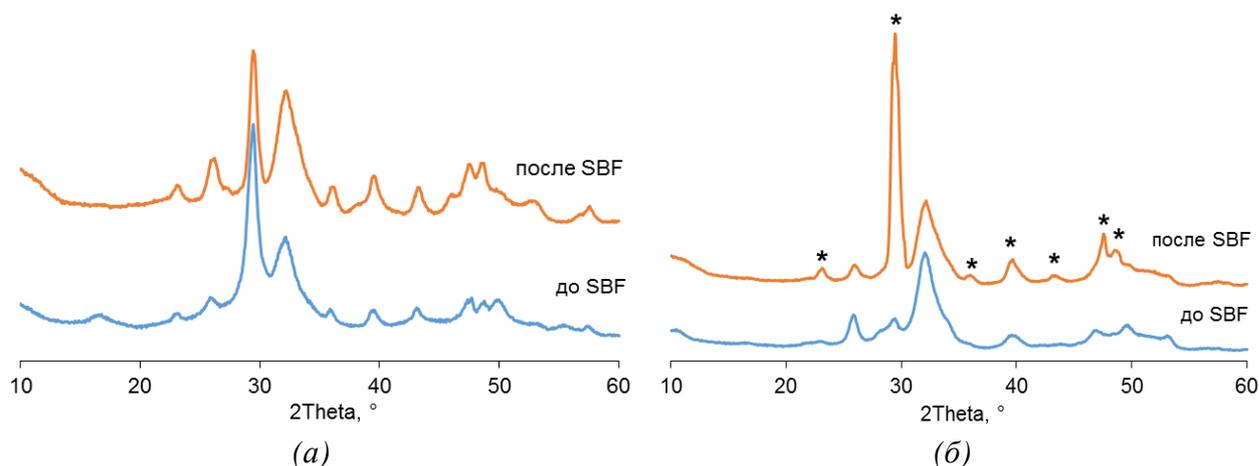


Рис. 2. Дифрактограммы верхней стороны таблетки из композита 20/80 (а) и нижней стороны таблетки из композита 60/40 (б) до и после выдерживания в SBF в течение 14 дней (* – CaCO_3)

Подобные результаты представлены в работах [2, 3]. В них сообщается об образовании одновременно ГА и КК на поверхности материалов, содержащих силикат кальция, при их выдерживании в SBF и предполагается, что причиной этого является осаждение апатита из пересыщенного относительно него прототипа плазмы крови и кристаллизация кальцита, присутствовавшего в исходных образцах в аморфном состоянии.

Таким образом, установлено, что при выдерживании в SBF керамик из синтетических композитов на основе плохоокристаллизованного ГА и ГСК на поверхности, контактировавшей с основным объемом раствора, образуются сферические частицы аморфного фосфата кальция с изоморфно включенными группировками CO_3^{2-} . Плотность данного слоя тем больше, чем выше содержание ГСК в исходных образцах. В условиях ограниченного контакта с SBF на поверхности композитов формируются кристаллы CaCO_3 .

Библиографический список

1. Kokubo T., Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? // *Biomaterials*. 2006. V. 27. P. 2907–2915.
2. Siriphannon P., Kameshima Y., Yasumori A., Okada K., Hayashi S. Formation of hydroxyapatite on CaSiO_3 powders in simulated body fluid // *Journal of the European Ceramic Society*. 2002. V. 22. P. 511–520.
3. Gandolfi M. G., Ciapetti G., Taddei P. [et al.]. Apatite formation on bioactive calcium-silicate cements for dentistry affects surface topography and human marrow stromal cells proliferation // *Dental materials*. 2010. V. 26. P. 974–992.

С.В. Шилько, Т.В. Рябченко, С.И. Романович¹, О.В. Кропотин²

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

¹ООО «Гидромания», г. Минск, Беларусь

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ СИЛИКОНОВОГО ЭЛАСТОМЕРА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ТЕРМОСИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ, ХАРАКТЕРНОМ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ФОРМОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Аннотация. Описаны методики механических испытаний и приведены результаты оценки деградации термоупругих и вязкоупругих свойств силиконового эластомера, используемого при формовании углепластиков, включающие статические испытания при одноосном и стесненном деформировании в температурном интервале 20–180 °С с определением модуля Юнга и объемного модуля упругости; циклические термомеханические испытания при стесненном деформировании с определением комплекса вязкоупругих параметров методом динамического контактного индентирования до и после термосилового воздействия.

Ключевые слова: силиконовый эластомер, деградация механических свойств, циклическое термосиловое воздействие, сжатие, контактное индентирование, модуль упругости.

Введение. В работе описаны результаты аттестации физико-механических свойств силиконового эластомера, используемого при формовании направленно-армированных углепластиков. Эластомерная прокладка из силикона, обеспечивающая равномерное нагружение листов препрега, испытывает достаточно длительное и интенсивное циклическое термосиловое воздействие (ТСВ) в виде контактного давления 0,6 МПа при температуре 125–130 °С в течение 10 часов.

В результате такого воздействия силиконовый эластомер подвергается деструкции с заметной деградацией физико-механических свойств и разрушению, что приводит к снижению качества изделий [1, 2]. По этой причине срок службы эластомерной прокладки ограничен и, исходя из опыта формования композитов на ООО «Гидромания», в среднем составляет 6 циклов прессования.

Для прогнозирования и увеличения долговечности указанной технологической оснастки необходимо изучение деформационно-прочностных свойств силиконового эластомера с оценкой степени их изменения при термосиловом воздействии в лабораторных условиях, имитирующих технологический режим формования углепластиков.

В настоящей работе приведены результаты комплексного экспериментального исследования деформационных свойств силиконового эластомера, включая статические испытания стандартных цилиндрических образцов при одноосном и стесненном сжатии в температурном интервале 20–180 °С с определением модуля Юнга и объемного модуля упругости; циклические термомеханические испытания при стесненном деформировании с определением комплекса вязкоупругих параметров методом динамического контактного индентирования плоских торцевых поверхностей вышеуказанных образцов до и после термосилового воздействия.

1. Статические испытания силиконового эластомера при стесненном деформировании в температурном интервале 20-180 °С.

Определение модулей упругости силиконового эластомера в условиях стесненного деформирования производилось на машине Инстрон 5567, оборудованной термокамерой, на стандартных цилиндрических образцах диаметром 30 мм и высотой 45 мм при температуре 20, 100, 125 и 180 °С.

Стесненное деформирование эластомера, реализованное в эксперименте при помощи специального приспособления плунжерного типа (рис. 1), является имитацией его термомеханического нагружения при формовании углепластиков, в свою очередь, приближающегося к условиям объемного сжатия. Перед началом нагрева устранялись зазоры в силовой цепи «нагружающее устройство – опорные плиты – образец». Время прогрева определялось по моменту стабилизации усилия сжатия F и составляло в среднем 30 минут, после чего производилась разгрузка от термонапряжений и выполнялось испытание на сжатие с помощью нагружающего устройства машины.

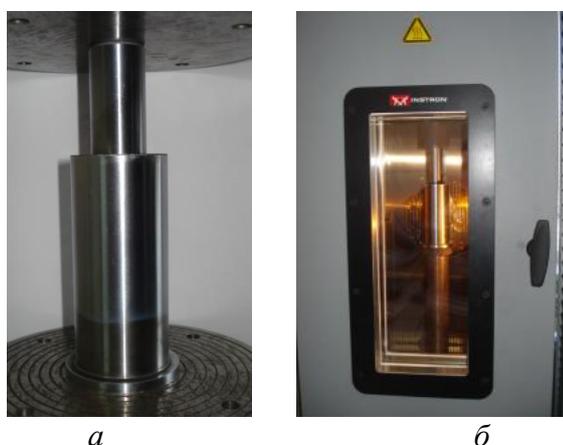


Рис. 1. Размещение образцов эластомера для испытаний при стесненном деформировании

Зависимости усилия от перемещения $F(\Delta)$ и напряжения от деформации $\sigma(\varepsilon)$, полученные в условиях стесненного деформирования при различной температуре, представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

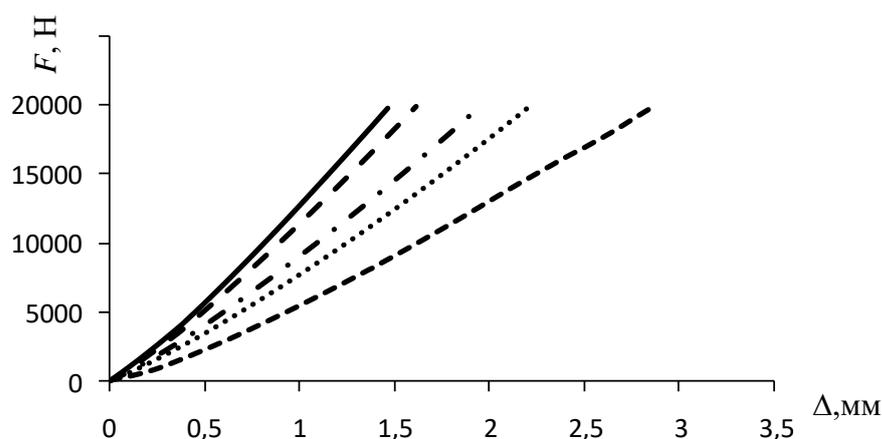


Рис. 2. Зависимости $F(\Delta)$ при стесненном деформировании при температуре 20 °С (сплошная линия), 50 °С (пунктирная линия), 100 °С (штрих-пунктирная линия), 125 °С (точки) и 180 °С (пунктир)

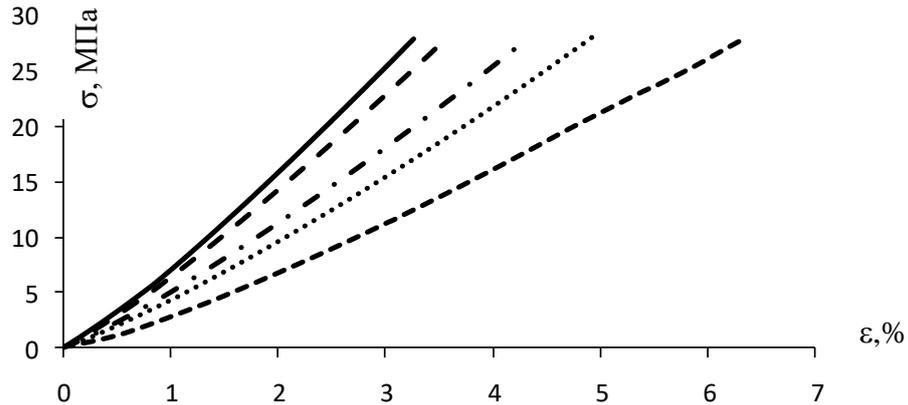


Рис. 3. Зависимости $\sigma(\epsilon)$ при стесненном деформировании при температуре 20 °С (сплошная линия), 50 °С (пунктирная линия), 100 °С (штрих-пунктирная линия), 125 °С (точки) и 180 °С (пунктир)

По зависимостям $\sigma(\epsilon)$ определялся объемный модуль упругости при сжатии. Как видно из рис. 2 и 3, зависимости $F(\Delta)$ и $\sigma(\epsilon)$, полученные в условиях стесненного деформирования в интервале 20–180 °С, являются нелинейными. Судя по наклону кривых, объемный модуль упругости при сжатии заметно снижается с ростом температуры.

2. Одноосное сжатие. При испытании на одноосное сжатие (рис. 4а) использовались образцы, аналогичные по форме и размерам образцам для испытаний в условиях стесненного деформирования, без смазывания торцевых поверхностей и со смазкой (Литол-24) для уменьшения контактного трения. Установлено, что смазывание приближает условия испытания к одноосному сжатию, снижая погрешность определения модуля упругости эластомера примерно на 5 %. Размещение образцов в термокамере для определения механических характеристик при повышенной температуре показано на рис. 4б.

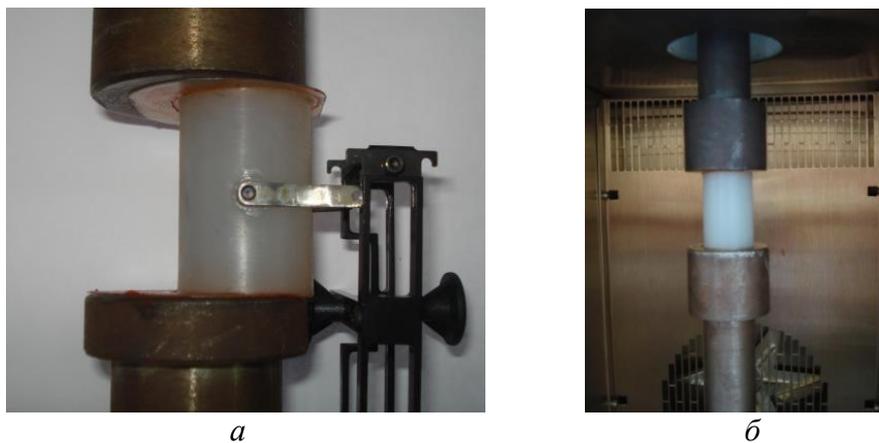


Рис. 4. Установка экстензометра на образце (а) и размещение образца в термокамере (б)

Результаты испытаний на одноосное сжатие эластомера при $T = 125$ °С без смазки показаны на рис. 5. В отличие от стесненного деформирования, полученные диаграммы являются линейными. В таблице 1 приведены значения модуля Юнга E , определенные в условиях одноосного сжатия в отсутствие смазки на 3-х образцах при температуре 20, 100, 125 и 180 °С. Как отмечено выше, модули упругости являются несколько завышенными из-за высокого коэффициента трения в контакте образца с опорными плитами.

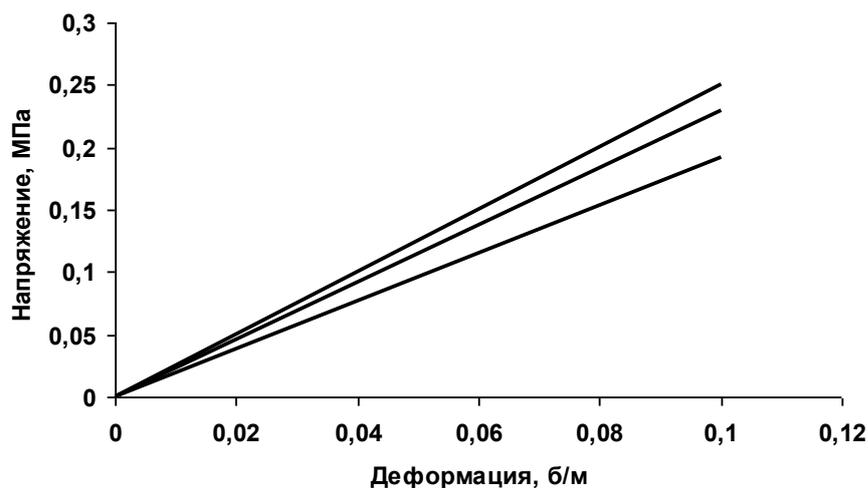


Рис. 5. Зависимости «напряжение – деформация» при сжатии эластомера при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 1

Модуль Юнга эластомера при одноосном сжатии в зависимости от температуры

	Модуль Юнга E , МПа				
	20 °С*	20 °С	100 °С	125 °С	180 °С
Образец № 1	1,75	1,67	1,85	1,92	2,00
Образец № 2	1,75	2,05	2,38	2,51	2,65
Образец № 3	1,52	1,97	2,24	2,30	2,40
Среднее значение	1,67	1,90	2,16	2,24	2,35
Относительная погрешность, %	6,48	8,62	10,40	10,88	11,39
Контрольный образец № 4	–	1,57	1,875	1,88	1,90

* смазывание торцевых поверхностей образцов.

Смазка, снижая трение и обеспечивая условия одноосного сжатия, приводит к уменьшению модуля E (за исключением образца № 1). Вместе с тем, при избыточном количестве смазки формируется слишком толстый смазочный слой с отличными от силикона свойствами, что вызывает дополнительное уменьшение измеренного значения модуля Юнга.

Можно заметить тенденцию повышения модуля упругости с увеличением температуры, что не типично для полимеров и эластомеров. Это, вероятно, обусловлено деструкцией или образованием дополнительных (поперечных) связей в процессе сжатия силиконового эластомера при повышенной температуре [2].

3. Циклические испытания силиконового эластомера при объемном сжатии.

Определение параметров деструкции силиконового эластомера в условиях повторяющегося и достаточно длительного (10 часов) термосилового воздействия (ТСВ) производилось посредством 6-ти последовательных циклов выдержки одного цилиндрического образца диаметром 30 мм и высотой 45 мм, размещенного в специальном приспособлении в термостате СНОЛ-3,9.3,9.3,6/3,5-2Н, в течение 10 часов при температуре 125-130 °С, как показано на рис. 6. С учетом того, что при формовании углепластиков оптимальное давление составляет 0,6 МПа, в приспособление последовательно с образцом эластомера устанавливались упругие компенсаторы в виде резиновой прокладки и пружины.



а



б

Рис. 6. Размещение образцов силиконового эластомера в приспособлении с резиновым компенсатором (а) и тарировка жесткости пружинного компенсатора (б)

Использование резиновой прокладки с подходящими упругими свойствами оказалось неудовлетворительным из-за низкой теплостойкости резины (после первого цикла термосилового нагружения наблюдались значительные остаточные деформации, после 2-го цикла – заметные повреждения, после 3-го цикла разрушение и продавливание прокладки). Результаты измерения размеров между установленными маркерами даны в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений для 6-ти последовательных циклов ТСВ

№ цикла	Расстояние внутреннее, мм		Перемещение, мм	Расстояние наружное, мм		Перемещение, мм
	до	после		до	после	
Резиновый компенсатор						
1	26,60	28,85	2,25	–	–	–
2	26,48	28,85	2,37	–	–	–
3	27,23	29,47	2,24	45,15	46,92	1,77
4	26,85	28,69	1,84	45,00	46,76	1,76
5	36,59	39,23	2,64	54,68	57,24	2,56
6	36,70	39,33	2,63	54,75	57,30	2,55
Пружинный компенсатор						
1	36,32	40,75	4,43	54,11	57,87	3,76
2	36,59	40,01	3,42	54,15	57,55	3,40
3	36,40	39,87	3,47	54,40	57,70	3,30
4	36,53	40,00	3,47	54,45	57,90	3,45
5	36,42	40,01	3,59	54,37	57,60	3,23
6	36,65	39,98	3,33	54,50	57,87	3,37

Видно, что величина упругой компенсации при использовании резиновой прокладки изменяется, что вносит методическую погрешность в задание регламентированного давления 0,6 МПа. Для получения стабильного давления в дальнейшем проводились испытания с пружинным компенсатором, жесткость которого подбиралась изменением эффективной длины пружины путем подмотки тонкой стальной проволоки между витками. В качестве средства тарировки использовалась машина Инстрон 5567. Результаты измерения перемещений в этом случае также представлены в таблице 2. Видно, что величина упругой компенсации при использовании стальной пружины достаточно стабильна.

4. Оценка деградации механических свойств эластомера методом динамического контактного индентирования до и после циклического термосилового воздействия

Было установлено, что после 6-го цикла ТСВ, действительно, имеет место изменение цвета (потемнение) силиконового эластомера, хотя и без видимых признаков поверхностного или объемного разрушения. Для количественной оценки деградационных изменений структуры и механических свойств эластомера на этой стадии применялся метод динамического контактного индентирования, описанный, в частности, в работах [3, 4]. Были сопоставлены значения деформационных параметров, измеренные с помощью прибора ИПМ-1К (ИПФ НАН Беларуси) при индентировании плоских торцевых поверхностей исследуемых образцов в 10-ти точках до и после ТСВ. Из таблицы 3 видно, что твердость эластомера по Шору после 6-ти последовательных циклов ТСВ уменьшается с 38,50 ед. до 32,34 ед., модуль упругости уменьшается от 1,61 МПа до 1,23 МПа, а энергия вязкого деформирования увеличивается от 0,21 мДж до 0,25 мДж. Таким образом, указанные характеристики могут служить показателями деградации свойств эластомера.

Таблица 3

Характеристики, отражающие деградацию физико-механических свойств эластомера

Параметр	до ТСВ					после ТСВ				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Твердость по Шору А, ед	38,5	38,0	39,0	38,4	38,6	31,4	32,4	32,5	32,6	32,8
Среднее значение	38,50					32,34				
Модуль упругости, МПа	1,61	1,58	1,64	1,60	1,62	1,18	1,23	1,23	1,24	1,25
Среднее	1,61					1,23				
Энергия вязкого деформирования, мДж	0,22	0,19	0,20	0,20	0,22	0,25	0,26	0,24	0,23	0,26
Среднее значение	0,21					0,25				

Заключение. Проведенные статические и циклические термосиловые испытания стандартных образцов силиконового эластомера позволяют определить его пригодность для изготовления формообразующих прокладок, применяемых в производстве изделий из направленно-армированных конструкционных углепластиков.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Т18КОРГ-2018 «Моделирование и получение сверхпрочных волоконно-армированных и слоистых композитов с модулированной структурой и оптимальным градиентом свойств межфазного слоя»).

Библиографический список

1. Биткин В. Е. и др. Апробирование технологического комплекса изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 16, № 1 (5). 2014. С. 1320–1327.
2. Саракуз В. Н. Теоретическое обоснование и разработка промышленной технологии центробежного формования эластомеров // Автореф. дис ... д-ра техн. наук. СПб., 1994. 40 с.
3. Чернятин А. С., Разумовский И. А. Метод индентирования как способ оценки нагруженности и деградации механических характеристик материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 40–48.
4. Рудницкий В. А., Крень А. П., Шилько С. В. Оценка свойств эластомерных материалов при постоянной скорости индентирования // Трение и износ. 2001. Т. 22, № 5. С. 502–508.

Е.В. Шлякова, И.В. Кунаев

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ СТАЛИ 45X22H4M3

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования воздействия лазерной термической обработки на стойкость к межкристаллитной коррозии стали 45X22H4M3. По итогам экспериментов определены оптимальные режимы лазерного термического воздействия, которые обеспечивают эффективную защиту от коррозии.

Ключевые слова: коррозия металлов, межкристаллитная коррозия, скорость коррозии, лазерная термообработка.

Межкристаллитная коррозия проявляется разрушением металла по границам зерен и опасна внутренними изменениями в структуре металла, в результате которых быстро теряется прочность и пластичность, металл легко разрушается [1]. Между зёрнами металла образуются и скапливаются рыхлые продукты коррозии. Скорость протекания процесса коррозии определяется электрохимической способностью металла. Процесс окисления металла усиливается по мере снижения содержания хрома на границах зерен. Присутствие в сталях бора, кремния, фосфора ускоряет межкристаллитную коррозию [2].

Химические методы определения скорости межкристаллитной коррозии сталей основаны на кипячении металлических образцов в испытательных средах в течение достаточно большого промежутка времени. Одним из часто используемых является метод, предусматривающий кипячение образцов в течение 8 часов в испытательном растворе, который содержит 50 г сульфата меди (II), 250 мл раствора серной кислоты плотностью $1,835 \text{ г/см}^3$, 1000 мл воды, медную стружку [3]. Далее проводится потенциометрическое измерение скорости коррозии образцов стали при потенциале +0,35 В. О склонности к межкристаллитной коррозии свидетельствует ряд критериев: потеря массы исследуемого образца, поперечные трещины на поверхности образца, согнутого после испытаний на угол 90° , распространение коррозионного разрушения на глубину более 30 мкм, определяемое оптическим микроскопом.

Исследовалось влияние лазерной термической обработки на скорость межкристаллитной коррозии стали 45X22H4M3. В результате действия лазерного излучения на поверхности стали создается зона термического влияния, структурные изменения в которой обусловлены измельчением зерен металла, возникают зоны закалки, что в целом приводит к гомогенизации поверхностных слоев и, следовательно, к повышению коррозионной стойкости [4].

В эксперименте использовались 30 образцов стали 45X22H4M3 площадью 4 см^2 . Поверхность образцов подготовлена к коррозионным испытаниям по стандартным методикам. В эксперименте использовалась установка ЛТУ-2М. Импульс лазерного излучения имел длительность $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, коэффициент перекрытия 50%. 25 образцов облучены импульсами при различных значениях плотности мощности.

Скорость коррозии вычислена с использованием весового метода [5]. Результаты эксперимента показаны в таблице 1, на рис. 1.

Наименьшее значение скорости коррозии показано образцами, на которые воздействовало лазерное излучение плотностью мощности $3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$, скорость коррозии уменьшается в 3,67 раза. Относительное повышение коррозионной стойкости (Z) стали

45X22H4M3 в результате лазерной обработки достигает 72,73 %.

Таблица 1

Скорость коррозии образцов стали 45X22H4M3 после лазерной обработки

№п/п	q, Вт/см ²	Δm _{ср.} , Г	ρ, г/см ² · час	Z, %
1	-	0,0210	0,00088	-
2	1 · 10 ⁴	0,0094	0,00039	55,68
3	3 · 10 ⁴	0,0057	0,00024	72,73
4	4 · 10 ⁴	0,0060	0,00025	71,60
5	6 · 10 ⁴	0,0065	0,00028	68,18
6	8 · 10 ⁴	0,0074	0,00031	64,77

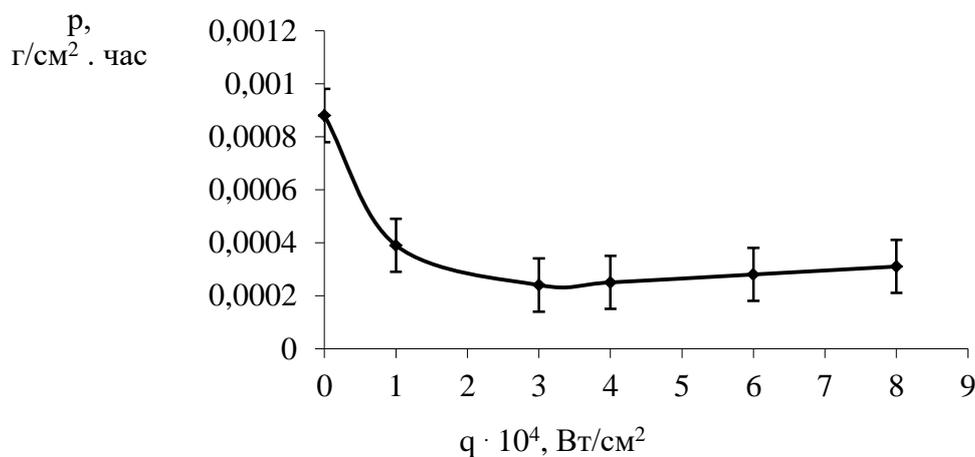


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии стали 45X22H4M3 от плотности мощности лазерного излучения

Микроструктура облученного образца стали 45X22H4M3 представлена на рис. 2.

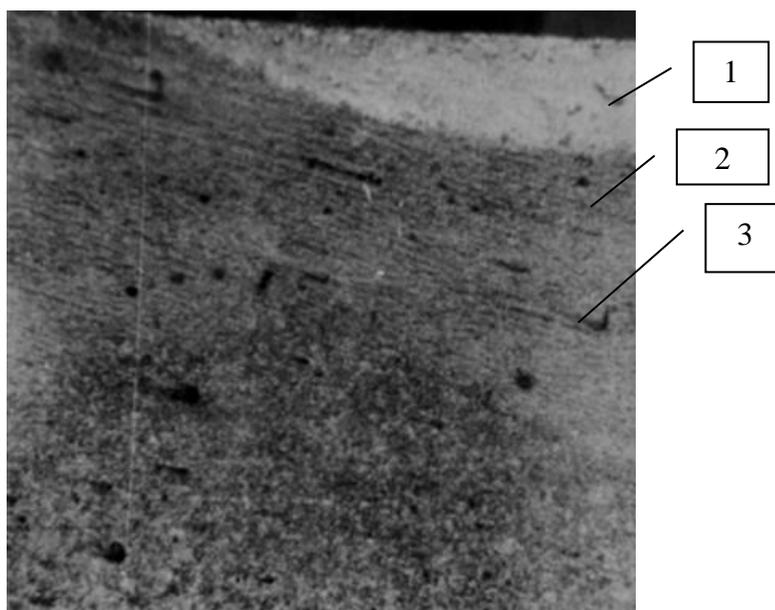


Рис. 2. Микроструктура поверхности стали 45X22H4M3 после лазерной термической обработки (100^x): 1 – «белый слой», 2 – переходный слой, 3 – основной слой

Было исследовано воздействие высоких температур на склонность к межкристаллитной коррозии образцов стали 45X22H4M3 до и после лазерного облучения. Термическая обработка в муфельной печи при температуре 700 °С проводилась на облученных образцах в течение 2, 4 и 8 часов. После удаления продуктов обжига скорость коррозии была установлена электрохимическим методом через построение потенциостатических поляризационных кривых (рис. 3).

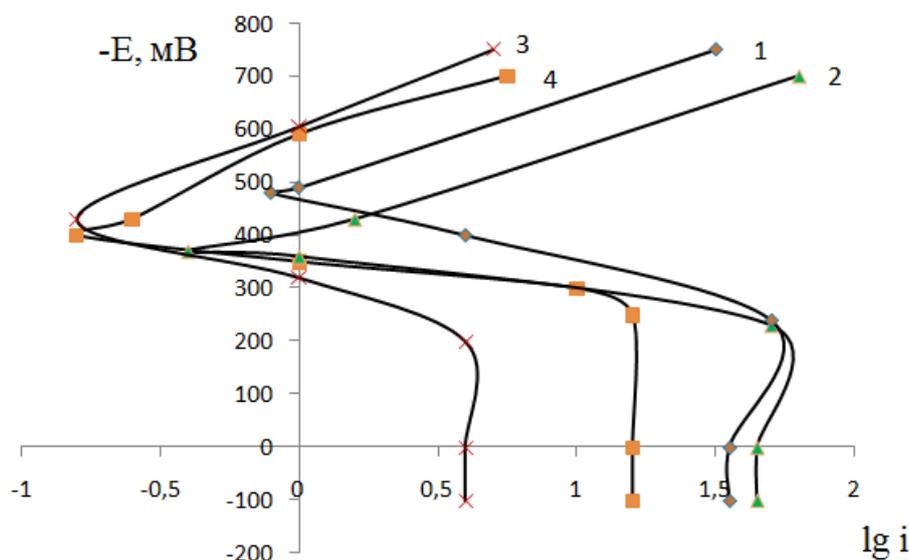


Рис.3. Поляризационные кривые облученных образцов стали 45X22H4M3:
 1 – без термообработки, 2 – термообработка 2 часа,
 3 – термообработка 4 часа, 4 – термообработка 8 часов

Наибольшая скорость анодной реакции зафиксирована в результате двухчасового обжига, что свидетельствует об ускоренном развитии коррозионного процесса. Нарушается структура поверхностного облученного слоя, и эффект защиты металла, вызванный воздействием лазерного облучения, исчезает. На образцах, обожженных в течение 4 и 8 часов, значения токов анодного процесса меньше, чем на необработанном образце.

В результате четырехчасовой термической обработки в поверхностном слое исследуемых стальных образцов образуется достаточно плотная оксидная пленка, обладающая хорошей адгезией с основой и защищающая металл от окислительного процесса. Обжиг в течение 8 часов приводит к увеличению анодного тока в сравнении с токами на образцах после термической обработки в течение 4 часов. Однако его величина не достигает анодного тока, зафиксированного на поверхности образцов до термической обработки. Таким образом, образцы стали 45X22H4M3 после лазерной термообработки с плотностью мощности излучения $3 \cdot 10^4$ Вт/см² после обжига при температуре 700°С демонстрируют наибольшую стойкость к межкристаллитной коррозии.

Библиографический список

1. Шлякова Е. В., Кунаев И. В. Исследование коррозионной стойкости жаропрочных сталей//Национальные приоритеты России. Серия 1. Наука и военная безопасность. 2016. № 3. С. 99–101.
2. Соловьев А. А., Шлякова Е. В. Исследование влияния лазерной термообработки на стойкость к коррозии деталей двигателя внутреннего сгорания // Вестник академии военных наук. М: Филиал Воениздата МО РФ. 2010. №1 (30). С. 259–264.

3. Семенова И. В. Коррозия и защита от коррозии/ И. В.Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов / Под ред. И. В. Семеновой. М.: Физматлит, 2002. 335 с.

4. Мозговой И. В., Шлякова Е. В., Соловьев А. А. Исследование влияния лазерного облучения на стойкость к электрохимической коррозии материала гильз цилиндров двигателя внутреннего сгорания//Омский научный вестник.. 2008. № 2 (68). С. 22–25.

5. Соловьев А. А., Шлякова Е. В. Лазерная обработка деталей двигателей автомобильной техники//69-я Международная научно-практ. конф. ассоциации автомобильных инженеров. Омск: СибАДИ. 2010. С. 87–93.

УДК 644.36

М.В. Андреева, А.А. Максименко

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА НАДЁЖНОСТЬ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Аннотация. В работе излагаются результаты исследования партии светодиодных излучающих элементов на воздействие повышенной температурой окружающей среды и повышенной электрической нагрузки. Определены критические значения температуры окружающей среды и значения прямого тока светодиодного излучающего элемента. Установлено, что критической температурой окружающей среды для светодиодного излучающего элемента является значение $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ при значении рабочего прямого тока 10 mA , а критическое значение прямого тока для светодиодного излучающего элемента является 21 mA при температуре окружающей среды $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: светодиодный излучающий элемент, термоэлектрические испытания, светодиодная лампа общего применения.

Светодиодный излучающий элемент (СИЭ) применяется в светодиодных лампах общего применения, содержит протяжённую подложку длиной 38 mm , на которой размещено 28 шт. излучающих кристаллов, контактные выводы для присоединения к тоководам лампы и люминофорную композицию над излучающими кристаллами. Габаритный чертёж СИЭ приведен на рис. 1. Макеты СИЭ изготовлены в ТУСУР по [1].

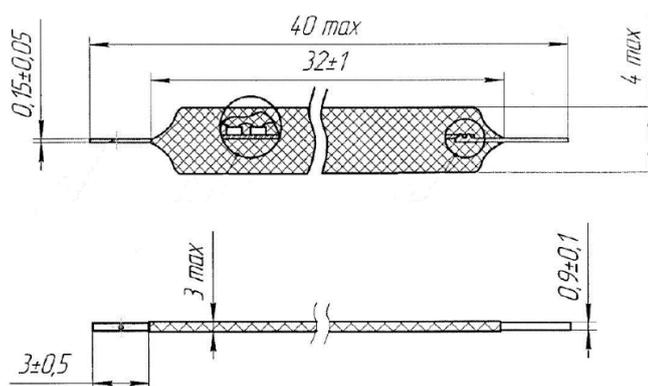


Рис. 1. Габаритный чертёж СИЭ

Для светодиодов и светодиодных излучающих элементов известны следующие механизмы деградации [2]: изменение сопротивления p -контактной области структуры полупроводника в связи с процессами интердиффузии и межфазными химическими реакциями; релаксация механических напряжений в структуре полупроводника; перераспределение профиля водорода в структуре полупроводника; образование вакансий азота вследствие разрыва связей $Ga-N$ в активной области кристалла; миграция индия и магния в активной области полупроводника; эффект стягивания тока под омическими контактами кристалла; распад активатора люминофора (Ce) при температурах выше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Целью данной работы является определение предельных значений термоэлектрической нагрузки на светодиодный излучающий элемент.

Методика эксперимента, согласно [3], заключается в проведении испытаний на двух партиях идентичных макетов СИЭ. Одну партию нагревали во включенном режиме (при рабочем токе 10 мА) в печи и измеряли значения напряжений с шагом 5 °С от температуры окружающей среды 25 °С до 205 °С. Вторую партию СИЭ подвергли испытаниям повышенной электрической нагрузкой. С шагом 1 мА на каждом СИЭ измерены значения прямого напряжения и светового потока в диапазоне от 10 мА до 21 мА.

На рис. 2 приведена зависимость прямого напряжения от температуры, после 205 °С зафиксированы катастрофические отказы на 100% макетов СИЭ.

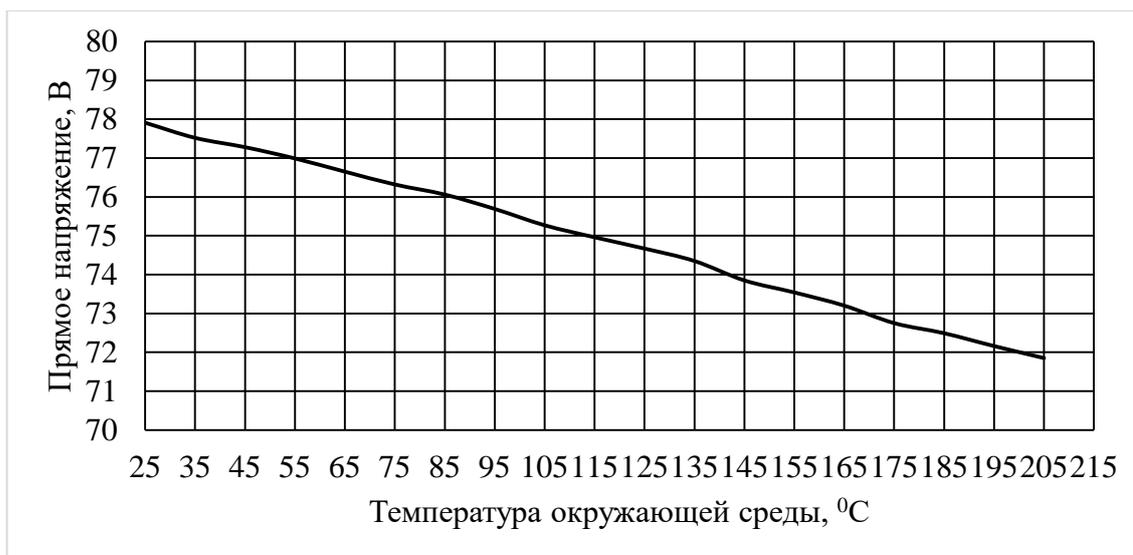


Рис. 2. Зависимость прямого напряжения от температуры для макетов СИЭ (усреднённые значения для партии из 10 шт.)

На рис. 3 приведена зависимость светового потока от прямого тока макетов СИЭ.

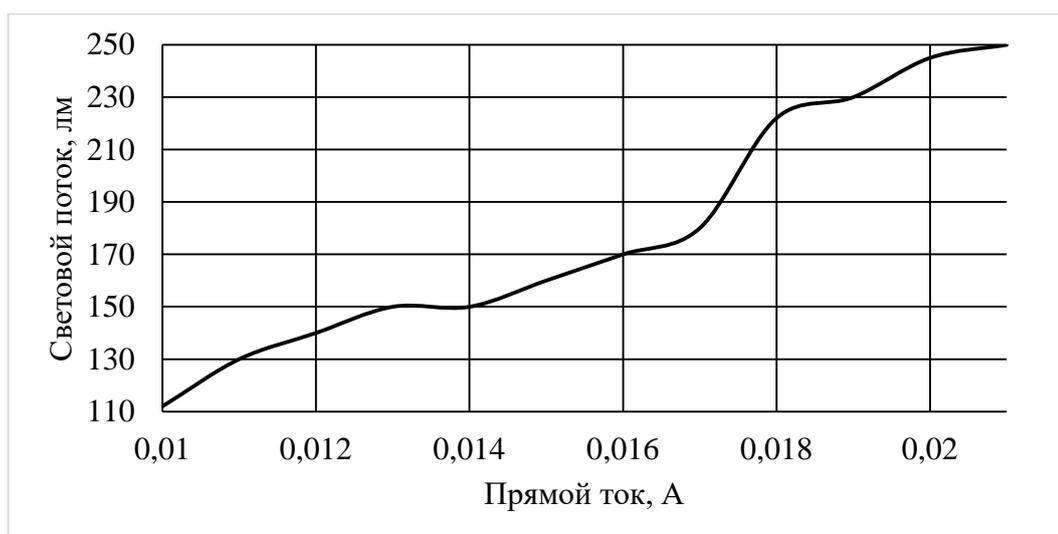


Рис. 3. Зависимость светового потока от прямого тока макетов СИЭ (усреднённые значения для партии из 10 шт.)

Из 10 шт. катастрофические отказы произошли при значении прямого тока 16 мА у трёх макетов СИЭ и при 21 мА у оставшихся семи макетов СИЭ.

Выводы:

Зависимость прямого напряжения от температуры для макетов СИЭ носит линейный характер, критической температурой является значение 205 °С. В диапазоне температур от 25 °С до 205 °С значение прямого напряжения снизилось на 6,06 В. Соответственно при последовательном соединении 28 кристаллов на каждом кристалле значение прямого напряжения снизилось на 0,21 В, что соответствует техническому описанию на светодиодный кристалл.

Зависимость светового потока от прямого тока носит нелинейный характер, отклонения от типовой зависимости для нитридных светодиодов можно объяснить конструкцией СИЭ. Так как под одной люминофорной композицией расположены 28 кристаллов, возможно, что зависимость оптической мощности от прямого тока кристаллов в партии неоднородна.

И в первом, и во втором варианте катастрофические отказы макетов СИЭ можно объяснить локальным перегревом контактных соединений кристаллов. Анализ вышедших из строя макетов показал, что ток через СИЭ не протекает, соответственно, возможной причиной отказа является обрыв контактной проволоки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках проекта RFMEFI57717X0266.

Библиографический список

1. Пат. 172287 Российская Федерация, МПК F 21 К 9/00. Светодиодная лента для лампы. / Вилицов А. А., Олисовец А. Ю., Ряполова Ю. В., Солдаткин В. С., Старосек Д. Г., Туев В. И. №2016122381; заявл. 06.06.16; опубл. 04.07.17, Бюл. № 19.
2. Soldatkin V. S., Tuev V. I., Yulaeva Y. V. [et al.] Operation Characteristics of LED Filament Bulbs Pages // Proc. of the 14th Intern. Sc.-Tech. Conf. APEIE 2018, Oct. 2–6, 2018. Novosibirsk, 2018. Vol. 1. P. 376–379. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545675.
3. Солдаткин В. С., Афонин К. Н., Каменкова В. С. [и др.]. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 3. С. 148–151.

УДК 537.8:621.318:519.63

Е.Г. Андреева, А.А. Татевосян

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Аннотация. Статья посвящена процессу построения векторных моделей электромагнитных процессов тихоходных магнитоэлектрических машин (синхронных генераторов с постоянными магнитами). Получены: квазистационарная (квазипеременная) модель магнитного поля электрической машины относительно векторного магнитного потенциала, магнитостатическая векторная модель, квазистационарная векторная модель электрической машины с электромагнитами и постоянными магнитами, переменная

векторная модель быстротекущих электромагнитных процессов на основе уравнений Максвелла. Показана роль калибровок Кулона и Лоренца.

Ключевые слова: векторная модель, электромагнитный процесс, переменное электромагнитное поле, квазистационарное магнитное поле, векторный магнитный потенциал (вектор-потенциал), силовые характеристики поля.

В настоящее время используется системный подход к анализу исследовательских, проектно-конструкторских, технических проблем при разработке смешанных или связанных (мультифизических) моделей устройств и систем, объединяющих узлы и подсистемы различной физической природы. К ним относятся и высокотехнологический комплекс на основе тихоходных магнитоэлектрических машин (генераторов) (МЭМ, МЭГ). Исследуются электромагнитные процессы в тихоходном синхронном магнитоэлектрическом генераторе с постоянными магнитами (СГПМ), работающем в составе ветроэнергетического комплекса.

Известно, что именно переменное результирующее магнитное поле индуктора и якоря электрического генератора, описываемое системой уравнений Максвелла [1–3], индуцирует в обмотке якоря ЭДС (напряжение) по закону электромагнитной индукции Фарадея. Зная распределение магнитного поля в электрической машине, можно вычислить его дифференциальные и интегральные параметры и силовые характеристики как в статических, так и в динамических режимах ее работы. А это в свою очередь позволяет выйти на энергетические, технико-экономические и проектно-конструкторские параметры и характеристики генератора МЭГ [4].

Использование компьютерной техники высокой производительности (с высоким быстродействием и большим объемом памяти) позволяет решать перечисленные проблемы на высоком теоретическом и математическом уровне [1, 2, 5, 6]. Математические модели непрерывных в пространстве и во времени электромагнитных полей в электрических машинах основаны на системе дифференциальных уравнений Максвелла [1–4]. Решение дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих электромагнитные процессы в электрических и электротехнических устройствах, проводится или аналитическими методами (упрощенные, тестовые математические 1D и 2D модели с максимальными допущениями) [7, 8], или численными проекционно-сеточными методами [5], в основном методом конечных разностей (МКР) [9] и методом конечных элементов (МКЭ) [10, 11]. Это 2D и 3D математические модели стационарных, квазипеременных (квазистационарных) и электродинамических электромагнитных процессов с минимальными ограничениями и допущениями. Именно численные методы лежат в основе многих современных пакетов прикладных программ ELCUT, COMSOL, ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell [12] и др. Метод МКР, как правило, применяется для дискретизации конечными разностями временной области решения дифференциальных уравнений динамических процессов. Метод МКЭ используется для дискретизации в пространственной области модели электромагнитных процессов в электрических машинах.

Векторные модели электромагнитных процессов тихоходных МЭГ

Электромагнитные или полевые процессы, протекающие в электрических и электротехнических устройствах, электрических машинах, описываются двухмерными (2D) и трехмерными (3D) векторными моделями на основе дифференциальных уравнений Максвелла в частных производных (уравнения математической физики). Различают стационарные (не меняющиеся во времени) и нестационарные (переменные, меняющиеся во времени). Стационарные процессы описываются эллиптическими уравнениями, а нестационарные – уравнениями параболического и гиперболического типа. Общая модель электромагнитных процессов электротехнических устройств (ЭУ) относительно силовых

характеристик электромагнитного поля приведена в [1–4]. Силовые характеристики – это \bar{E} и \bar{H} – векторы напряженности электрического и магнитного полей; \bar{D} и \bar{B} – векторы электрической и магнитной индукции. Уравнения Максвелла дополняются уравнениями, связывающими основные силовые характеристики поля с их потенциалами: $\bar{B} = \text{rot } \bar{A}$, $\bar{H} = -\text{grad } \varphi_{эм}$, $\bar{E} = -\text{grad } \varphi$, где \bar{A} – векторный магнитный потенциал (вектор-потенциал), $\varphi_{эм}$ – скалярный магнитный потенциал; φ – скалярный электрический потенциал.

Квазистационарная или квазиперемнная векторная модель электродинамических процессов тихоходных МЭГ

Систему уравнений Максвелла можно преобразовать относительно векторного магнитного потенциала \bar{A} , учитывая, что $\bar{B} = \text{rot } \bar{A}$, из первого уравнения системы или закона полного тока

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{J}_{cm} + \bar{J}_{np} + \bar{J}_{cm}, \quad (1)$$

где \bar{J}_{cm} – вектор плотности сторонних токов или токов обмотки ЭУ; $\bar{J}_{np} = \gamma(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B})$ – вектор плотности токов проводимости, вызываемых в проводящей среде изменением электромагнитного поля во времени и движением в поле этой среды со скоростью \bar{v} (вихревые токи или токи Фуко в ферромагнитном магнитопроводе электрической машины), γ – удельная электрическая проводимость; $\bar{J}_{cm} = \partial \bar{D} / \partial t$ – вектор плотности тока электрического смещения. Поскольку $\bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H}$, где μ – относительная магнитная проницаемость материала, а μ_0 – магнитная постоянная, то для нелинейной проводящей среды уравнение (1) можно записать [6] для вектора магнитной индукции

$$\frac{1}{\mu \mu_0} \text{rot } \bar{B} + \text{grad} \left(\frac{1}{\mu \mu_0} \right) \times \bar{B} = \bar{J}_{cm} + \bar{J}_{np} + \bar{J}_{cm}, \quad (2)$$

тогда для векторного магнитного потенциала уравнение (2) при подстановке $\bar{B} = \text{rot } \bar{A}$ примет вид

$$\frac{1}{\mu \mu_0} \text{rot } \text{rot } \bar{A} + \text{grad} \left(\frac{1}{\mu \mu_0} \right) \times \text{rot } \bar{A} = \frac{1}{\mu \mu_0} (\text{grad } \text{div } \bar{A} - \nabla^2 \bar{A}) + \text{grad} \left(\frac{1}{\mu \mu_0} \right) \times \text{rot } \bar{A} = \bar{J}_{cm} + \bar{J}_{np} + \bar{J}_{cm}.$$

В случае квазистационарности для уравнений Максвелла переменного электромагнитного поля ЭУ (МЭГ) относительно векторного магнитного потенциала можно принять калибровочное условие $\text{div } \bar{A} = 0$ (калибровка Кулона). По И. Е. Тамму – «переменные токи могут удовлетворять условиям квазистационарности лишь в том случае, если, подобно токам постоянным, они будут замкнутыми и будут обладать одинаковой силой во всех сечениях неразветвленных участков цепи» [1, с. 289]. Условие непрерывности, замкнутости токов для системы Максвелловых уравнений $\text{div } \bar{J} = \text{div } \bar{J}_{cm} + \text{div } \bar{J}_{np} + \text{div } \bar{J}_{cm} = 0$. В физико-математических моделях электрических машин по первому закону Кирхгофа $\text{div } \bar{J}_{cm} = 0$. Для достаточно медленно меняющихся полей и токов, ими создаваемых (промышленной частоты, для тихоходных МЭГ), токами смещения пренебрегают $\bar{J}_{cm} = \partial \bar{D} / \partial t = 0$, и можно принять $\text{div } \bar{J}_{cm} = 0$, и, следовательно, токи проводимости будут замкнутыми $\text{div } \bar{J} = \text{div } \bar{J}_{np} = 0$.

При принятой калибровке уравнение (1) относительно вектор-потенциала \bar{A} примет вид

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} - \text{grad} \left(\frac{1}{\mu \mu_0} \right) \times \text{rot } \bar{A} = -\mu_0 \bar{J}_{cm} - \mu_0 \gamma (\bar{E} + \bar{v} \times \text{rot } \bar{A}).$$

Поскольку $rot \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial t = -rot \partial \bar{A} / \partial t$ («операция взятия ротора и дифференцирование во времени не зависят друг от друга и потому взаимно переместимы» и «если равны роторы от двух функций, то сами функции равны с точностью до градиента от некоторой скалярной функции» [3, с. 160]), то $\bar{E} = -\partial \bar{A} / \partial t - grad \phi$. Переменное электрическое поле возбуждается не только свободными электрическими зарядами, но и изменением во времени магнитного поля. Для квазистационарных полей и токов принято условие $div \bar{J} = 0$: в области моделирования электрической машины нет стоков и истоков, где накапливаются электрические заряды, и, следовательно, электрическое поле создается только изменением во времени магнитного поля, и $\bar{E} = -\partial \bar{A} / \partial t$.

Таким образом, введение условия квазистационарности для переменных полей и токов в ЭУ приводит к упрощению Максвелловых уравнений и дает возможность описать электромагнитное поле только с помощью векторного магнитного потенциала, т.е.

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} - grad \left(\frac{1}{\mu \mu_0} \right) \times rot \bar{A} = -\mu_0 \bar{J}_{cm} - \mu_0 \gamma \left(-\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \bar{v} \times rot \bar{A} \right). \quad (3)$$

Для линейных и изотропных сред моделирования ($\mu = const$) уравнение (3) примет вид для любой системы пространственных трехмерных координат (декартовой, цилиндрической, сферической):

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} = -\mu_0 \bar{J}_{cm} - \mu_0 \gamma \left(-\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \bar{v} \times rot \bar{A} \right) \quad (4)$$

При наличии только ЭДС трансформации получим уравнение параболического типа

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} = -\mu_0 \bar{J}_{cm} + \mu_0 \gamma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t},$$

которое имеет единственное решение при заданных начальных условиях $\bar{A} = \bar{A}_0$ при $t = t_0$ и граничных или краевых условиях ($Div \bar{B} = 0$, $Rot \bar{H} = \bar{J}$) первого, второго или третьего рода (первая, вторая и третья краевые задачи) [9].

Магнитоэлектрическая модель магнитного поля $\frac{1}{\mu} \nabla^2 \bar{A} = -\mu_0 \bar{J}_{cm}$ в линейных изотропных средах совсем проста, и представляет собой дифференциальное уравнение Лапласа-Пуассона в частных производных.

Магнитоэлектрический генератор представляет собой синхронный генератор с постоянными магнитами, статор которого состоит из совокупности электромагнитов, ротор – из совокупности постоянных магнитов. Для области моделирования с постоянными магнитами вектор магнитной индукции записывается как

$$\bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H} + \mu_0 \bar{M}_0, \quad (5)$$

где \bar{M}_0 – вектор остаточной намагниченности постоянного магнита [1, с. 273; 13]. Из (5) вытекает, что $rot(rot \bar{A}) = \mu_a rot \bar{H} + \mu_0 rot \bar{M}_0$ относительно вектор-потенциала \bar{A} для квазипеременного магнитного поля с учетом выражения $\bar{B} = rot \bar{A}$, калибровки Кулона и закона полного тока

$$\frac{1}{\mu \mu_0} \nabla^2 \bar{A} = -\bar{J}_{cm} - \bar{J}_{np} - \bar{J}_M, \quad (6)$$

где объемная плотность тока намагничивания

$$\bar{J}_M = rot \frac{\mu_0 \bar{M}_0}{\mu}.$$

Решение (6) методом Галеркина-МКЭ в цилиндрической системе координат приведено в [13].

Переменная векторная модель быстротекущих электромагнитных (волновых, высокочастотных) процессов

В этом случае токами смещения пренебречь нельзя, и напряженность переменного электрического поля будет равна $\bar{E} = -\partial\bar{A}/\partial t - grad\varphi$, ток смещения $\bar{J}_{см} = \partial\bar{D}/\partial t = \varepsilon\varepsilon_0\partial\bar{E}/\partial t = -\varepsilon\varepsilon_0(\partial^2\bar{A}/\partial t^2 + grad\partial\varphi/\partial t)$, ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 – электрическая постоянная. И тогда

$$grad\,div\bar{A} - \nabla^2\bar{A} = \mu_a\bar{J} - \mu_a\varepsilon_a\partial^2\bar{A}/\partial t^2 - \mu_a\varepsilon_a\,grad\partial\varphi/\partial t$$

или

$$grad\,(div\bar{A} + \mu_a\varepsilon_a\,grad\partial\varphi/\partial t) - \nabla^2\bar{A} + \mu_a\varepsilon_a\partial^2\bar{A}/\partial t^2 = \mu_a\bar{J}, \quad (7)$$

где $\mu_a = \mu\mu_0$ и $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$ – абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемости сред.

В переменной векторной модели электромагнитных процессов вектор-потенциал \bar{A} подчиняется калибровке Лоренца [3] $div\bar{A} = -\mu_a\varepsilon_a\,grad\partial\varphi/\partial t$, уравнение (7) преобразуется

$$\nabla^2\bar{A} - \mu_a\varepsilon_a\partial^2\bar{A}/\partial t^2 = -\mu_a\bar{J} \quad (8)$$

и оно называется уравнением Даламбера [1, 3] для быстротекущих электромагнитных (волновых, высокочастотных) процессов.

Заключение

Полученные уравнения векторных моделей квазистационарного, магнитостатического, переменного электромагнитного поля совместно с начальными, краевыми условиями и условиями сопряжения на границах сред с различными магнитными и электрическими свойствами решаются численными проекционно-сеточными методами либо на вариационной основе, либо на принципе Галеркина. Решение определяется формой базисной функции. В настоящее время это, как правило, линейная комбинация финитной базисной и искомой функций на конечном элементе, т.е. метод конечных элементов, который программно реализуется во многих известных прикладных программных продуктах, в том числе ELCUT, COMSOL, ANSYS для имитационного моделирования и проведения численных исследований электрических машин, в том числе и МЭГ.

Библиографический список

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 504 с.
2. Шимони К. Теоретическая электротехника / под ред. Проф. К. М. Поливанова: пер. с немецкого. М.: Мир, 1964. 773 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле. М.: Высш. школа, 1978. 231 с.
4. Андреева Е. Г., Ковалев В. З. Математическое моделирование электротехнических комплексов: монография / под общ. Ред. Ю. З. Ковалёва. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. 172 с.
5. Марчук Г. И., Агошков В. И. Введение в проекционно-сеточные методы. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. 416 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / под общ. Ред. И. Г. Арамановича : пер. с англ. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. 720 с.
7. Домбровский В. В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.

8. Брынский Е. А., Данилевич Я. Б., Яковлев В. И. Электромагнитные поля в электрических машинах. Л.: Энергия, 1979. 176 с.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 616 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. М.: Мир, 1979. 392 с.
11. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 318 с.
12. Полезные материалы по ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell на русском языке // Админ (С) 2008–2011. URL: <http://ansoft-maxwell.narod.ru/documentation.html> (дата обращения: 02.09.2015).
13. Ковалев Ю. З., Андреева А.Г., Татевосян А. А. [и др.]. Расчет электротехнических устройств с использованием программного пакета ANSYS: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 84 с.

УДК 621.32

К.Н. Афонин, К.В. Тепляков¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ В КОЛБЕ А55

Аннотация. Объектом исследования в представленной работе является светодиодная лампа типа LED filament Bulb. Проведено тепловое моделирование в программе конечно-элементного анализа ANSYS. Получены картины распределения температуры внутри светодиодной лампы при заполнении внутренней полости колбы воздухом и гелием.

Ключевые слова: светодиодная лампа, тепловое моделирование, ANSYS, LED Filament.

В настоящее время на рынке все больше и больше набирают популярность светодиодные лампы типа LED filament Bulb (рис. 1). Такие лампы используют как для бытового, так и для декоративного освещения. Они обладают несколькими преимуществами по сравнению со светодиодными лампами на SMD светодиодах.

Во-первых, производители ламп накаливания могут переоборудовать производство на выпуск светодиодных ламп с меньшими затратами. Это связано с использованием в светодиодных лампах таких базовых частей, как колба, цоколь и др., которые используются при производстве ламп накаливания, либо для их применения необходимо проведение незначительных модификаций. Вместо нити накала установлены светодиодные излучающие элементы ленточного типа (СИЭ), а в цоколь смонтировано устройство управления. В России основные производители таких ламп – ГУП «Лисма», г. Саранск и ООО «Руслед», г. Томск.

Во-вторых, распределение света в лампе типа filament близко к сферическому (как у лампы накаливания) и поддается корректировке за счет, например, изменения расположения СИЭ или других конструктивных особенностей [1]. В лампах с SMD светодиодами эта

возможность ограничена из-за использования массивного радиатора, препятствующего распространению света за его пределы.

В-третьих, конструкция лампы накаливания герметична, что позволяет заполнить колбу инертным газом. Лёгкие газы улучшают теплоотвод от СИЭ [2].

В-четвертых, разнообразное расположение светодиодных элементов и диммирование привели к появлению большого количества вариантов ламп, используемых для декоративных целей.



Рис. 1. Лампа типа LED filament Bulb

Главная задача в работе по тепловому моделированию светодиодных ламп – определить максимальную температуру внутри колбы. Эта температура не должна превышать $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как это значение температуры является критическим для p–n перехода светодиодных кристаллов на основе InGaN/GaN. При температурах более критической в структуре кристалла проявляются разнообразные признаки деградации [3–5], в конечном итоге приводящие к преждевременному выходу из строя светодиодного излучающего элемента либо быстрому ухудшению светотехнических характеристик лампы [6, 7]. По неопубликованным данным от производителя светодиодных ламп известно, что около 50 % брака связано с выходом из строя СИЭ. Поэтому для ламп такого типа особенно остро стоит вопрос охлаждения излучающих элементов, к тому же сама конструкция лампы исключает возможность использования радиаторов.

Цель работы – построить тепловую модель светодиодных ламп мощностью 6 и 8 Вт в колбе А55 с последующим получением распределения температуры в объеме лампы. Данные лампы позиционируются как аналог лампы накаливания мощностью 60 и 75 Вт.

Описание модели и граничных условий

Конструкция светодиодной лампы выглядит следующим образом. Внутри стеклянной колбы располагается опорная конструкция с электрическими выводами, соединяющими группы СИЭ. Нижняя часть колбы герметично закрыта цоколем E27, в котором расположено устройство управления. Лампы мощностью 6 и 8 Вт содержат 6 и 8 СИЭ соответственно.

Конструкция СИЭ представляет собой основание с размерами $40\times 1\times 1$, на котором посредством теплопроводящего клея смонтированы полупроводниковые кристаллы (кристаллы планарного типа на основе твёрдых растворов GaN, выращенные на сапфировой подложке). Габаритные размеры используемых кристаллов составляют $0,480\times 0,200\times 0,130$ мм. Соединены кристаллы между собой последовательно. Конструкция окружена люминофорной композицией. Для упрощения модели люминофорная композиция сделана в форме цилиндра с диаметром основания 3,5 мм и высотой 30 мм.

КПД кристаллов синего цвета свечения обычно составляет около 50 %, поэтому только половина от потребляемой мощности будет расходоваться на нагревание элемента. Электрическая нагрузка на один кристалл составляет 10 мА при прямом напряжении 2,75 В. Соответственно, мощность каждого СИЭ тепловой модели будет равняться 0,385 Вт.

Для выполнения моделирования был использован метод конечных элементов, реализованный в программе ANSYS 18.1. В таблице 1 перечислены все материалы модели с необходимыми для расчёта коэффициентами. Расчёт моделей проводился в воздушной среде при нормальных условиях ($T_{\text{окр.ср.}} = 25^{\circ}\text{C}$).

Таблица 1

Коэффициенты материалов, используемые в расчёте

Деталь	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Коэффициент излучения
Колба	Стекло	1,4	0,5
Опорная конструкция			
Выводы	Платинит	60	0,6
СИЭ	Керамика	170	0,5
Люминофорная композиция	Силиконовый компаунд + смесь люминофорных порошков	0,15	–
Газовое наполнение	Воздух	0,026	–
	Гелий	0,155	–

Результаты моделирования

Результаты расчёта температуры и тепловое распределение для моделей ламп, заполненных воздухом и гелием, приведены в таблице 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Результаты расчёта температуры

Модель лампы	Газовое наполнение	$T_{\text{мин}}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{макс}}, ^{\circ}\text{C}$
A55 6 Вт	Воздух	31,22	111,42
	Гелий	36,31	79,36
A55 8 Вт	Воздух	32,66	115,3
	Гелий	41,39	82,34

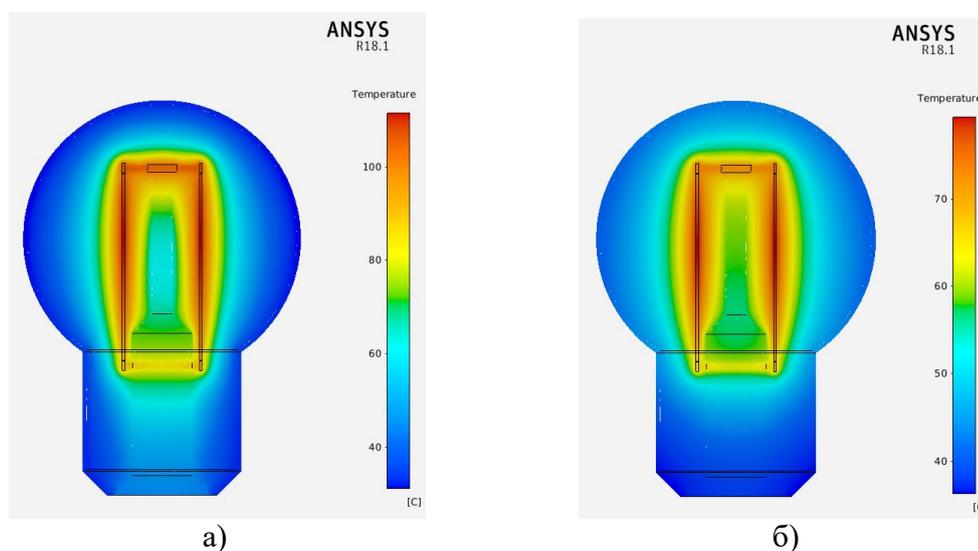


Рис. 2. Результаты расчёта модели лампы 6 Вт: а) лампа с воздухом; б) лампа с гелием

Внешний вид распределения температуры в лампе мощностью 8 Вт совпадает с распределением, представленным на рис. 2. Различия заключаются только в значениях максимальной и минимальной температуры.

Построенные модели показывают, что использование гелия в качестве теплопередающего элемента в колбе лампы позволяет снизить максимальную температуру на 32 °С. По результатам моделирования установлено, что максимальная температура модели лампы с мощностью 6 Вт ниже критической на 41 °С, а для модели лампы с мощностью 8 Вт – на 38 °С. Использование гелия в качестве газа, заполняющего объем внутри колбы, уменьшает вероятность перегрева СИЭ и выхода из строя изделия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках проекта RFMEFI57717X0266.

Библиографический список

1. Пат. 185874 Российская Федерация, МПК F 21 V 14/00. Светодиодная лампа / Афонин К. Н., Вилисов А. А., Солдаткин В. С., Туев В. И., Юлаева Ю. В. № 2018134842; заявл. 01.10.2018; опубл. 21.12.2018, Бюл. № 36.
2. Feng W., Feng B., Zhao F. [et al.]. Simulation and Optimization on Thermal Performance of LED Filament Light Bulb // Proc. of the 12th China Int. Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA 2015). 2015. Vol. 12. P. 88–92.
3. Закгейм А. Л., Левинштейн М. Е., Петров В. П. [и др.]. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN- светодиодах // ФТП. 2012. Т. 46, 2. С. 219–223.
4. Shmidt N. M., Greshnov A. A., Chernyakov A. E. [et al.]. Mechanisms behind efficiency droop and degradation in InGaN/GaN LEDs // Physica Status Solidi (c). 2013. Vol. 10, 3. P. 332–334.
5. Черняков А. Е. Особенности развития деградации внешнего квантовой эффективности мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур: дис. ... к-та ф-м. наук. Санкт-Петербург, 2014. 157 с.
6. Солдаткин В. С., Афонин К. Н., Каменкова В. С. [и др.]. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 3. С. 148–151.
7. Soldatkin V. S., Tuev V. I., Yulaeva Y. V. [et al.] Operation Characteristics of LED Filament Bulbs Pages // Proc. of the 14th Intern. Sc.-Tech. Conf. APEIE 2018, Oct. 2–6, 2018. Novosibirsk, 2018. Vol. 1. P. 376–379. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545675.

УДК 532.13

М.А. Баканова, Д.А. Убейкина¹, А.М. Ласица¹
БОУ г. Омска «Лицей №166», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ МОТОРНЫХ И ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

Аннотация. В работе исследовались температурные зависимости вязкости моторных масел марок «Газпром 5W-40», «Каждый день 5W-40» и трансмиссионных масел «Газпром GL5 80W-90» и «ЛУКОЙЛ GL5 75W-90». Измерение проводилось в температурном

диапазоне 30-60°C. Изучалась возможность параметризации полученных температур зависимостей уравнениями Френкеля, Торпа-Роджера и Ле-Шателье. Проводилось сравнение полученных результатов со стандартом SAE.

Ключевые слова: вязкость, температурная зависимость, стандарт SAE, метод наименьших квадратов.

Введение

Условия работы современных механических устройств, агрегатов и их комплексов предъявляют повышенные требования к смазочным материалам. Одной из характеристик, определяющих границы и области использования смазочного материала, считается его вязкость[1–4].

Слишком большое значение вязкости препятствует запуску двигателей при низких температурах, при низких значениях вязкости возможно самопроизвольное вытекание масла из узлов через уплотняющие соединения (муфты, сальники, подшипники и др.). Исследование температурной зависимости вязкости смазывающих материалов позволяет подобрать температурный интервал, соответствующий наименьшему износу деталей двигателей, коробок передач и других узлов техники.

В исследовании сделан акцент на изучении моторных и трансмиссионных масел, произведенных в Омской области, и сравнении их свойств с маслами соответствующей ценовой категории, выпускаемыми другими производителями.

В качестве объектов исследования были выбраны моторные масла «Газпром» 5W-40 и «Каждый день» 5W-40 и трансмиссионные масла «Газпром» GL5 80W-90 и «ЛУКОЙЛ» GL5 75W-90, находящиеся в ценовой категории до 350 руб/литр, наиболее широко представленной на рынке машинных масел. Для данных объектов исследования экспериментально изучалась температурная зависимость и изучалась возможность аппроксимации полученных температур зависимостей уравнениями Френкеля, Торпа-Роджера и Ле-Шателье.

Постановка и результаты эксперимента

Поскольку исследуемые масла в основном используются в различных узлах трансмиссии, где обеспечивают эффективный отвод тепла от трущихся деталей, защиту рабочих поверхностей деталей от механических повреждений и от коррозионного воздействия, то традиционной методикой измерения вязкости смазок, работающих в таких условиях, является измерение с помощью капиллярного вискозиметра, регламентированное ГОСТ 33-2016. Измерения вязкости масел проводились методом сравнения с эталонной жидкостью, в качестве которой была использована вода при $t = 23^\circ\text{C}$, обладающая вязкостью 1,002 мПа·с. Измерения производились в температурном интервале от 30°C до 60°C, доступном для измерений имеющимися техническими средствами, с шагом 5°C.

Расчет вязкости проводился по формуле:

$$\eta = \frac{\eta_0 * t * \rho}{t_0 \rho_0} \quad (1)$$

где η_0 – вязкость эталонной жидкости, t – время протекания исследуемой жидкости, ρ – плотность исследуемой жидкости, t_0 – время протекания эталонной жидкости, ρ_0 – плотность эталонной жидкости.

Схема эксперимента приведена на рис. 1.

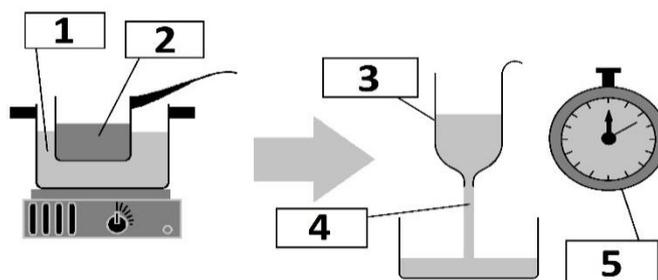


Рис. 1. Принципиальная схема установки исследования.
 1-водяная баня (для избежания неравномерного нагрева), 2-нагреваемое масло,
 3-вискозиметр, 4-пролив масла через капилляр вискозиметра, 5-секундомер

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения вязкости

Температура (°C)	Моторное масло («Газпром» 5w-40), мПа·с	Моторное масло («Каждый день» 5W-40), мПа·с	Трансмиссионное масло («Газпром GL5 80W-90»), мПа·с	Трансмиссионное масло («ЛУКОЙЛ GL5 75W-90»), мПа·с
60	2,05	1,71	1,95	2,07
55	1,99	1,77	2,14	2,01
50	2,04	1,893	2,52	2,18
45	2,35	2,22	2,79	2,38
40	2,71	2,43	3,632	2,79
35	3,17	2,71	4,84	3,05
30	3,361	3,213	5,78	3,57

Анализ полученных результатов

Аппроксимация экспериментальных данных проводилась следующими зависимостями:

- формула Френкеля

$$\eta = \eta_0 * e^{u/kT}, \quad (2)$$

- формула Торпа-Роджера

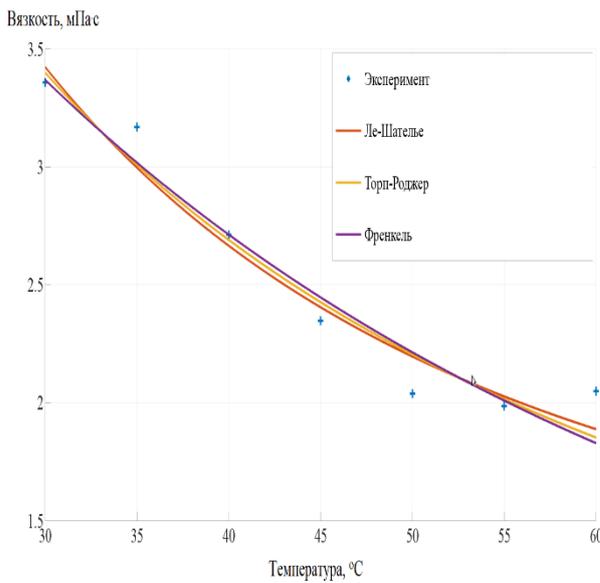
$$\eta = \frac{C}{1+AT+BT^2}, \quad (3)$$

- формула Ле-Шателье

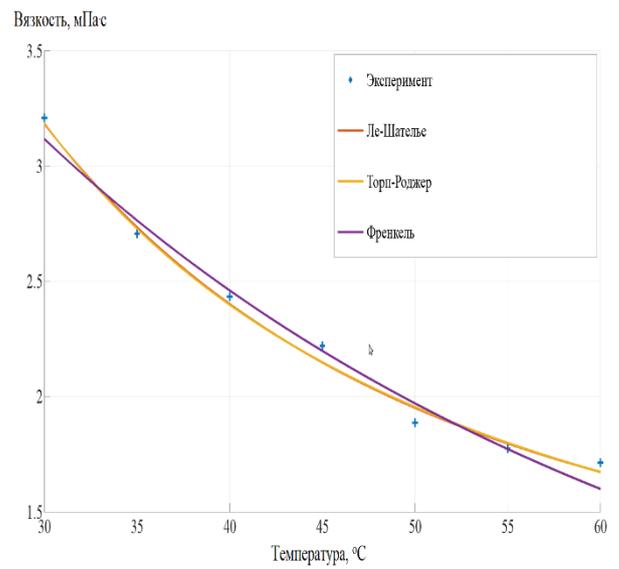
$$\eta = e^{C/T^A}, \quad (4)$$

где $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, T – абсолютная термодинамическая температура, и, A, B, C – константы уравнений.

Определение коэффициентов в уравнениях велось методом наименьших квадратов в пакете прикладных программ Matlab R2018b, для вычисления использовался алгоритм Левенберга-Марквардта. Результаты вычислений приведены на рис. 2, 3 и в таблице 2.

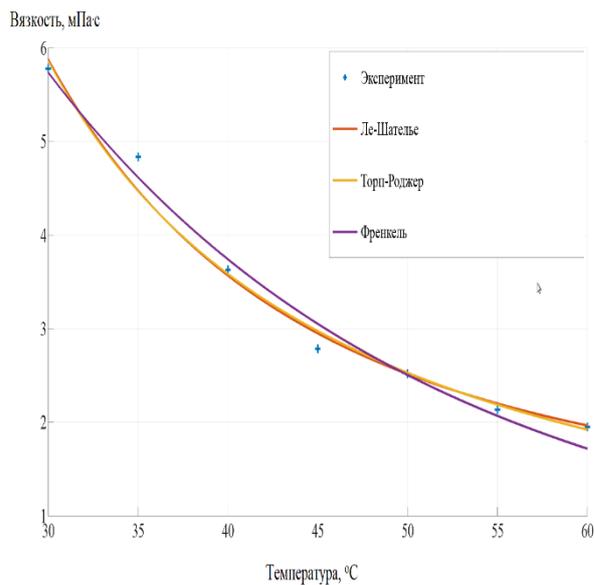


а)

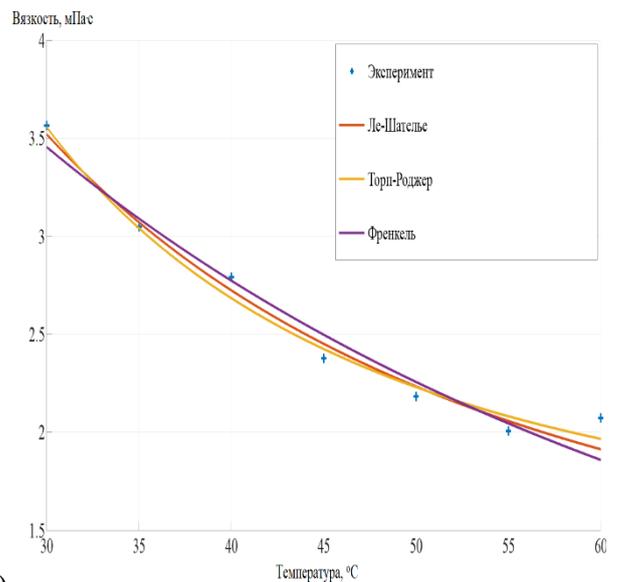


б)

Рис. 2. Температурные зависимости вязкости моторных масел:
а) Газпром 5W-40, б) Каждый день 5W-40



а)



б)

Рис. 3. Температурные зависимости вязкости трансмиссионных масел:
а) Газпром GL5 80W-90, б) ЛУКОЙЛ GL5 75W-90

Анализируя графики, можно увидеть, что фактически все аппроксимирующие формулы дают хорошее согласие с экспериментом в исследуемом температурном диапазоне. Максимальное отклонение составляет 16%.

Для анализа возможности экстраполяции в область высоких и низких температур проводилось сравнение расчетных значений вязкости масел с данными, предоставленными производителями. Температуры, в которых производилось сравнение, соответствуют стандарту SAE, результаты приведены в таблицах 3–5.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимирующих уравнений

	Френкель	Торп-Роджер	Ле-Шателье
Моторное масло Газпром 5W-40	$\eta_0=3,8609*10^{-3}$ $u=2,0571*10^3$	$C=9,4728*10^3$ $A=-5,3023*10^1$ $B=2,0521*10^{-1}$	$C=2,9282*10^{17}$ $A=7,0019$
Моторное масло Каждый день 5W-40	$\eta_0=1,8837*10^{-3}$ $u=2,2468*10^3$	$C=-1,4735*10^{-1}$ $A=-5,3221*10^{-3}$ $B=6,1714*10^{-6}$	$C=2,4278*10^{21}$ $A=8,5917$
Трансмиссионное масло Газпром 80W-90	$\eta_0=8,7811*10^{-6}$ $u=4,0592*10^3$	$C=1,3484$ $A=-1,9151*10^{-2}$ $B=5,4794*10^{-5}$	$C=3,8795*10^{25}$ $A=1,0211*10^1$
Трансмиссионное масло Лукойл 75W-90	$\eta_0=3,5387*10^{-3}$ $u=2,0869*10^3$	$C=-1,0091*10^{-1}$ $A=-5,7832*10^{-3}$ $B=7,8868*10^{-6}$	$C=3,3568*10^{17}$ $A=7,0219$

Таблица 3

Сопоставление результатов расчетов с данными производителя масла Газпром 5W-40

	Вязкость масла при -40°C, мм ² /с	Вязкость масла при 100°C, мм ² /с
Френкель	30,479	1,1127
Торп-Роджер	-9,1310	1,2532
Ле-Шателье	2668,5	1,5500
Данные производителя	89	14,3

Таблица 4

Сопоставление результатов расчетов с данными производителя масла Лукойл 75W-90

	Вязкость масла при -40°C, мПа·с	Вязкость масла при 100°C, мм ² /с
Френкель	27,300	1,0745
Торп-Роджер	1,1139	-1.0734*10 ³
Ле-Шателье	2849,1	1,5157
Данные производителя	101078	16,1

Таблица 5

Сопоставление результатов расчетов с данными производителя масла Газпром 80W-90

	Вязкость масла при -26°C, мПа·с	Вязкость масла при 100°C, мм ² /с
Френкель	119,24	0,51892
Торп-Роджер	-3,4916	1,0134
Ле-Шателье	1,5666*10 ⁶	1,3787
Данные производителя	150000	16,1

Наилучшее соответствие в области и низких и высоких температур дает формула Лешателье, но даже для нее отличие между расчетными значениями и данными производителей может составлять несколько порядков. При высоких температурах соответствие теории и эксперимента лучше, чем при низких температурах. Таким образом, результаты анализа показывают, что ни одно из исследуемых уравнений не позволяет получить достоверных значений вязкости масел при больших интервалах температур. Решением проблемы может быть либо расширение температурного интервала измерений, либо использование формул, имеющих большее число свободных коэффициентов [4].

Библиографический список

1. Евдокимов И. Н., Елисеев Н. Ю. Молекулярные механизмы вязкости жидкости и газа. Часть 1. Основные понятия / под ред. В. Б. Нагаева. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. 59 с.
2. Сутягин В. М., Ляпков А. А. Физико-химические методы исследования полимеров: учеб. пособие / 3-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2018. 140 с.
3. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. / 4-е изд. М.: Научный мир, 2007. 567 с.
4. Фукс Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 328 с.
5. Wolak. A. Statistical analysis of HTHS viscosity rating of present-day engine oils // Tribology Transactions. 2019. Vol. 62. P. 34–41. Doi: 10.1080/10402004.2018.1468518.
6. Adeyanju O. A., Oyekunle L. O. A new unified model for predicting non-newtonian viscosity of waxy crudes // Petroleum Science and Technology. 2012. Vol. 30. P. 904–914. Doi: 10.1080/10916466.2010.494094.
7. Hemmingsen P., Silset A., Hannisdal A., Sjöblom J. Hemmingsen emulsions of heavy crude oils. I: Influence of viscosity, temperature and dilution // Journal of Dispersion Science and Technology. 2005. Vol. 26. P. 615–627. Doi: 10.1081/DIS-200057671.
8. Du Y., Wu T., Gong R. Properties of water-contaminated lubricating oil: variation with temperature and small water content // Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces. 2017. Vol. 11, no. 1. P. 1–6. Doi: 10.1080/17515831.2017.1279845.

УДК 644.36

Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, В.И. Туев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЮМИНОФОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА СВЕТОВУЮ ОТДАЧУ И КОРРЕЛИРОВАННУЮ ЦВЕТОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СВЕТОДИОДА БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ

Аннотация. В работе излагаются результаты исследования влияния толщины и концентрации люминофорной композиции на световую отдачу и коррелированную цветовую температуру светодиода белого цвета свечения. Установлено, что наибольшая эффективность достигнута на макетном образце светодиода с толщиной люминофорной композиции 3 мм и концентрацией люминофора в компаунде 12%. Коррелированная цветовая температура снижается с увеличением концентрации люминофора в композиции.

Ключевые слова: светодиод, люминофорная композиция, цветовая температура, световая отдача.

Люминофорная композиция (ЛК) предназначена для получения белого цвета свечения светодиодов и светодиодных нитей для светотехнических устройств и светодиодных ламп общего назначения. Люминофорная композиция состоит из частиц люминофора и связующего на основе оптически прозрачного компаунда. Принцип работы люминофора основан на фотолюминесценции при воздействии излучения в синей области оптического спектра видимого диапазона. Люминофор YAG имеет структуру кристаллической решётки гранат, в узлах кристаллической решётки расположены атомы иттрия, гадолиния и алюминия [1]. Правильный выбор люминофора и его процентного содержания в композиции влияет на коррелированную цветовую температуру светодиода, его световую отдачу и надёжность [2–4].

Целью данной работы является определение влияния толщины и концентрации люминофорной композиции на световую отдачу и коррелированную цветовую температуру светодиода белого цвета свечения.

Эксперимент заключается в том, чтобы получить 3 группы светодиодов, в которых варьируется процентное содержание (9%, 12%, 15%) и толщина слоя (1мм, 2мм, 3мм) люминофорной композиции, затем с помощью фотометрического шара измерить световой поток и рассчитать световую отдачу и, используя спектроколориметр ТКА ВД, зафиксировать значения коррелированной цветовой температуры.

Максимальная толщина заливки ЛК составляет 3 мм, дальнейшее увеличение толщины для выбранного корпуса светодиода будет не технологичным.

Соотношение толщины слоя заливки люминофорной композиции и керамического корпуса иллюстрируются на рис.1, А–В.

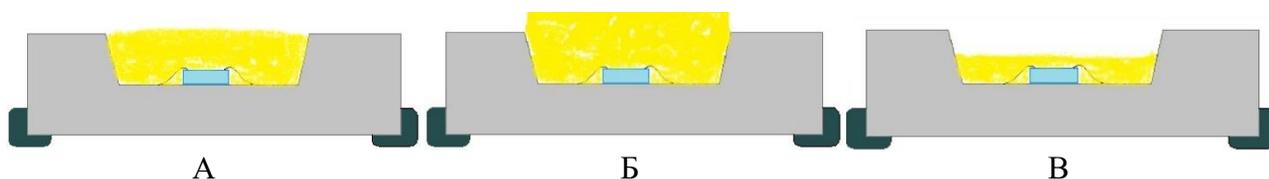


Рис. 1. Соотношение размеров корпуса светодиода и толщины люминофорной композиции: А – 1 мм, Б – 2 мм, В – 3 мм.

Для создания макетов были выбраны следующие комплектующие: керамический корпус светодиода $5 \times 5 \text{ мм}^2$ со смонтированным синим кристаллом (длина волны 460 нм) – 9 шт; компаунд от компании «Эластосил» серия RT 604 (прозрачный, вязкость 800 мПа·с, время отверждения при 100°C – 8 минут); люминофор (размер частиц 15 мкм, пиковая длина волны 550 нм).

На корпус светодиода с кристаллом наносили люминофорную композицию, состоящую из компаунда и люминофорного порошка, затем производилась сушка в печи при температуре 85 °C в течение 30 минут. В результате получили 9 макетов светодиодов белого цвета свечения с разной концентрацией люминофора в ЛК и разной толщиной слоя ЛК.

Фотографии трех макетов светодиодов показаны на рис. 2.

Измерения светового потока проводились с помощью фотометрического шара. Для питания макетов использовался источник питания KEITHLEY 2410.

В таблице 1 представлены результаты измерений и расчетов, где Φ – световой поток, лм; $I_{пр}$ – прямой ток, мА; $U_{пр}$ – прямое напряжение, В; P – потребляемая мощность, Вт; η – световая отдача, лм/Вт.

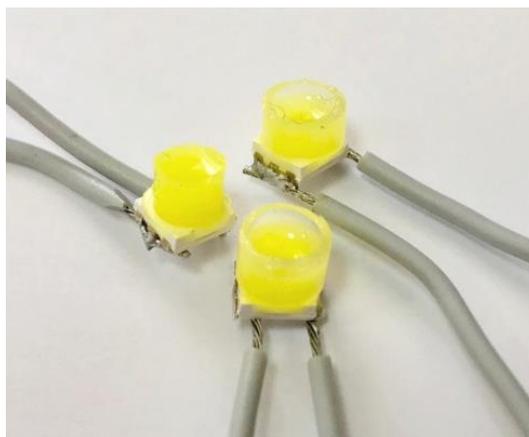


Рис. 2 – Фотографии макетов светодиодов

Таблица 1

Результаты измерений образцов светодиодов

Толщина ЛК	Концентрация люминофора в ЛК		
	9%	12%	15%
1 мм	$\Phi=2,8$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,77$ В $P=0,0277$ Вт $n=101,1$ лм/Вт	$\Phi=3,43$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,77$ В $P=0,0277$ Вт $n=123,8$ лм/Вт	$\Phi=3,5$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,79$ В $P=0,0279$ Вт $n=125,4$ лм/Вт
2 мм	$\Phi=3,93$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,77$ В $P=0,0277$ Вт $n=141,9$ лм/Вт	$\Phi=4,21$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,78$ В $P=0,0278$ Вт $n=151,4$ лм/Вт	$\Phi=3,42$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,77$ В $P=0,0277$ Вт $n=123,5$ лм/Вт
3 мм	$\Phi=3,81$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,77$ В $P=0,0277$ Вт $n=137,5$ лм/Вт	$\Phi=4,2$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,73$ В $P=0,0273$ Вт $n=153,8$ лм/Вт	$\Phi=3,68$ лм $I_{пр}=10$ мА $U_{пр}=2,76$ В $P=0,0276$ Вт $n=133,3$ лм/Вт

Выводы: установлено, что наибольшее значение световой отдачи достигнуто на макете светодиода с толщиной люминофорной композиции 3 мм и концентрацией люминофора в компаунде 12%. Коррелированная цветовая температура снижается с увеличением концентрации люминофора в ЛК: при 9% – $T_c = 14914$ К, при 12% – $T_c = 5383$ К, при 15% – $T_c = 2500$ К.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках проекта RFMEFI57717X0266.

Библиографический список

1. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. / под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

2. Ryapolova Y. V., Soldatkin V. S., Afonin K. N. [et al.]. Parameters Investigation of Phosphors for Solid State Lighting // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 712. P. 357–361. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.357.

3. Солдаткин В. С., Афонин К. Н., Каменкова В. С. [и др.]. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 3. С. 148–151.

4. Tuev V. I., Soldatkin V. S., Andreeva M. V. [et al.]. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1115. P. 052012. Doi :10.1088/1742-6596/1115/5/052012.

УДК 372.853

В.В. Гарбарук, В.И. Никитченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Россия

ЗНАЧЕНИЕ ЕДИНОГО ЗАДАНИЯ ПО ФИЗИКЕ И МАТЕМАТИКЕ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ

Аннотация. Рассматривается использование единого задания по физике и математике для повышения практической подготовки бакалавров за счет объединения различных разделов физики и математики и установления их связи с учебным материалом общетехнических и специальных дисциплин.

Ключевые слова: единое задание по физике и математике, разветвлённая электрическая цепь с емкостью и индуктивностью.

Двухуровневая (бакалавр-магистр) система высшего технического образования выдвинула дополнительные требования к постановке физико-математических курсов в вузах. Сейчас требуется максимально возможное сближение содержания и структуры таких курсов с математическим и физическим аппаратами будущей специальности студента. При этом возникает определённое противоречие, т.к. развитие логического мышления требует увеличения строгости и доказательности изложения материала, в то время как формирование навыков практического применения физико-математического аппарата предполагает освоение алгоритмов его использования. насыщение дисциплин прикладными примерами оказывается недостаточным, поскольку при контроле усвоения материала студентами основное внимание уделяется базовым понятиям и умениям, что вполне естественно и оправдано. Устранением этого противоречия может послужить коррекция структуры типовых расчетов, состоящая в выдаче единого задания по физике и математике с элементами первичных понятий общетехнических дисциплин. Целью такого задания является формирование у студентов навыков приложения знаний, полученных в процессе изучения курса высшей математики и физики, к решению технических задач. Идея единого задания, в котором решалась задача пересечения многогранника плоскостью, была ранее реализована на двух кафедрах «Начертательная геометрия и графика» и «Высшая математика» [1].

Реализация изложенного выше проекта была осуществлена для ряда электромеханических направлений бакалавриата ПГУПС. Была снижена трудоемкость стандартных типовых расчетов, но включено в рабочую программу единое дополнительное задание по физике и математике. Естественной темой такого задания явилось исследование

разветвлённой электрической цепи с емкостью или индуктивностью (рис. 1), которое можно рассматривать как типовое звено системы связи или системы автоматического управления.

Законы Кирхгофа позволяют составить достаточное число линейных алгебраических уравнений для неизвестных токов и разностей потенциалов на каждом элементе. Законы функционирования реактивных элементов электрических цепей, изучаемых в курсе физики, требуют решения дифференциальных уравнений, изучаемых в курсе математики.

Выполнение задания осуществляется поэтапно:

- составление системы уравнений при подключении и отключении источника постоянного тока на основе законов Кирхгофа;
- вывод дифференциальных уравнений второго порядка, отображающих квазистационарные процессы в разветвленной электрической цепи с реактивными элементами;
- составление характеристического уравнения и запись решения неоднородного линейного дифференциального уравнения с правой частью специального вида при подключении источника постоянного тока при нулевых начальных условиях;
- решение однородного линейного дифференциального уравнения при отключении источника постоянного тока с начальными условиями, определенными на предыдущем этапе;
- решение дифференциальных уравнений операционным методом, сравнение решений, полученных разными методами;
- построение частотных характеристик разветвленной электрической цепи и исследование преобразования звеном периодического входного сигнала.

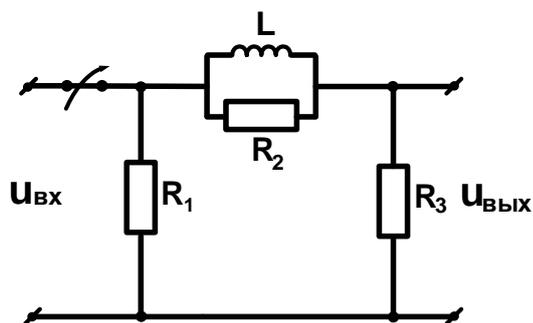


Рис. 1. Типовое звено исследования

Использование единой работы по физике и математике способствует увеличению степени усвоения материала студентом. Исследование разветвленной электрической цепи требует знания соответствующих разделов курсов физики и высшей математики – электростатика, электродинамика, линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, операционное исчисление, тригонометрические ряды Фурье. В зависимости от соотношения параметров цепи решения составленных дифференциальных уравнений могут описывать как свободные колебания, так и релаксационные (непериодические) процессы. Колебания в электрическом контуре, переходные процессы, возникающие в электрических цепях, приобретают для студентов реальный смысл. Студенты осознают важность законов физики (электродинамики) и математики (дифференциальных уравнений) в электротехнике и радиотехнике, необходимых в их дальнейшей практической работе. В лекциях и практических занятиях подчеркивается связь разделов физики и высшей математики, используемых в работе. При выполнении единого задания студенты получают подробный пример исследования похожего звена, контрольные вопросы и список дополнительной литературы, что дает им возможность осмысленно применять указанные

разделы математики и физики. Следует отметить, что кафедрой «Высшая математика» также было разработано аналогичное, но существенно более сложное задание на курсовую работу [2] для специальностей факультета «Автоматизация и интеллектуальные технологии», учебными планами которых такая работа предусмотрена.

Библиографический список

1. Гарбарук В. В., Семенов В. А., Тихомиров С. Г. Интеграция графических и аналитических методов решения геометрических задач // Математика в вузе и школе. Труды международной научно-методической конференции. СПб, 2017. С. 33–37.

2. Гарбарук В. В., Благовещенская Е. А., Родин В. И. Курсовые работы в курсе математики// Актуальные проблемы преподавания математики в техническом вузе. 2018. № 6. С. 74–79.

УДК 621.315.592

И.В. Иванов, А.Г. Козлов¹

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ ПОЛИТИПА 6Н

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования подвижности электронов в карбиде кремния (SiC) политипа 6Н. Рассмотрены два подхода: использование температурно-зависимой модели Caughey-Thomas и применение модели Agora. Используются параметры моделей, приведённые в литературе. Предложены новые значения температурных коэффициентов модели Agora, позволяющие более точно моделировать подвижность электронов в диапазоне температур 300...600 К. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электронных приборов, основанных на 6Н-SiC.

Ключевые слова: 6Н-SiC, карбид кремния, подвижность электронов, температурная зависимость подвижности.

Карбид кремния (SiC) считается перспективным широкозонным полупроводниковым материалом для высоковольтной, высокотемпературной и силовой электроники. Он обладает экстраординарными электрофизическими свойствами и в настоящее время является коммерчески доступным. На основе SiC изготавливаются диоды различных типов, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры и другие полупроводниковые приборы. Современное состояние SiC-электроники подробно описано в работах [1, 2].

Существует большое количество различных политипов SiC. В данной статье рассматривается 6Н-SiC, который, наряду с политипами 3С и 4Н, используется при производстве силовых приборов. Началом применения 6Н-SiC в силовой электронике можно считать демонстрацию диодов с р-п-переходом, характеризующихся напряжением пробоя в 1000 В и рабочей температурой в 600 °С [3], а также диодов с барьером Шоттки (1100 В, 400 °С) [4].

При проектировании полупроводниковых приборов возникает задача моделирования их характеристик. Надлежащему решению данной задачи способствует применение точных

моделей основных электрофизических параметров используемых материалов. Одним из таких параметров является подвижность электронов.

Целью данного исследования является анализ и доработка существующих температурно-зависимых моделей подвижности электронов в 6H-SiC. В рамках настоящей работы рассматривается температурный диапазон 300...600 К, поскольку он представляет особый интерес при проектировании устройств силовой электроники [5, 6]. Кроме того, за рамки данной статьи выходят вопросы моделирования подвижности носителей заряда в сильном поле, а также анализ анизотропии подвижности (исследуется подвижность в слабом поле в направлении, перпендикулярном оси c кристаллической решётки).

В настоящее время существует несколько основных подходов к моделированию подвижности электронов. Так, в работе [7] была предложена модель Caughey-Thomas (СТ), предназначенная для описания подвижности μ основных носителей заряда в кремнии как функции концентрации легирующих примесей:

$$\mu(N_A, N_D) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^\alpha}, \quad (1)$$

где N_A – концентрация акцепторов; N_D – концентрация доноров; μ_{min} , μ_{max} , N_{ref} и α – параметры модели.

Следует отметить, что в работе [7] подвижность электронов описана как функция N_D . Однако подавляющее большинство современных авторов указывает на то, что подвижность (как электронов, так и дырок) является функцией суммы $N_A + N_D$ [5, 8–10].

В дальнейшем модель СТ была дополнена параметром β , необходимым для учёта влияния температуры:

$$\mu(N_A, N_D, T) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^\alpha} \left(\frac{T}{T_0}\right)^\beta, \quad (2)$$

где $T_0 = 300$ К.

Коэффициенты, позволяющие моделировать температурную зависимость подвижности электронов в 6H-SiC, были подобраны в работах [9, 11].

Модель Aroga, характеризующаяся повышенной точностью, была предложена в работе [12]. Она основана на использовании выражения (1) с температурно-зависимыми параметрами

$$\mu_{min}(T) = \mu_0^{min} (T/T_0)^{\beta_{min}}, \quad (3)$$

$$\mu_{max}(T) = \mu_0^{max} (T/T_0)^{\beta_{max}}, \quad (4)$$

$$N_{ref}(T) = N_0^{ref} (T/T_0)^{\beta_N}, \quad (5)$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 (T/T_0)^{\beta_\alpha}, \quad (6)$$

где μ_0^{min} , μ_0^{max} , N_0^{ref} и α_0 – значения соответствующих параметров при $T = T_0$; β_{min} , β_{max} , β_{ref} и β_α – температурные коэффициенты.

Параметры, позволяющие применять модель Aroga для описания температурной зависимости подвижности электронов в 6H-SiC, были подобраны в работе [10].

В ходе данной работы на основе моделей СТ (2) и Aroga (1, 3–6), а также параметров, приведённых в литературе [9–11], были построены температурные зависимости подвижности электронов в 6H-SiC. Вычисленные значения и соответствующие им экспериментальные данные [11, 13], а также результаты оптимизации модели, представлены на рис. 1.

Погрешность аппроксимации δ была вычислена с использованием выражения

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{(\mu'_j - \mu_j)^2}{\mu_j^2}} \times 100\%,$$

где M – число экспериментальных точек; μ'_j – вычисленное значение подвижности электронов; μ_j – экспериментальное значение подвижности электронов.

Из рис. 1 видно, что результаты изменений [11] плохо согласуются с экспериментальными данными [13]. В данной работе при оптимизации модели в первую очередь учитывались измерения [13], так как они были проведены в широком диапазоне концентраций легирующих примесей $N_A + N_D$. Поэтому ошибки аппроксимации были вычислены в двух вариантах. При вычислении ошибок δ учтены как данные [13], так и данные [11], а при вычислении ошибок δ^* измерения [11] исключены.

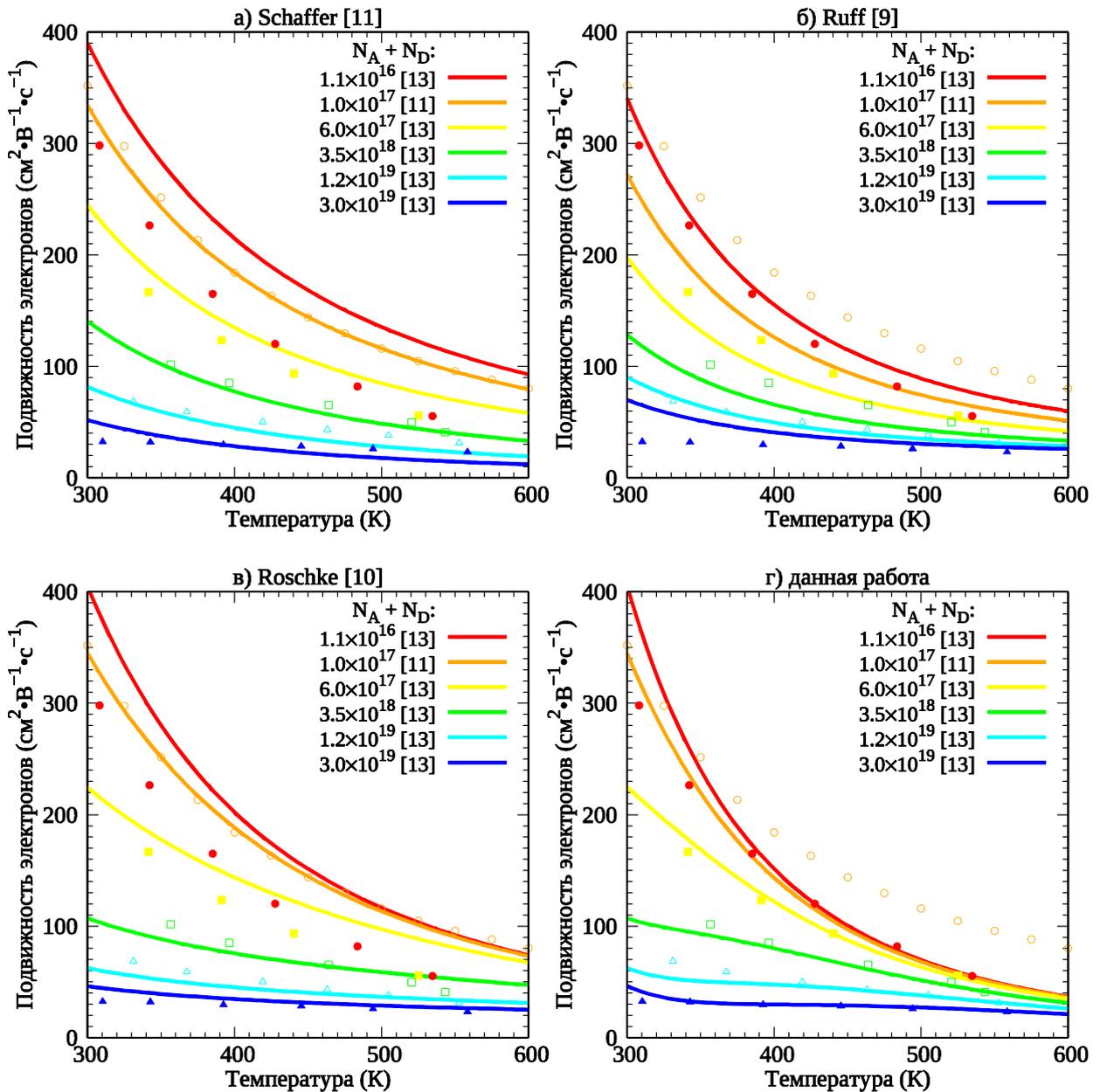


Рис. 1. Подвижность электронов в 6H-SiC: сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Рис. 1 (а) соответствует температурно-зависимой модели СТ с параметрами из [11]. Очевидно, что данная модель находится в согласии с результатами измерений [11], поскольку параметры модели подобраны именно для них. С экспериментальными данными [13] модель согласуется хуже. Ошибки аппроксимации δ^* и δ соответственно равны 84% и 77%.

На рис. 1 (б) представлены результаты вычисления подвижности на основе температурно-зависимой модели СТ с параметрами из [9]. Данная модель лучше согласуется с результатами измерений [13], но не соответствует экспериментальным данным [11]. Ошибки аппроксимации δ^* и δ составляют 67% и 78%.

Рис. 1 (в) соответствует модели Агога с параметрами из [10], подобранными с учётом большого количества экспериментальных данных, в том числе результатов [11] и [13]. Ошибки δ^* и δ соответственно равны 70% и 64%.

На рис. 1 (г) представлены результаты вычисления подвижности на основе модели Агога с параметрами, полученными в данной работе в результате оптимизации. Ошибки аппроксимации δ^* и δ составляют 23% и 56%. Данная модель очень хорошо согласуется с результатами [13], но плохо согласуется с измерениями [11]. Тем не менее, значение ошибки δ указывает на то, что в рассматриваемом диапазоне температур предложенная модель является более точной, чем модели, перечисленные выше.

Параметры моделей, приведённые в литературе, а также параметры, предложенные в данной статье, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделей

Параметр	Значение			
	СТ [11]	СТ [9]	Агога [10]	Агога (данная работа)
μ_0^{min} (см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹)	0	20	30	30
μ_0^{max} (см ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹)	415	400	420	420
N_0^{ref} (см ⁻³)	$1,11 \times 10^{18}$	$4,50 \times 10^{17}$	$6,00 \times 10^{17}$	$6,00 \times 10^{17}$
α_0	0,59	0,45	0,80	0,80
β	-2,07	-3,00		
β_{min}			-0,5	-7,4
β_{max}			-2,5	-3,5
β_{ref}			2,5	6,3
β_a			0,5	-0,3
δ^* (%)	84	67	70	23
δ (%)	77	78	64	56

Таким образом, в ходе данной работы были получены новые значения температурных коэффициентов модели Агога, позволяющие осуществлять более точное моделирование подвижности электронов в 6H-SiC в диапазоне температур 300...600 К. Предложенные параметры могут быть использованы в процессе проектирования карбидокремниевых электронных приборов.

Библиографический список

1. She X., Huang A. Q, Lucía Ó., Ozpineci B. Review of silicon carbide power devices and their applications // IEEE Trans. Ind. Electron. 2017. Vol. 64, no. 10. P. 8193–8205. DOI:10.1109/TIE.2017.2652401.

2. Kimoto. T. Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices // Jpn. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54, no. 4. P. 040103. DOI:10.7567/JJAP.54.040103.
3. Matus L. G., Powell J. A., Salupo C. S. High-voltage 6H-SiC p-n junction diodes // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 59, no. 14. P. 1770–1772. DOI:10.1063/1.106195.
4. Kimoto T., Urushidani T., Kobayashi S., Matsunami H. High-voltage (> 1 kV) SiC Schottky barrier diodes with low on-resistances // IEEE Electron Device Lett. 1993. Vol. 14, no. 12. P. 548–550. DOI:10.1109/55.260785.
5. Arvanitopoulos A., Lophitis N., Gyftakis K. N. [et al.]. Validated physical models and parameters of bulk 3C-SiC aiming for credible technology computer aided design (TCAD) simulation // Semicond. Sci. Technol. 2017. Vol. 32, no. 10. P. 104009. DOI:10.1088/1361-6641/aa856b.
6. Zetterling C.-M., Hallén A., Hedayati R. [et al.]. Bipolar integrated circuits in SiC for extreme environment operation // Semicond. Sci. Technol. 2017. Vol. 32, no. 3. P. 034002. DOI:10.1088/1361-6641/aa59a7.
7. Caughey D. M., Thomas R. E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field // Proc. IEEE. 1967. Vol. 55, no. 12. P. 2192–2193. DOI:10.1109/PROC.1967.6123.
8. Stefanakis D., Zekentes K. TCAD models of the temperature and doping dependence of the bandgap and low field carrier mobility in 4H-SiC // Microelectron. Eng. 2014. Vol. 116. P. 65–71. DOI:10.1016/j.mee.2013.10.002.
9. Ruff M., Mitlehner H., Helbig R. SiC devices: physics and numerical simulation // IEEE Trans. Electron Devices. 1994. Vol. 41, no. 6. P. 1040–1054. DOI:10.1109/16.293319.
10. Roschke M., Schwierz F. Electron mobility models for 4H, 6H, and 3C SiC // IEEE Trans. Electron Devices. 2001. Vol. 48, no. 7. P. 1442–1447. DOI:10.1109/16.930664.
11. Schaffer W. J., Negley G. H., Irvine K. G., Palmour J. W. Conductivity anisotropy in epitaxial 6H and 4H SiC // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1994. Vol. 339. P. 595–600. DOI:10.1557/PROC-339-595.
12. Arora N. D., Hauser J. R., Roulston D. J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 1982. Vol. ED-29, no. 2. P. 292–295. DOI:10.1109/T-ED.1982.20698.
13. Karmann S., Suttrop W., Schöner A. [et al.]. Chemical vapor deposition and characterization of undoped and nitrogen-doped single crystalline 6H-SiC // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72. P. 5437–5442. DOI:10.1063/1.351985.

УДК 635.36

Е.В. Иванова, М.А. Прозорова, Д.Н. Коротяев¹

Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Исследовано влияние инфракрасного лазерного излучения ($\lambda=10,6$ мкм) на оптические свойства полимерных материалов. Проведен анализ экспериментальных зависимостей плотностей пропускания лазерного излучения при различных режимах облучения. Установлено, что изменение условий облучения влияет на молекулярную подвижность. Дано объяснение полученных результатов с точки зрения соотношения излучательной и безызлучательной релаксаций энергии возбужденных состояний.

Ключевые слова: лазерное излучение, полимер, молекулярная подвижность.

Разработка перспективных технологий модификации структуры полимерных материалов (ПМ) в значительной мере связана с применением лазерного излучения (ЛИ). В некоторых работах [1, 2] было показано, что лазерный нагрев ПМ в ряде случаев приводит к иному результату, чем термическое воздействие.

Исследование влияния инфракрасного (ИК) ЛИ на структуру ПМ основано на установленной взаимосвязи оптических свойств этих материалов с интенсивностью молекулярной подвижности. При размораживании нового вида молекулярной подвижности происходит увеличение коэффициента поглощения ЛИ, а следовательно, изменяются оптические свойства ПМ.

Известно [3], что изменение оптических свойств ПМ связано с изменением соотношения между вероятностями излучательной и безызлучательной составляющих релаксации энергии. Следует предположить, что при увеличении молекулярной подвижности возрастает скорость переноса энергии. Это увеличивает вклад безызлучательной составляющей релаксации энергии, тем самым увеличивается доля энергии ЛИ, переходящей в энергию молекулярного движения.

Экспериментальная часть. Изучение оптических свойств ПМ проводили в области физических релаксаций, когда нет деструкционных процессов. В качестве источника ЛИ использовали CO₂-лазер ($\lambda=10,6$ мкм). Облучение осуществлялось в трех режимах: непрерывном и двух импульсных ($\tau_{и1}=0,0042$ с, $\tau_{и2}=0,0008$ с). Дополнительно использовали режим обработки с обдувом воздухом, что приводит к некоторому понижению температуры ПМ, и, следовательно, к увеличению вероятности излучательной релаксации. Лазерное облучение осуществлялось сканированием по поверхности ПМ.

Мощность ЛИ определяли измерителем мощности ИМО-4С. Ввиду того, что мощность пучка испытывает колебания, среднее значение мощности определялось по 25–30 измерениям.

Исследование температурных переходов проводили с использованием стандартной высокотемпературной приставки УВД-2000.

Как показано в [4], зависимости плотностей потока энергии ЛИ отражения и пропускания подобны, а рассеяние по величине на несколько порядков ниже, чем пропускание. Поэтому измеряли только зависимости пропускания от плотности потока энергии ЛИ, падающей на ПМ при комнатной температуре.

Сравнение оптических характеристик ПМ проводилось при условии равенства средней плотности потока энергии ЛИ, падающей на образец (J_0). В ходе экспериментов измерялись значения средней ($J_{ср}$) и пиковой ($J_{пик}$) плотностей потока энергии ЛИ. Эти данные представлены в таблице. В случае непрерывного режима облучения $J_{ср} = J_0$.

В качестве объектов исследования использовали пленочные ПМ: поликапроамид (ПКА), толщина пленок $d = 84$ мкм; поливинилхлорид (ПВХ), толщина пленок 25–30 мкм.

Таблица 1

Значения средней и пиковой плотностей энергии ЛИ

Режимы				
Непрерывный	Импульсный			
Режим 1	Режим 2		Режим 3	
	$\tau_{и1}=0,0042$ с		$\tau_{и2}=0,0008$ с	
$J_0, \text{Вт/см}^2$	$J_{ср}, \text{Вт/см}^2$	$J_{пик}, \text{Вт/см}^2$	$J_{ср}, \text{Вт/см}^2$	$J_{пик}, \text{Вт/см}^2$
1,00	1,00	3,00	0,98	30,57
0,90	0,92	2,67	0,90	28,12
0,80	0,80	2,35	0,78	24,45

0,70	0,71	2,05	0,70	21,80
0,60	0,61	1,78	0,61	18,90
0,50	0,50	1,47	0,49	15,28
0,40	0,39	1,15	0,40	12,63
0,30	0,31	0,90	0,29	8,97
0,20	0,22	0,63	0,20	6,11
0,10	0,11	0,31	0,10	3,16

Обсуждение результатов. На рис.1 и рис. 2 приведены зависимости $J_{пр}$ (J_0) для образцов ПКА. В областях $J_0 > 0,2$ Вт/см² и $J_0 > 0,5$ Вт/см² наблюдается увеличение поглощения энергии ЛИ. Аналогичные зависимости наблюдаются и при обдуве воздухом. В количественном отношении пропускание при обдуве на 5-6 % больше пропускания при комнатной температуре.

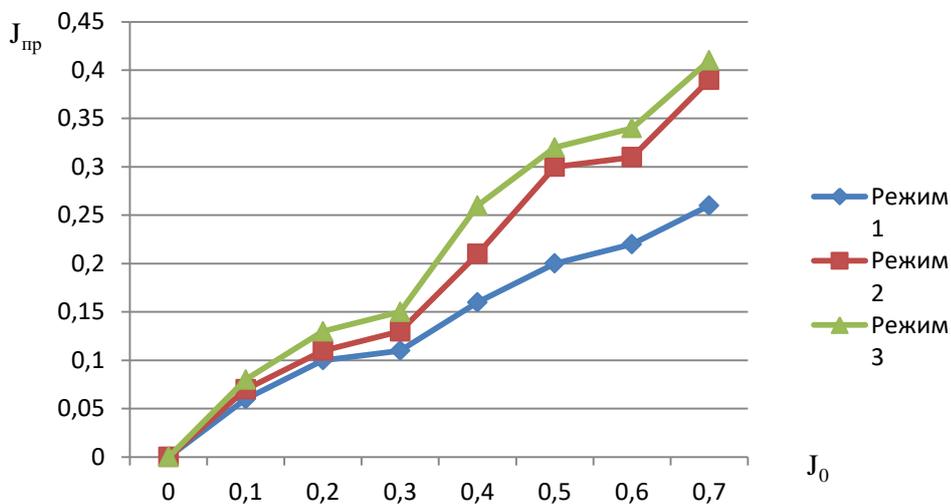


Рис. 1. Зависимость $J_{пр}$ (J_0) для ПКА при комнатной температуре

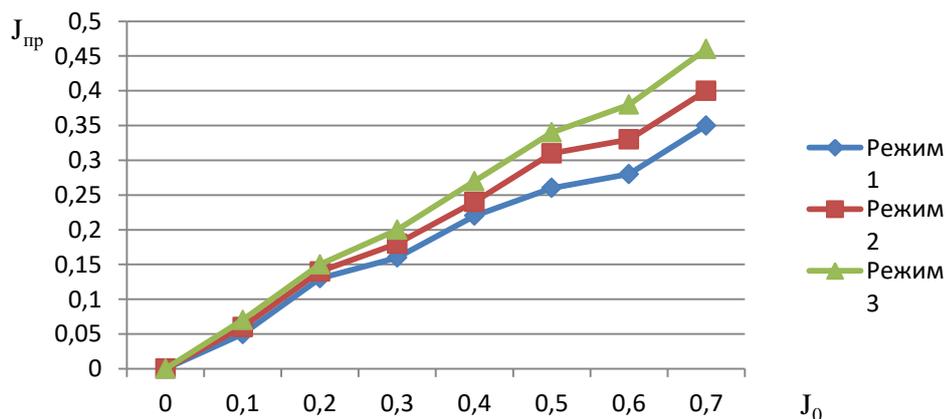


Рис. 2. Зависимость $J_{пр}$ (J_0) для ПКА при обдуве воздухом

Температура образцов ПКА в зоне лазерного воздействия при $J_0 \sim 0,2$ Вт/см² соответствует ~ 45 °С, а при $J_0 \sim 0,5$ Вт/см² соответствует ~ 67 °С. По данным [4], при 45 °С в

ПКА наблюдается температурный, колебательно-конформационный переход в кристаллитах. Увеличение поглощения при $J_0 > 0,5 \text{ Вт/см}^2$ связано с приближением к температуре стеклования ПКА [4].

Следует отметить, что максимальное значение J_0 для ПКА было $0,7 \text{ Вт/см}^2$. При $J_0 > 0,7 \text{ Вт/см}^2$ наблюдается разброс значений пропускания $J_{\text{пр}}(J_0)$, что связано с диффузией молекул воды, поэтому диапазон J_0 был уменьшен.

На рис.3 и рис. 4 приведены зависимости $J_{\text{пр}}(J_0)$ для образцов ПВХ. При $J_0 \sim (0,6 \div 0,7) \text{ Вт/см}^2$ наблюдается некоторое увеличение поглощения, а при $J_0 > 0,9 \text{ Вт/см}^2$, наоборот, происходит увеличение пропускания с ростом J_0 .

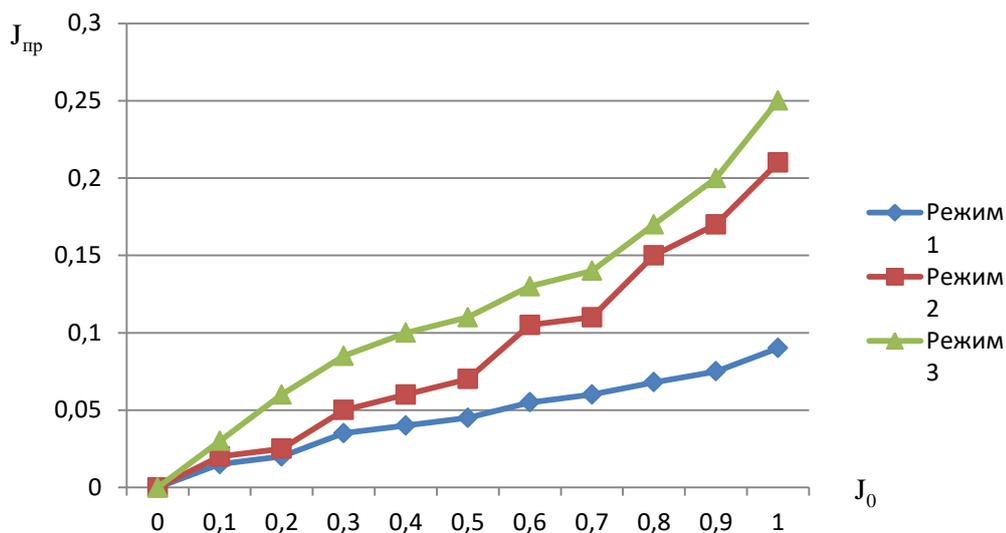


Рис. 3. Зависимость $J_{\text{пр}}(J_0)$ для ПВХ при комнатной температуре

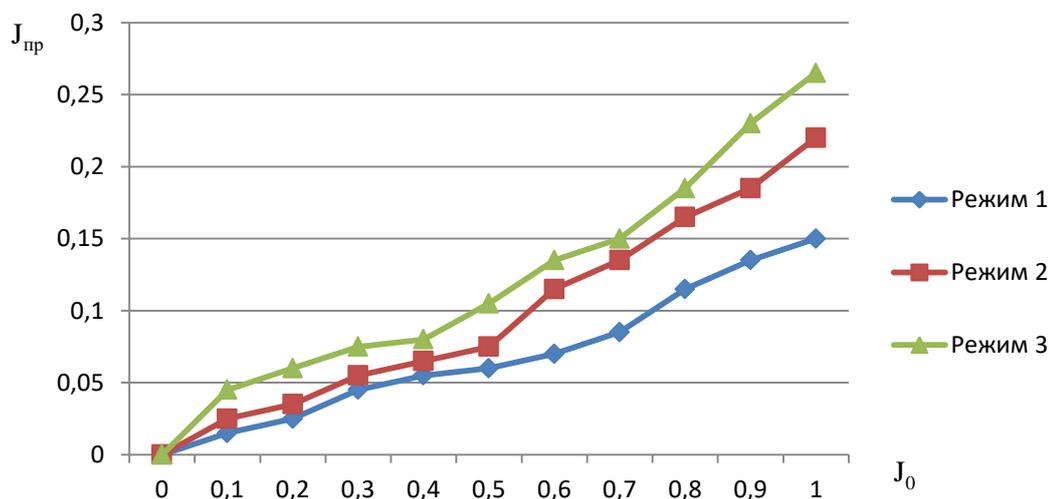


Рис. 4. Зависимость $J_{\text{пр}}(J_0)$ для ПВХ при комнатной температуре

Аналогичные зависимости наблюдаются на рис. 4 в условиях обдува воздухом. В количественном отношении пропускание при обдуве на 7–11 % больше, чем при комнатной температуре.

В некоторых работах высказывается предположение, что в области $\sim (72\div 77)^{\circ}\text{C}$ для ПВХ при рассмотрении температурной зависимости диэлектрической проницаемости обнаружен резкий максимум – аналог точки Кюри, т.е. это температура перехода типа «порядок-беспорядок». Поэтому некоторое увеличение пропускания в области $J_0 > 0,9 \text{ Вт/см}^2$ можно отнести к этому температурному переходу. Этот температурный переход относят к переходу стеклования в кристаллитах.

Изменение пропускания при $J_0 \sim 0,1 \text{ Вт/см}^2$ и $J_0 \sim 0,6 \text{ Вт/см}^2$, по-видимому, связано с наличием остатков растворителя. Пленки ПВХ получают из 5 % раствора диметилформамида, который в дальнейшем удаляют термообработкой в термостате.

Обсуждение экспериментальных данных. Полученные результаты свидетельствуют об изменении коэффициента пропускания (поглощения) ЛИ при изменении условий облучения ПМ. Формирование потоков пропускания, рассеяния и отражения ЛИ связано с радиационной (излучательной) составляющей релаксации энергии ЛИ, а нагрев ПМ обусловлен поглощением энергии ЛИ за счет безызлучательной составляющей релаксации энергии возбужденных состояний. Другими словами, возбуждение снимается либо за счет испускания кванта той же частоты, что и поглощенный, либо за счет внутренних процессов переноса энергии, приводящих в конечном итоге к увеличению интенсивности молекулярного движения, т.е. нагреву ПМ.

С увеличением интенсивности молекулярного движения ускоряются процессы переноса энергии, что одновременно уменьшает вероятность радиационной релаксации энергии возбужденного состояния. Чем больше подвижность, тем больше вероятность «снятия» возбуждения за счет внутри- и межмолекулярного обмена, что уменьшает вероятность испускания фотона той же частоты, что и поглощенный. Поэтому «замораживание» молекулярной подвижности за счет обдува воздухом увеличивает интенсивность пропущенного образцом ЛИ.

Общие выводы. Из представленных зависимостей следует, что изменение условий облучения влияет на пропускание ЛИ.

1. Переход от непрерывного режима облучения к импульсному приводит к увеличению пропускания.

2. При уменьшении длительности импульса наблюдается увеличение пропускания.

3. Понижение температуры ПМ за счет обдува воздухом также приводит к увеличению пропускания ЛИ.

Библиографический список

1. Захаров Л. А., Булгакова Н. М. Численное моделирование лазерной абляции металлов и полимеров при воздействии импульсами инфракрасного излучения: влияние начальной температуры образца // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2010. Т. 5, № 1. С. 37–47.

2. Dong L., Makradi A., Ahzi S., Remond Y., Sun X. Моделирование процесса уплотнения порошков частично кристаллических полимеров при селективном лазерном спекании на примере полиамида-12 // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2008. Т. 50, № 6. С. 1067–1073.

3. Ремизов А. Б., Камалова Д. И. Замораживание конформационной подвижности малых молекул (зондов) в стеклообразных полимерах и вторичные релаксационные переходы // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2007. Т. 49, № 5. С. 779–785.

4. Бартенев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров. Л.: Химия, 1990. 432 с.

О.А. Ивченко, А.А. Бабарико¹

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), Омск, Россия

¹Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВОЙ ПЕРЕПРАВЫ МЕТОДАМИ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Аннотация. В статье приведены результаты радиолокационного зондирования пресного ледового покрова с помощью георадара ОКО-3 с антенным блоком на 1000 МГц, а также результаты лабораторных анализов проб воды и талой воды, полученной из образцов льда, на соленость в пересчете на хлористый натрий при помощи кондуктометра МУЛЬТИТЕСТ КСЛ-111.

Ключевые слова: георадиолокация, ОКО-3, радарограмма, соленость, ледовая переправа.

Георадиолокация широко применяется для решения задач подповерхностного картирования, в том числе, при проектировании ледовых переправ. С целью проектирования проводят работы по измерениям глубины водоемов, толщины ледовых покровов, а также определяют прочностные характеристики льда и состояние снежных покровов. Кроме того, в месте расположения ледовой переправы не должно быть полыней, выходов грунтовых вод, мест сброса теплых вод, нагромождений торосов и др. [1]. Одним из методов оперативного получения достоверной информации при проектировании ледовых переправ в соответствии с требованиями ОДН 218.010-98 является георадиолокация.

Большинство работ, посвященных исследованию ледовых покровов пресных и засоленных водоемов, сводится к определению толщины ледового покрова, а также диэлектрических характеристик льда и воды с целью уточнения толщины льда и глубины водоема. Однако, многие исследователи не учитывают тот факт, что лед имеет слоистую структуру и при переходе от слоя к слою физико-химические характеристики льда могут существенно изменяться, что в свою очередь отражается на его прочностных свойствах.

В данной работе представлены результаты георадиолокационного исследования ледового покрова Черлакской переправы (Омская область), проводимые в марте 2019 года. Среднесуточная температура на момент измерений колебалась в пределах от -3 до 0 °С. Температура льда на поверхности составляла -2 °С, температура воды $+0,05$ °С.

Исследования выполнялись антенным блоком АБ-1000 георадара ОКО-3. Центральная частота работы антенны – 1000 МГц, заявленная глубина зондирования и разрешающая способность – соответственно 1,5 и 0,05 м [2]. Обработка радарограмм выполнялась в ПО Geoscan32. На рис. 1 представлен фрагмент полученной радарограммы.

На радарограмме четко видны отражения от границы вода-лед, а на глубине 10–20 и 20–30 см прослеживаются отражения от границы раздела сред, также имеющих различную диэлектрическую проницаемость. Эти отражения накладываются на сигнал прямого прохождения, что затрудняет интерпретацию результатов. Предположительно наблюдаемые отражения происходят от границы слоев льда, существенно отличающихся соленостью. С целью проверки гипотезы были отобраны образцы воды и льда на всю глубину ледового покрова через каждые 10 см по глубине вдоль трасс радарограмм в пределах ледовой переправы.

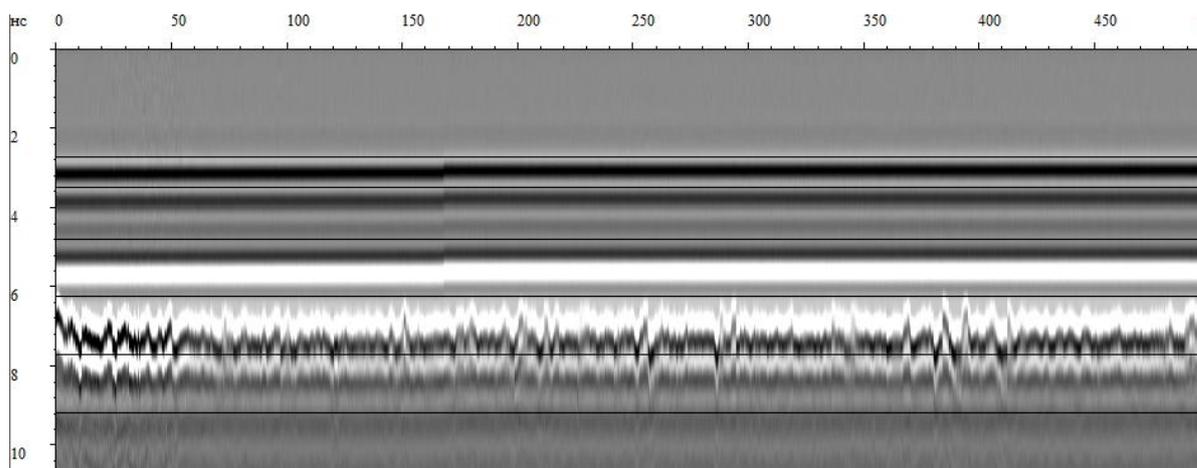


Рис. 1. Фрагмент радарограммы Черлакской ледовой переправы (март 2019 года)

В лабораторных условиях были проведены исследования на соленость в пересчете на хлористый натрий проб воды и талой воды, полученной из образцов льда, при помощи кондуктометра МУЛЬТИТЕСТ КСЛ-111.

Соленость воды составила 113–117 мг/л. Результаты исследования проб талой воды, полученной из образцов льда, послойно представлены в таблице 1.

Таблица 1

Соленость проб талой воды, полученной из образцов льда послойно

Номер образца	Глубина, см	Соленость, мг/л	Номер образца	Глубина, см	Соленость, мг/л
1	10	22,14	2	10	39,57
	20	8,921		20	8,275
	30	3,265		30	2,062
	40	2,498		40	2,917
	50	1,48		50	3,28
	60	1,093		60	2,842

Лабораторные исследования образцов показали, что ледовый покров имеет сравнительно одинаковую соленость, начиная с глубины примерно 30 см от границы воздух-лед, а выше от слоя к слою соленость меняется значительно, что свидетельствует о правильности выдвинутой нами ранее гипотезы. Таким образом, мы приходим к выводу о том, что при интерпретации радарограмм необходимо учитывать слоистую структуру ледового покрова, а также параллельно с радиолокационными измерениями и исследованиями прочностных характеристик льда проводить исследования его химического состава, в частности солености образцов послойно, учитывая разрешающую способность применяемых в исследовании георадаров.

Библиографический список

1. Отраслевые дорожные нормы. Автомобильные дороги общего пользования. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ. ОДН 218.010-98. Режим доступа: http://snipov.net/c_4832_snip_101571.html.

2. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3». Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. ООО «ЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ» Режим доступа: http://www.geotech.ru/images/georadary/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf.

С.И. Мазур, Г.И. Косенко¹, Р.С. Курманов², О.М. Сухарева

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), Омск, Россия

²Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ КАСНИЯ ЯДЕР С ПОТЕНЦИАЛАМИ ПАШКЕВИЧА И ГРОССА-КАЛИНОВСКОГО

Аннотация. Для описания реакций слияния–деления ядер применяют различные модели. Авторы используют двухшаговую модель, на первом этапе которой моделируется сближение сталкивающихся ионов до момента их касания, а на втором рассматривается динамика образовавшейся моносистемы. Для расчета ядерного потенциала используется потенциал Пашкевича. В работе приводятся результаты расчета динамики сближения двух ядер на примере реакций $^{16}_8\text{O} + ^{208}_{82}\text{Pb}$ и $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{208}_{82}\text{Pb}$.

Ключевые слова: тяжелые ионы, сечение касания ядер.

В последние десятилетия был достигнут большой прогресс в синтезе новых элементов периодической системы Д.И. Менделеева. Был достигнут предел последнего – седьмого – периода и синтезирован 118 элемент – оганесон. Следующий элемент начнет новый период. Для ускорения этого события работают не только экспериментаторы, но и теоретики. Авторы взяли на себя смелость присоединиться к усилиям последних.

В развитую ранее двухшаговую модель процесса слияния-деления ядер авторы стремятся внести улучшения. В модели для описания ядерного взаимодействия используют потенциал типа Вудс-Саксона – потенциал Гросса-Калиновского (ГК) [1]:

$$U(r) = \frac{1}{2} (U_{12}(r) + U_{21}(r)), \quad (1)$$

$$U_{12}(r) = \int V_1(r - r') \rho_2(r') d^3r', \quad (2)$$

$$V = \frac{V_0}{1 + \exp\left[\frac{r - R_1}{a_V}\right]}, \quad (3)$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left[\frac{r - R_2}{a_d}\right]} \quad (4)$$

Здесь $R_1 = 1.25A_1^{1/3}$, а $R_2 = 1.12A_2^{1/3} - 0.86A_2^{-1/3}$. A_i – массовое число первого или второго ядра, соответственно. Параметры $\rho_0 = 0.17 \text{ фм}^{-3}$, $a_d = 0.54 \text{ фм}$, $V_0 = 50 \text{ МэВ}$, $a_V = 0.65 \text{ фм}$. Используется три набора параметров V_0 и a_V для ядер разной массы [2].

В работах [3, 4] нами было предложено использовать вместо потенциала ГК потенциал Пашкевича [5], у которого глубина потенциала зависит от A и Z ядра и определяется как:

$$V_{0(p,n)} = 49.65 (1 \pm 0.862(N - Z)/A), \quad (5)$$

а диффузность $a_V = 0.7 \text{ фм}$ одинакова для всех ядер.

Для оценки нового потенциала были проведены динамические расчеты с использованием уравнений Ланжевена:

$$\dot{r} = \frac{p_r}{\mu}, \quad (6)$$

$$\dot{p}_r = -\frac{dV}{dr} - \frac{K_r p_r}{\mu} + \xi, \quad (7)$$

$$V = V_n + V_c + V_l, \quad (8)$$

$$V_l = \frac{1}{2} \frac{L^2 \hbar^2}{\mu s^2 + J_1 + J_2} \quad (9)$$

J_1, J_2 – моменты инерции ядер. $J_i = \frac{2}{5} m_i R_i^2$, μ – приведенная масса ядер, ξ – случайная сила. K_r – радиальный коэффициент трения:

$$K_r = K_{r0} \left(\frac{dv_n}{dr} \right)^2. \quad (10)$$

Параметр $K_{r0} = 0.035$ для потенциала GK был предложен в [1, 2]. Наряду с этим используется значение 0.040. Поэтому для расчета с новым потенциалом мы проварьировали этот параметр и выполнили расчет с $K_{r0} = 0.030, 0.035, 0.040$.

В работе проводился вычислительный эксперимент динамики слияния двух недеформируемых сферических ядер для различных энергий. Было рассчитано $N_{tot} = 10^4$ событий для каждой энергии. Вероятность касания T_L определяется как отношение числа систем, достигших точки касания, N_{touch} к полному числу событий N_{tot} . Таким образом,

$$T_L = \frac{N_{touch}(E, L)}{N_{tot}(E, L)}. \quad (11)$$

На рис. 1 показаны зависимости вероятности касания ядер T_L от углового момента L для различных значений энергий налетающих частиц E_{cm} в реакции ${}^{16}_8\text{O} + {}^{208}_{82}\text{Pb}$. Для вероятностей, полученных с использованием потенциала Пашкевича, применялся параметр $K_{r0} = 0.030, 0.035, 0.040$, и, как видно на рисунке, при его увеличении падает вероятность касания, т.к. увеличивается трение в системе. Для низких энергий вероятность касания T_L , вычисленная с использованием потенциала GK, лежит ниже остальных. Но с ростом энергии она увеличивается относительно других и для энергии $E_{cm} = 102 \text{ МэВ}$ примерно равна вероятности, рассчитанной с использованием потенциала Пашкевича с параметром $K_{r0} = 0.035$. T_L , в свою очередь, является основополагающей величиной при расчете сечения касания $\sigma(E)$:

$$\sigma(E) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \sum_L T_L(E) (2L + 1) \quad (12)$$

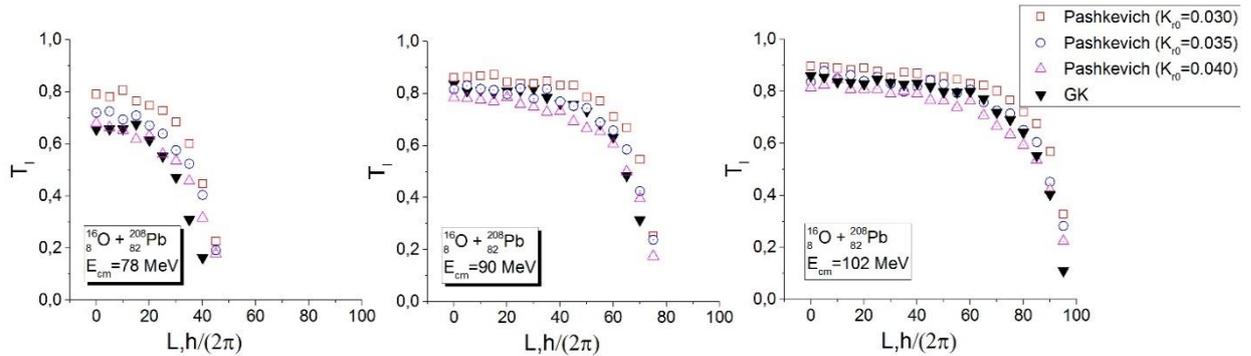


Рис. 1. Зависимость вероятности касания ядер T_L от углового момента L для значений энергий налетающих частиц $E_{cm} = 78, 90, 102 \text{ МэВ}$ в реакции ${}^{16}_8\text{O} + {}^{208}_{82}\text{Pb}$

На рис. 2 изображены сечения касания для реакции ${}^{16}_8\text{O} + {}^{208}_{82}\text{Pb}$, полученные с использованием рассматриваемых потенциалов, а также экспериментальные данные сечения слияния, взятые из [6]. Так как слияние происходит позже касания, то вероятность касания (а соответственно, и сечение касания) должна быть больше. Но, как видно на рисунке, сечение, рассчитанное с использованием потенциала GK, при небольших значениях энергий пересекает кривую экспериментальных значений, чего не наблюдается для сечений с потенциалом Пашкевича. При высоких значениях энергий рассчитанные сечения

практически не отличаются друг от друга и расположены выше сечения слияния, как и предполагалось.

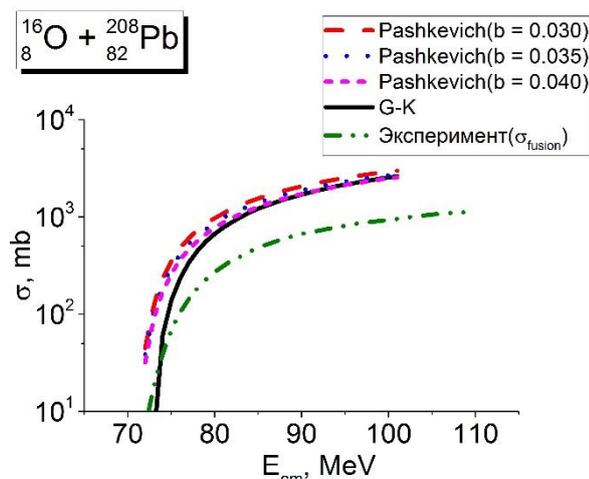


Рис. 2. Сравнение зависимостей сечения касания от энергии возбуждения, рассчитанных с использованием ядерного потенциала Гросса-Калиновского и Пашкевича, и экспериментально полученного сечения слияния для реакции $^{16}_8\text{O} + ^{208}_{82}\text{Pb}$

На рис. 3, как и на рис. 1, представлены зависимости вероятности касания ядер T_L от углового момента L для различных значений энергий налетающих частиц E_{cm} , но для более тяжелой реакции $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{208}_{82}\text{Pb}$. Видно, что для этой реакции поведение кривых схожее. Для малых энергий и угловых моментов вероятность касания при использовании потенциала GK меньше, чем при использовании потенциала Пашкевича. Для больших угловых моментов, независимо от энергии налетающих частиц, вероятность касания при использовании потенциала Пашкевича больше. Вероятно, это связано с большим значением параметра диффузности этого потенциала.

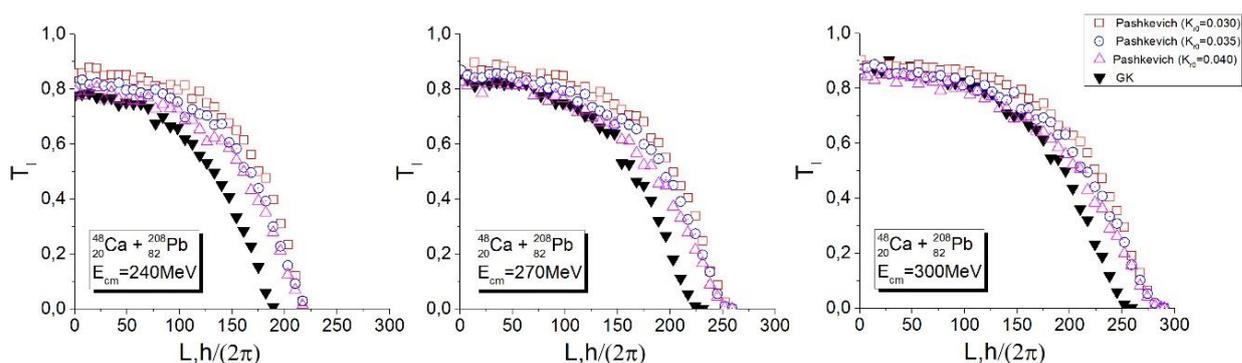


Рис. 3. Зависимость вероятности касания ядер T_L от углового момента L для значений энергий налетающих частиц $E_{cm} = 240, 270, 300$ МэВ в реакции $^{48}_{20}\text{Ca} + ^{208}_{82}\text{Pb}$

Таким образом, в работе была произведена проверка предложенного ранее потенциала Пашкевича и произведено сравнение с потенциалом GK для расчета вероятности касания ядер. Результаты по сечению касания, полученные с использованием потенциала GK, пересекаются с экспериментальными данными по сечению слияния, что не позволяет использовать его для малых энергий. Сечения, полученные с использованием потенциала Пашкевича, для всех энергий превосходят экспериментальные данные по сечению слияния.

В связи с этим, мы считаем, что использование этого потенциала целесообразно для моделирования входного канала реакции слияния-деления.

Библиографический список

1. Gross D. H. E., Kalinowski H. Friction model of heavy-ion collisions // *Physics Reports*. 1978. Vol. 45. №. 3. P. 175–210.
2. Froebrich P. Fusion and capture of heavy ions above the barrier: analysis of experimental data with the surface friction model. // *Phys. Rep.* 1984. Vol. 116, no. 6. P. 337–400.
3. Мазур С. И., Литневский В. Л., Курманов Р. С. [и др.]. Выбор потенциала для расчета сечения касания в реакциях с тяжелыми ионами // *Материалы VII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Актуальные проблемы современной науки»*, 20 апр. 2018 г. Омск: ОмГТУ, 2018. С. 106–109.
4. Мазур С. И., Косенко Г. И., Курманов Р. С. Выбор ядерного потенциала для расчета входного канала в реакциях с тяжелыми ионами. // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 174–187.
5. Pashkevich V. V. On the asymmetric deformation of fissioning nuclei // *Nucl. Phys.* 1971. Vol. A 169. P.275–293.
6. Morton C. R., Berriman A. C., Dasgupta M. [et al.]. Coupled-channels analysis of the $^{16}\text{O}+^{208}\text{Pb}$ fusion barrier distribution // *Physical Review C*. 1999. Vol. 60. 044608.

УДК 537.611.2

М.В. Мамонова, С.Н. Будько

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

РАСЧЕТЫ ИНТЕГРАЛОВ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СПЛАВЕ $\text{CO}_{1-x}\text{Ni}_x$ МЕТОДОМ КОРРИНГИ-КОНА-РОСТОКЕРА

Аннотация. В данной работе в рамках первопринципных расчётов с использованием программных комплексов VASP и SPR-KKR исследуются магнитные свойства сплава кобальта с никелем в зависимости от концентрации атомов никеля. Были рассчитаны значения полной энергии и магнитные моменты отдельных атомов Ni и Co в сплаве. Осуществлен расчет интегралов обменного взаимодействия для ближайших и следующих за ближайшими соседями.

Ключевые слова: первопринципные расчеты, программный комплекс VASP, программный комплекс SPR-KKR, обменный интеграл, магнитные свойства.

В ферромагнетиках при температуре меньше критической магнитные моменты атомов ориентируются параллельно друг другу [1]. Вследствие этого в твердом теле имеются области – домены – с большими спонтанными магнитными моментами. Поэтому ферромагнитные пленки применяют в микроэлектронике и вычислительной технике в качестве магнитных носителей для записи и хранения информации в запоминающих устройствах. Яркими представителями ферромагнетиков являются железо, кобальт и никель. Исследование этих металлов позволяет получать ценную информацию о магнитных свойствах ферромагнетиков, углублять наши знания по многим вопросам в области магнетизма.

Vienna Ab initio Simulation Package (VASP) – программа для моделирования материалов атомного масштаба из первых принципов [2]. В рамках VASP был применен метод проекционно-присоединенных волн (PAW) и псевдопотенциал в приближении GGA PBE.

В данной работе проводились расчёты в программном комплексе VASP постоянных решётки для Co, Ni и сплава $Co_{1-x}Ni_x$ с разной концентрацией Ni_x . На рис. 1 представлены схематические изображения ячеек сплава $Co_{1-x}Ni_x$ с разными концентрациями Ni_x . Рассчитанные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Результаты расчетов постоянных решётки
для Co, Ni и сплава $Co_{1-x}Ni_x$ с разной концентрацией**

a, Å	Co	$Co_{0,75}Ni_{0,25}$	$Co_{0,5}Ni_{0,5}$	$Co_{0,25}Ni_{0,75}$	Ni
VASP	3,517	3,514	3,516	3,510	3,513

Расчёты интегралов обменного взаимодействия проводились с использованием пакета SPR-KKR (спин-поляризованный релятивистский метод Корринги-Кона-Ростокера). Пакет SPR-KKR позволяет рассчитать электронную структуру произвольных трехмерных периодических систем [3].

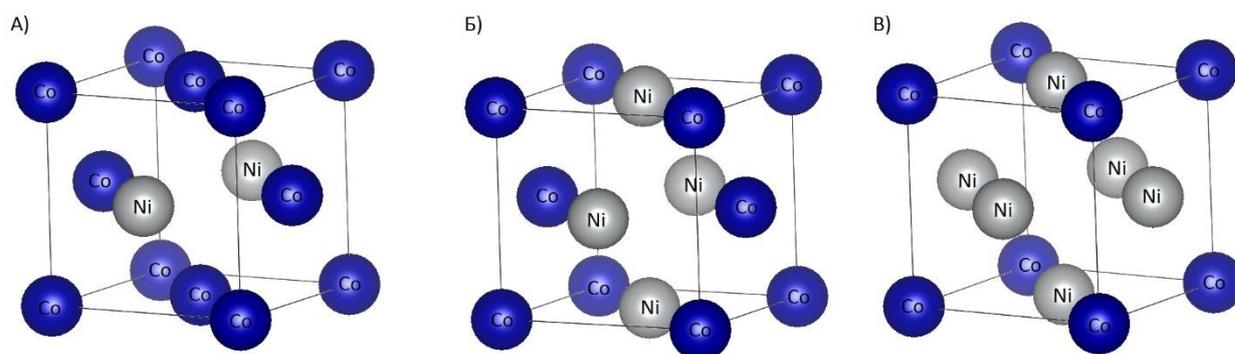


Рис. 1. Сплав $Co_{1-x}Ni_x$: а) $Co_{0,75}Ni_{0,25}$ б) $Co_{0,5}Ni_{0,5}$ в) $Co_{0,25}Ni_{0,75}$.

Расчеты выполнялись в два этапа. На первом проводились самосогласованные расчеты self-consistent field (SCF) потенциала и волновых функций многоэлектронной системы. На втором вычислялись функции Грина, которые применялись для вычисления обменного интеграла системы J_{ij} .

Основная идея метода ККР заключается в определении функции Грина для системы с фиксированной энергией. Для этого задается t-матрица, которая описывает рассеивание от каждого индивидуального атомного рассеивателя, охарактеризованное неперекрывающимися и пространственно ограниченными потенциалами. Совместное применение уравнения Дайсона, атомных t-матриц и структурных констант G позволяет задать так называемый оператор пути рассеяния τ^{ij} . Интересующие нас обменные константы входят в гамильтониан Гейзенберга в следующем виде [4]:

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} J_{ij} S_i S_j \quad (1)$$

Для вычислений параметров магнитного обменного взаимодействия в методе Коринги-Кона-Ростокера (KKR) между парами атомов в рамках теории многократного рассеяния применяются формулы Лихтенштейна:

$$J_{ij} = \frac{1}{4\pi} \text{Im} \int^{E_f} dE \text{Trace} (t_{i\uparrow}^{-1} - t_{i\downarrow}^{-1}) \tau_{\uparrow}^{ij} (t_{j\uparrow}^{-1} - t_{j\downarrow}^{-1}) \tau_{\downarrow}^{ij} \quad (2)$$

В таблице 2 представлены результаты \mathbf{z} момента μ_{orb} , где N_1 - количество ближайших атомов, а N_2 – количество атомов, следующих за ближайшими.

Таблица 2

Результаты расчетов энергии и магнитных моментов

	μ_{spin}, μ_B	μ_{orb}, μ_B	N_1	N_2
Co	1,5827	0,0713	12	6
$Co_{0,75} Ni_{0,25}$	1,6644	0,0799	12	6
$Co_{0,5} Ni_{0,5}$	1,6906	0,0811	12	6
$Co_{0,25} Ni_{0,75}$	1,7267	0,1016	12	6
Ni	0,5985	0,0497	12	6

Рассчитанные в пакете SPR-KKR средние значения обменного интеграла для ближайших соседей \bar{J}_1 и для следующих за ближайшими \bar{J}_2 приведены в таблице 3. Значение \bar{J}_1 и \bar{J}_2 – это среднее по ближайшим атомам. На рис. 2 изображена зависимость параметров обменного взаимодействия от расстояния между атомами R/a .

Таблица 3

Результаты расчетов обменных интегралов

	Co	$Co_{0,75} Ni_{0,25}$	$Co_{0,5} Ni_{0,5}$	$Co_{0,25} Ni_{0,75}$	Ni
$\bar{J}_1, 10^{-14}$ эрг	2,047	0,843	0,873	0,726	0,389
$\bar{J}_2, 10^{-14}$ эрг	0,127	-0,037	-0,068	-0,056	-0,009

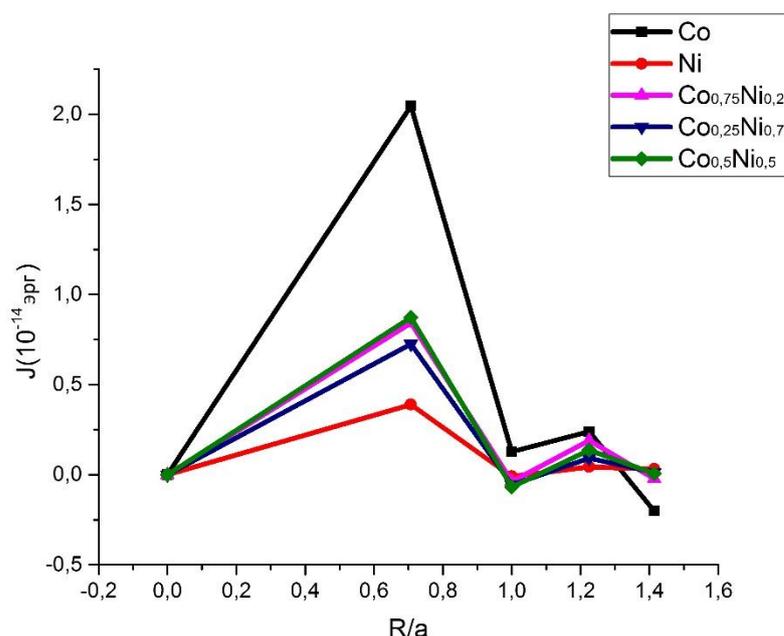


Рис. 2. Зависимость обменных интегралов от расстояния.

По результатам расчетов, приведенным в таблице 3 и на рис. 2, можно сделать следующие выводы. Для Co обменное взаимодействие носит ферромагнитный характер. У Ni же обменное взаимодействие следующих за ближайшими соседями имеет очень слабый антиферромагнитный характер $J_2 = -0,009 \times 10^{-14}$ эрг. В сплаве $Co_{1-x}Ni_x$ с увеличением концентрации никеля обменное взаимодействие ближайших соседей значительно

уменьшается. Обменное взаимодействие следующих за ближайшими соседями при не нулевой концентрации Ni имеет антиферромагнитный характер.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 17-02-00279, 18-42-550003, и гранта МД-6868.2018.2 Президента РФ. Для проведения расчетов были использованы ресурсы вычислительной лаборатории кафедры теоретической физики ОмГУ и ЦКП Центр данных ДВО РАН.

Библиографический список

1. Прудников В. В., Прудников П. В., Мамонова М. В. Квантово-статистическая теория твердых тел: учебное пособие. Омск: ОмГУ, 2014. 492 с.
2. Marsman M., Kresse G. VASP the GUIDE // Computational Materials Physics, Faculty of Physics, Universitat Wien. 2000. P. 1–233.
3. Huhne T., Zecha C., Ebert H. Full-potential spin-polarized relativistic Korringa-Kohn-Rostoker method implemented and applied to bcc Fe, fcc Co, and fcc Ni // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 11. P. 10236–10247.
4. Huhne T., Zecha C., Ebert H. A spin polarized relativistic Korringa-Kohn-Rostoker (SPR-KKR) code for Calculating Solid State Properties: manual. Munchen // University of Munich Dept. Chemistry – Phys. Chemistry. 2012. P. 1–108.

УДК 544.344.015.3

М.Д. Парфенова, М.В. Ламуева¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

¹Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

ИМИТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТРОЙНЫХ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ T-x-y ДИАГРАММ

Аннотация. Рассматривается идея разработки программ-тренажеров для подготовки квалифицированных специалистов в области исследования фазовых диаграмм многокомпонентных систем. Обсуждена проблема диаграммы Ф. Райнза с бинарным соединением $B_mC=R_3$, образующимся по реакции $R_2+B+C=R_3$ в качестве квазитройной фазы. Выполнена сборка компьютерной модели диаграммы О. Осинцева с 4-мя бинарными и двумя тройными соединениями.

Ключевые слова: программы-тренажеры, диаграммы состояния, многокомпонентные системы, 3D-моделирование, имитация спектров.

1. История компьютерных моделей пространственных диаграмм состояния

Для решения прикладных задач гетерогенного дизайна (ГД) [1, 2] необходимо создавать специальные компьютерные тренажеры для подготовки квалифицированных специалистов в области изучения многокомпонентных систем. Несмотря на то, что существует большое множество графических редакторов и пакетов САПР, они мало пригодны для работы с фазовыми диаграммами (ФД).

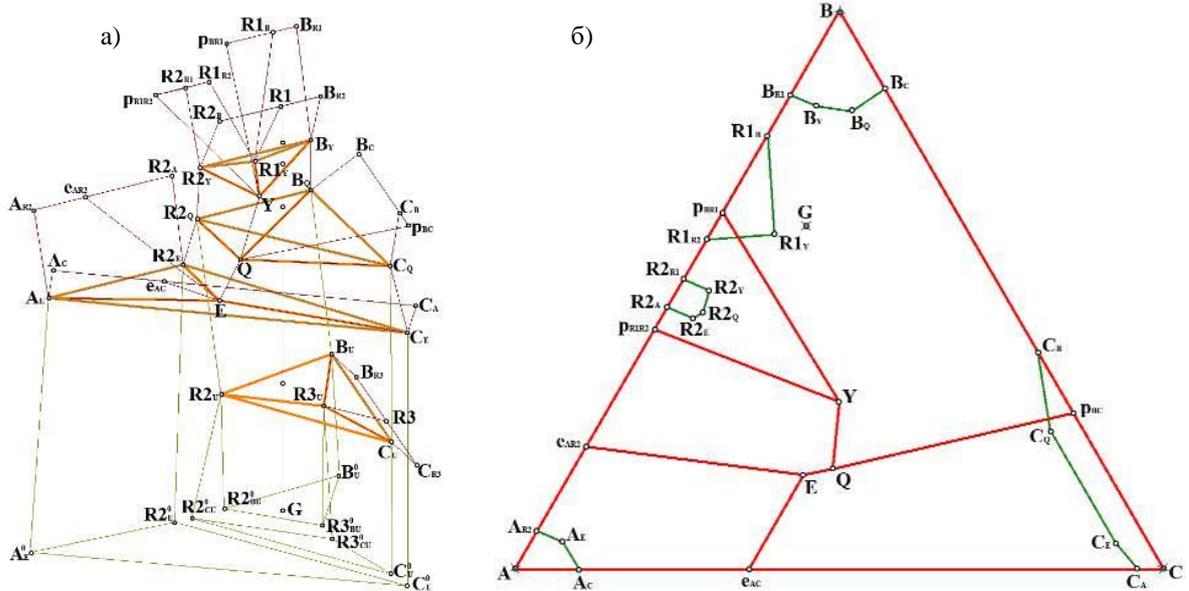


Рис. 1. 3D схема 13-ти трехфазных областей – а); сопряженные поверхности ликвидуса и солидуса на границе двухфазных областей L+I (I= A_mV(R1), A_nV(R2), A, B, C) и состав G – б)

Графические пакеты позволят лишь нарисовать ФД, в то время как помимо визуализации необходимо осуществлять проверку ФД на предмет правильного задания ее геометрической модели, строить и производить расшифровку ее разрезов, рассчитывать материальный баланс для произвольно взятого состава при определенной температуре, отображать траектории движения материальных точек по сопряженным поверхностям для любого первичного расплава, воспроизводить диаграммы вертикального и горизонтального материальных балансов, генерировать кривые электропроводности и спектры термического и рентгенофазового анализов для заданных составов и т.д.

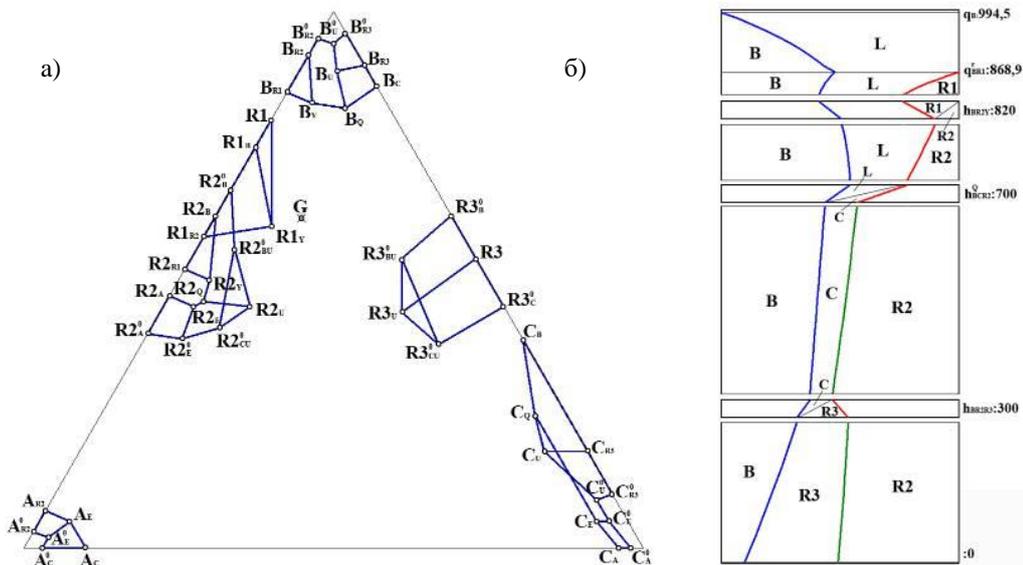


Рис. 2. Нелинейчатые поверхности v_{II} и v_{JI} на границах 2-фазных областей I+J: $v_{BC}(B_C B_Q B_U B_{R3}) - v_{CB}(C_B C_Q C_U C_{R3})$, $v_{CA}(C_A C_E C^0 E C^0_A) - v_{AC}(A_C A_E A^0 E A^0_C)$, $v_{BR1}(B_{R1} B_{R2} B_Y) - v_{R1B}(R1_B R1_R1_Y)$, $v_{BR2}(B_{R2} B_Y B_Q B_U B^0_U B^0_{R2}) - v_{R2B}(R2_B R2_Y R2_Q R2_U R2^0_{BU} R2^0_B)$, $v_{BR3}(B_{R3} B_U B^0_U B^0_{R3}) - v_{R3B}(R3_R3_U R3^0_{BU} R3^0_B)$, $v_{AR2}(A_{R2} A_E A^0 E A^0_{R2}) - v_{R2A}(R2_A R2_E R2^0_{ER} R2^0_A)$, $v_{CR3}(C_{R3} C_U C^0_U C^0_{R3}) - v_{R3C}(R3_R3_U R3^0_{CU} R3^0_C)$, $v_{R1R2}(R1_{R2} R1_R1_Y) - v_{R2R1}(R2_{R1} R2_B R2_Y)$, $v_{R2C}(R2_E R2_Q R2_U R2^0_{CU} R2^0_E) - v_{CR2}(C_E C_Q C_U C^0_U C^0_E)$, $v_{R2R3}(R2_U R2^0_{BU} R2^0_{CU}) - v_{R3R2}(R3_U R3^0_{BU} R3^0_{CU})$ – а); вертикальный матбаланс для расплава G – б)

Количество прикладных задач и требования для более подробного исследования ФД быстро растут. Возникает необходимость построения и исследования диаграмм состояния четверных и более сложных систем. Такие задачи невозможно разрешить с помощью традиционного графического редактора. Специализированные программы «сборки» ФД из поверхностей и фазовых областей [3] ускоряют усвоение и применение «языка ФД» (по терминологии Ф. Райнза) для решения задач ГД (компьютерного конструирования микроструктур гетерогенных материалов).

2. Компьютерная сборка виртуальных Т-х-у диаграмм

2.1. *Диаграмма Ф. Райнза с появлением бинарного соединения $VmC=R3$ в виде квазитройного* [4, р. 208; 5, с. 238]. Диаграмма (рис. 1–3) с температурным рядом $V > p_{BR1} = R1_B = B_{R1} > p_{R1R2} = R2_{R1} = R1_{R2} > A = R1 = R2_B = B_{R2} > Y = R2_Y = R1_Y = B_Y > e_{AR2} = R2_A = A_{R2} > p_{BC} = C_B = B_C > C > Q = R2_Q = C_Q = B_Q > e_{AC} = C_A = A_C > E = R2_E = C_E = A_E > R3_U = R2_U = C_U = B_U > R3 = C_{R3} = B_{R3} > I^0_J$ (I^0_J – 19 точек на основании концентрационного треугольника) кодируется в виде 59-85-34 (точки–поверхности–области). Линейчатые поверхности (39 штук) на контуре 13-ти трехфазных областей (рис. 1, а) формируются скольжением горизонтальных одномерных вдоль контуров нелинейчатых поверхностей (ликвидуса, солидуса, сольвуса, трансуса...). Четыре горизонтальных комплекса состоят из 12 двумерных симплексов. Точки на контурах границ двухфазных областей с расплавом (рис. 1, б) взяты с контуром линейчатых поверхностей и дополнены точками плавления компонентов: А, В и С. Аналогично, контуры 20 сольвусных поверхностей на границах десяти двухфазных субсолидусных областей (рис. 6, а) дополнены 19 точками на основании концентрационного треугольника: $A^0_{R2}, A^0_C, A^0_E, B^0_{R2}, B^0_{R3}, B^0_U, C^0_A, C^0_{R3}, C^0_U, C^0_E, R2^0_A, R2^0_B, R2^0_{BU}, R2^0_{CU}, R2^0_E, R3^0_B, R3^0_C, R3^0_{BU}, R3^0_{CU}$. Только две двухфазные области – $R2+C, R2+R3$ – не примыкают к границам концентрационного треугольника. В процессе кристаллизации расплава G восстановленный к его составу перпендикуляр пересекает поверхности $q_B, q^r_{BR1}, h_{BR2Y}, h^Q_{BCR2}, h_{BR2R3}$ (рис. 2, б). При 994 °С начинается первичная кристаллизация В. Вторичная кристаллизация R1 происходит в интервале 869-820 °С при уменьшении содержания расплава и первичных кристаллов В. Фаза R1 разлагается при 820 °С на R2, В и расплав. В результате, те места, которые ранее занимала фаза R1, заполняются фазой R1 совместно с расплавом и кристаллами В. Кристаллизация этого расплава завершается при 700 °С по изотермической реакции с В и образованием $R2+C$. Наконец, при 300 °С В и R2 реагируют с образованием R3. “Вся фаза С должна быть поглощена, если эта заключительная реакция пройдет до конца. Однако, похоже, что перитектоидная реакции при низкой температуре до конца не идет. Следовательно, предполагается, что фаза R3 появится лишь частично, с сохранением определенных количеств тех фаз, которые расходуются на ее образование” [4, р. 212; 5, с. 243].

2.2. *Диаграмма О.Осинцева с шестью двойными и двумя тройными соединениями* [6, с. 329]. Температурный ряд: $A > C > S_2 > V > N > S_1 > e_7 > p_2 > p_1 > e_6 > e_2 > P_2 > e_1 > e_5 > e_4 > e_3 > P_1 > P_3 > P_4 > P_5 > P_6 > P_7 > E_1 > E_2$ (рис. 4). Здесь все P_1-P_3 и P_5-P_7 – это квазиперитектики, обозначаемые символом Q (твердая фаза взаимодействует с расплавом с образованием двух новых твердых фаз), только P_4 – перитектика (две твердые фазы взаимодействуют с расплавом с образованием новой твердой фазы). В диаграмме 61 область, а именно: трехфазных – 26; двухфазных – 26; однофазных – 9. Поверхности: q_I – 9; s_I – 9; v_{II} – 34; q^r_{II} – 34; s^f_{II} – 17; v^r_{II} – 27; h_{IIIK} – 36.

3. **Программы-тренажеры.** Построение ФД связано с большими затратами труда, с расходами дорогостоящих реактивов, электроэнергии, с использованием уникального и дефицитного оборудования. Принято считать, что для построения Т-х-у диаграммы средней сложности потребуется совместная работа двух опытных исследователей на протяжении 5–10 лет [3, 4]. С повышением компонентности системы конструкция ее ФД многократно

усложняется. Кроме снижения расходов на исследование ФД, необходимо также решать задачи подготовки квалифицированных специалистов для таких исследований. Опыт создания компьютерных моделей ФД позволяет приступить к разработке тренажеров для исследователей многокомпонентных систем.

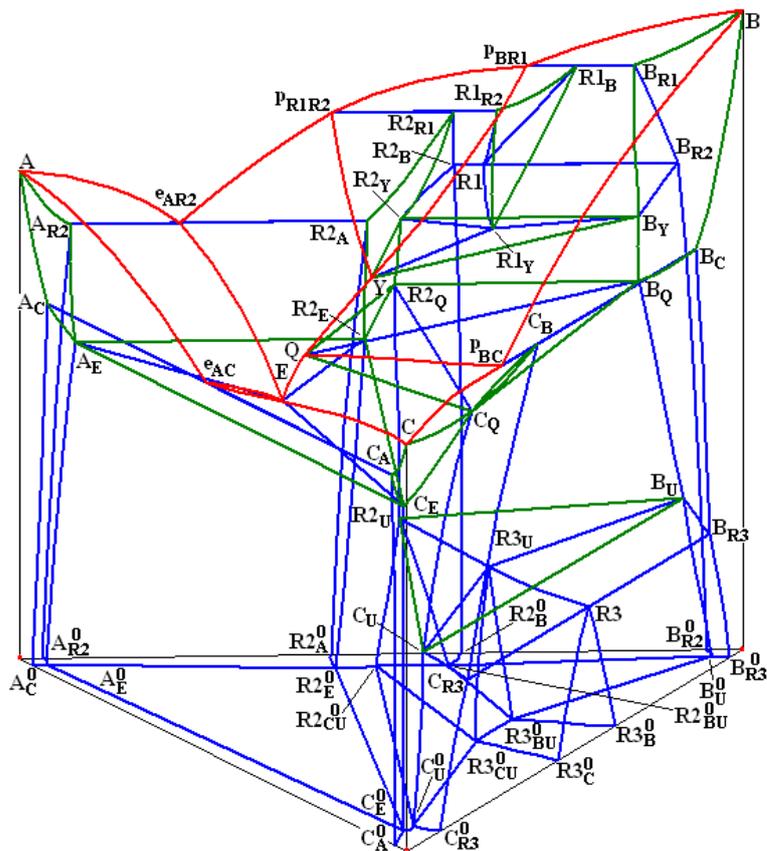


Рис. 3. Обозначение базовых точек на контурах поверхностей

Такие тренажеры должны включать 3 основных блока: 1) база компьютерных моделей ФД различных топологических типов; 2) блок генерации квазиэкспериментальных данных (спектров термического и рентгенофазового анализов; кривой электропроводности; кристаллографических шлифов, ...); 3) блоки имитации рациональных технологий исследования и извлечения скрытых в диаграммах знаний (проекционно-термографический метод ПТГМ для поиска невариантных составов, исследование результатов конкуренции кристаллов различной дисперсности на перитектических этапах невариантных реакций и моновариантных реакций со сменой эвтектического взаимодействия на перитектическое, оценка точности определения координат невариантных состояний и др.).

Заключение

Предложена идея создания тренажеров для подготовки квалифицированных специалистов в области гетерогенных равновесий и компьютерного конструирования материалов. Описаны возможности тренажеров для построения и исследования Т-х-у диаграмм. Компьютерные модели Т-х-у диаграмм позволяют по данным о строении границ двухфазных областей воссоздать всю конструкцию диаграммы, включая линейчатые поверхности и горизонтальные плоскости невариантных четырехфазных реакций, и проанализировать материальные балансы для любого состава и при любой температуре. Такая модель воспроизводит этапы кристаллизации в любой части системы, позволяя расшифровывать фенотип соответствующего материала и совершенствовать технологии его получения.

Библиографический список

1. Lutsyk V., Vorobjeva V., Parfenova M. Quaternary Reciprocal Systems with the Inner Diagonals: Variants of Polyhedration // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 704. P. 55–60.
2. Lutsyk V., Zelenaya A., Parfenova M. Solidification Paths in the Ceramic Systems // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 704. P. 173–178.
3. Насрулин Э. Р., Луцык В. И. Редактор тройных фазовых диаграмм, состоящих из произвольного числа поверхностей с выпуклым прямолинейным контуром // *Инновации в науке и образовании*. 2006. № 7. Реф. 6596. http://www.ofernio.ru/program/ofapis_bd/db_printresult_user.php?page=0
4. Rhines F. N. *Phase Diagrams in Metallurgy. Their development and application*. New York-Toronto-London: McGraw-Hill Book Company, MC. 1956. 340 p.
5. Райнз Ф. *Диаграммы фазового равновесия в металлургии*. М.: Металлургиздат. 1961. 368 с.
6. Осинцев О. Е. *Диаграммы состояния двойных и тройных систем. Фазовые равновесия в сплавах*. М.: Машиностроение. 2009. 352 с.
7. Ламуева М. В., Луцык В. И., Парфенова М. Д. (EXCEL+ACAD)-технология построения изотермических разрезов Т-х-у-з диаграмм состояния четырехкомпонентных систем // *Геометрия многообразий и ее приложения: мат. 5-й научной конф. с международным участием, посв. 100-летию проф. Р.Н. Щербакова, 3–6 июля 2018 г., Улан-Удэ – оз. Байкал*, 2018. С. 147–153.
8. Ламуева М. В., Воробьева В. П., Луцык В. И., Парфенова М. Д. Полиэдрация концентрационных комплексов многокомпонентных систем с обменным взаимодействием // *Геометрия многообразий и ее приложения: мат. 5-й научной конф. с международным участием, посв. 100-летию проф. Р.Н. Щербакова, 3–6 июля 2018 г., Улан-Удэ – оз. Байкал*. 2018. С. 157–163.
9. Луцык В. И., Ламуева М. В., Парфенова М. Д. Сборка Т-х-у диаграмм по схемам фазовых реакций и имитация их экспериментального исследования // *III Байкальский материаловедческий форум: мат. Всерос. научной конф. с международным участием, 9–15 июля 2018, Улан-Удэ*. 2018. Ч. 2. С. 192.
10. Парфенова М. Д., Ламуева М. В., Зеленая А. Э., Луцык В. И. Компьютерные модели Т-х-у диаграмм на ограничении четверной системы CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ // *Функциональные материалы: синтез, свойства, применение: тез. XVII Всерос. молодежной научной конф. с элементами научной школы, посвящ. 110-летию со дня рожд. член.-корр. АН СССР Н. А. Торопова, 4–6 декабря 2018 г. Санкт-Петербург*. 2018. С. 228–229.
11. Парфенова М. Д., Ламуева М. В., Воробьева В. П., Луцык В. И. Прототипирование фазовых областей разборных моделей Т-х-у диаграмм и концентрационных комплексов четверных взаимных систем // *Функциональные материалы: синтез, свойства, применение: тез. XVII Всерос. молодежной научной конф. с элементами научной школы, посвящ. 110-летию со дня рожд. член.-корр. АН СССР Н. А. Торопова, 4–6 декабря 2018 г., Санкт-Петербург*. 2018. С. 84–85.
12. Ламуева М.В., Парфенова М.Д., Зеленая А.Э., Луцык В.И. Сборка Т-х-у диаграмм и дизайн микроструктур в тройных системах на ограничении системы LiF-BeF₂-ZrF₄-UF₄ для расплавленно-солевого ядерного реактора // *Функциональные материалы: синтез, свойства, применение: тез. XVII Всерос. молодежной научной конф. с элементами научной школы, посвящ. 110-летию со дня рожд. член.-корр. АН СССР Н. А. Торопова, 4–6 декабря 2018 г., Санкт-Петербург*. 2018. С. 201.

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СХЕМ СЛОЖЕНИЯ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Аннотация. В работе проведен анализ устройств суммирования мощностей электрических колебаний, на основе которых возможно построение многоканальных автоматических радиопередающих устройств и систем для коротковолнового диапазона частот. Разработка и применение таких устройств суммирования позволяет: улучшить энергетические характеристики системы при работе нескольких радиопередающих устройств на одну антенно-фидерную систему; увеличить число каналов с требуемым уровнем мощности. Проанализированы различные методы сложения мощностей.

Ключевые слова. Радиопередающие устройства, усилители мощности, устройства сложения мощностей.

Некогерентное сложение мощностей подразумевает в радиотехнике сложение различных по своим характеристикам электрических сигналов при работе на одну нагрузку. В системах связи такая задача чаще всего возникает при передаче сигналов от радиопередающего устройства (РПДУ) нескольким корреспондентам с использованием одного антенно-фидерного устройства (многоканальный режим работы). Многоканальный режим может быть также применен и при работе одного корреспондента – для улучшения характеристик радиоканала. При проектировании приходится решать проблемы, связанные как с выбором конкретного метода суммирования, так и новые, появившиеся из-за больших мощностей электрических сигналов РПДУ (десятки – сотни киловатт).

Некогерентное сложение мощностей может осуществляться несколькими принципиально разными методами:

- применением мостового сумматора;
- применением фильтрового метода.

Метод, применяющий мостовой сумматор, основан на том, что мостовая многополюсная схема суммирования обеспечивает развязку между генераторами, исключая тем самым взаимное влияние генераторов (или радиопередающих устройств). В [1] приведены некоторые варианты реализации мостовых схем, классифицируемых по фазовым соотношениям суммируемых источников сигнала (синфазные, противофазные, квадратурные), по способу сложения (по току или напряжению), по частотным свойствам (широкополосные или узкополосные), по элементной базе (устройства на R, L, C элементах, трансформаторные и т.д.). Анализ вариантов мостовых схем позволяет сделать вывод, что лучшие характеристики, в частности для коротковолнового диапазона частот, могут быть получены на широкополосных синфазных мостовых схемах, выполненных на основе трансформаторов на длинных линиях (ТДЛ).

Схема электрическая функциональная *подобного мостового сумматора*, для сложения мощности *двух сигналов* генераторов или РПДУ, приведена на рис. 1. Из схемы на рис. 1 следует, что сумма мощностей на резисторе нагрузки и на балластных сопротивлениях равна суммарной мощности генераторов. Поэтому коэффициент полезного действия (КПД) мостового устройства суммирования равен отношению мощности в нагрузке к суммарной мощности генераторов, то есть

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_6} = \frac{1 + k^2 + 2k \cos \varphi}{2(1 + k^2)}, \quad (1)$$

где φ – сдвиг фаз между сигналами; k – отношение амплитуд сигналов генераторов.

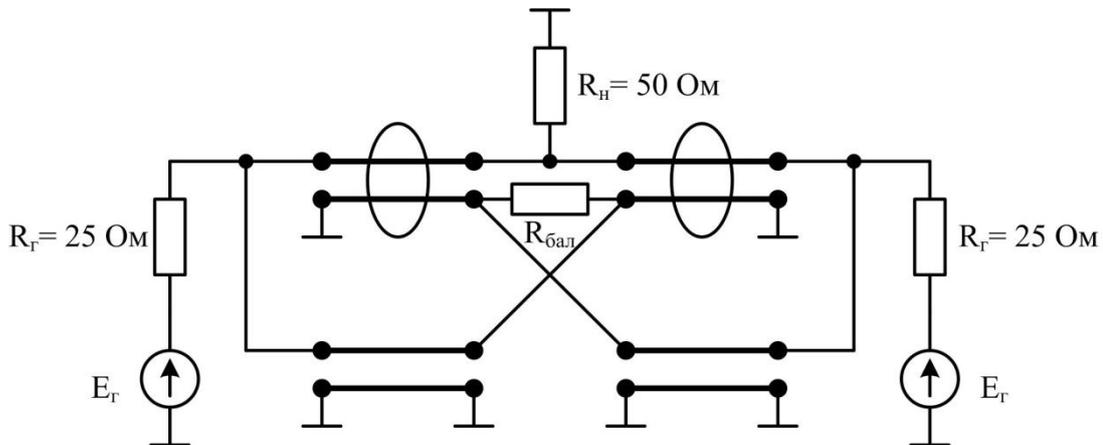


Рис. 1. Мостовая схема суммирования на ТДЛ

Из выражения (1) следует, что для некогерентных сигналов КПД сумматора при сложении двух сигналов будет не более 50%. При увеличении числа суммируемых сигналов КПД будет еще более уменьшаться – пропорционально числу суммируемых каналов [2], что является существенным недостатком метода. Низкий КПД требует применения мощных балластных нагрузок и системы их охлаждения, что отрицательно сказывается на габаритных характеристиках устройства суммирования и его массе. Также необходимо обеспечивать согласованный режим работы отдельных функциональных узлов, так как при рассогласовании существенно увеличивается коэффициент стоячей волны. *Достоинствами же* таких сумматоров являются высокая надежность и простота реализации устройств.

Фильтровой метод суммирования мощностей лишен главного недостатка предыдущего метода – низкого КПД. В данном методе развязка между генераторами достигается посредством частотно-разделительного фильтра (или нескольких фильтров), при этом каждый из генераторов должен работать в отведенной ему полосе рабочих частот. КПД данного способа определяется заданной прямоугольностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Например, при ширине переходной области АЧХ, равной 15% от ширины поддиапазона, КПД может достигать 90%.

Пример реализации подобного устройства суммирования иллюстрирует схема электрическая структурная на основе комбинации ФНЧ и ФВЧ, приведенная на рис. 2. К достоинству данного метода, помимо высокого КПД, можно отнести дополнительное ослабление «паразитных» гармонических составляющих, существующих в спектре выходного сигнала реальных РПДУ.

Однако, несмотря на высокий КПД, фильтровой метод используется редко, т.к. каждому генератору выделяется только конкретный поддиапазон рабочих частот, а работа в другом поддиапазоне невозможна (в том числе работа двух генераторов в одном поддиапазоне). Кроме того, переходная область, в которой невозможна работа любого из генераторов, занимает значительную часть рабочего диапазона. Снижение ширины переходной области приведет к существенному снижению КПД, увеличению массы и габаритов. С точки зрения радиосвязи перечисленные недостатки данного метода являются существенными.

Поэтому для построения многоканальных радиопередающих систем метод суммирования электрических сигналов на мостовых устройствах, несмотря на высокую стоимость реализации и значительные потери мощности (снижение мощности парциального

канала прямо пропорционально числу каналов), является более приемлемым. Данный подход позволяет сохранить спектральные характеристики РПДУ, участвующих в сложении, что особенно актуально при реализации дуплексных радиолиний (или одновременной работе нескольких радиолиний) на совмещенных объектах связи. Наиболее существенным ограничением для данного метода является крайне жесткое требование к КСВН антенно-фидерной системы – не более 2...3.

Исходя из проведенного сравнения двух методов, моделирование и дальнейшая разработка макета осуществлялась на основе метода суммирования сигналов парциальных каналов на мостовых устройствах.

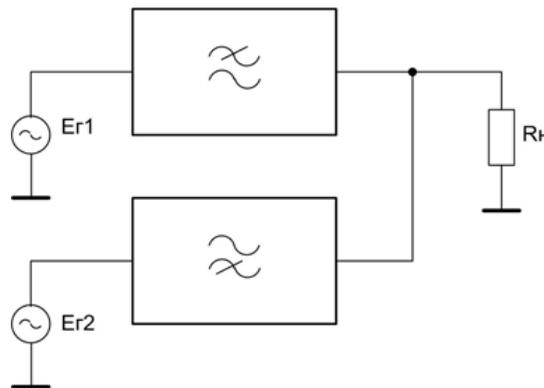


Рис. 2. Схема фильтрового метода сложения мощностей генераторов

Для применения такого технического решения в реальных системах связи была проведена следующая модификация типового метода:

- входные сопротивления устройства были преобразованы к номинальному сопротивлению радиопередающих трактов 50 Ом, для чего были введены понижающие трансформаторы с коэффициентом трансформации по сопротивлению, равным двум;
- симметричная балластная нагрузка изменена на несимметричную, т.к. несимметричную нагрузку проще реализовать на высоких уровнях мощности, и она может быть конструктивно разделена с устройством суммирования.

Модифицированная схема электрическая структурная устройства суммирования приведена на рис. 3.

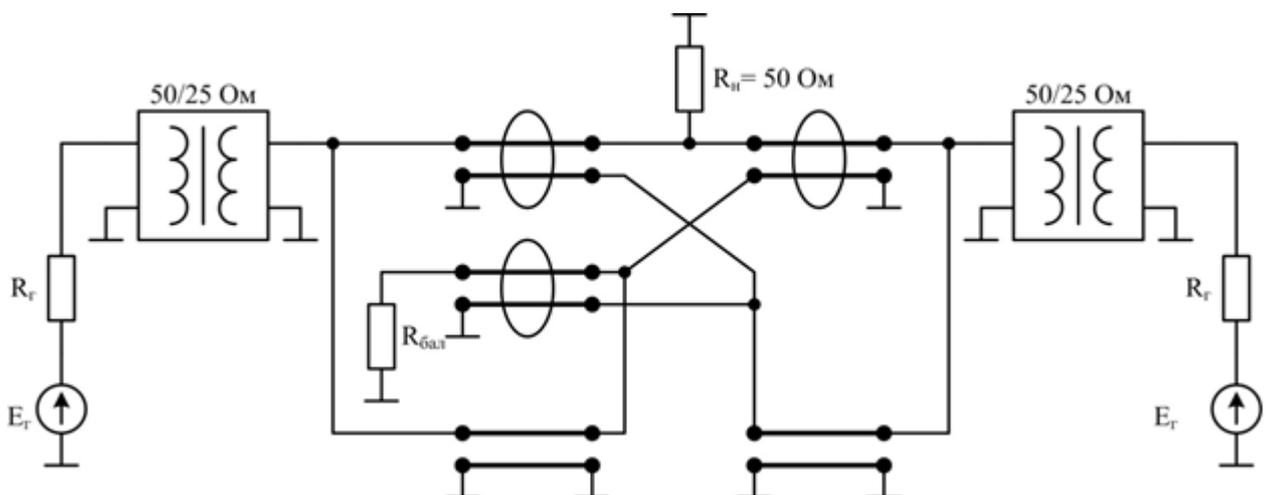


Рис. 3. Модифицированная схема суммирования мощностей

Проведено моделирование по специально разработанной модели устройства, а также проведены необходимые аналитические расчеты согласующих трансформаторов и

устройства в целом. Моделирование и анализ результатов показали, что для устройства суммирования по схеме рис. 3 оптимальным для минимизации потерь является выполнение трансформаторов 50/25 Ом на «квазилиниях». Достоинством электрической схемы является отсутствие зависимости ее параметров от длины линий. При такой реализации плечи моста образованы входными сопротивлениями линий, которые «активны» и постоянны в диапазоне частот, если линии нагружены на сопротивления, равные волновому. Таким образом, если все линии согласованы, то генераторы (или РПДУ) будут идеально согласованы и развязаны друг относительно друга. Кроме того, переход на несимметричные нагрузки позволяет снизить влияние конструктивных «паразитных» емкостей, имеющихся у «серийных нагрузок».

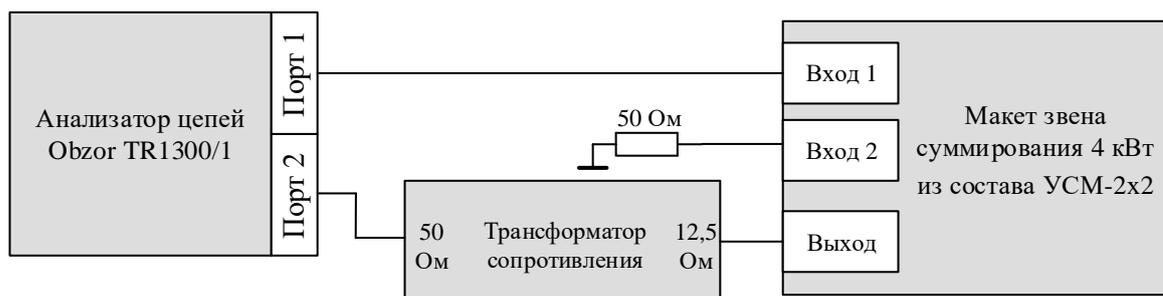


Рис. 4. Схема измерения параметров

Были проведены лабораторные эксперименты макета устройства суммирования по схеме измерения рис. 4, которые подтвердили адекватность модели и приемлемые для дальнейших разработок технические характеристики устройства. Результаты исследований температурных режимов будут приведены в следующей работе.

Библиографический список

1. Шахгильдян В. В., Козырев Б. В., Ляховкин А. А. [и др.]. Радиопередающие устройства / под общ. ред. В. В. Шахгильдяна. 3-е изд. М.: Радио и связь, 2003. 560 с.
2. Основы теории радиотехнических цепей и сигналов: учебн. текстовое электрон. изд. локального распространения в двух частях. Часть 1 / Никонов И. В. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

УДК 535.3, 621.89.017

Д.С. Розов, Л.А. Лукьянов, Т.М. Гомонюк¹, А.М. Ласица¹

БОУ г. Омска «Гимназия № 69», г. Омск, Россия

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ И ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ

Аннотация. Рассмотрена возможность использования оптического метода контроля ресурса работы машинных масел. На примере ряда трансмиссионных и моторных масел показано, что оценка ресурса работы может быть сделана на основе закона Бугера–Ламберта–Бера.

Ключевые слова: оптический метод контроля, закон Бугера–Ламберта–Бера, смазочные материалы, ресурс работы.

Введение

В современных механизмах и машинах большую роль играют качество и точность изготавливаемых деталей, а также состояние их поверхностей. Последнее автоматически повышает требования к смазочным материалам. Антифрикционные материалы должны обладать способностью работы при высоких температурах, оптимальной консистенцией, осаждают в себе отложения, образующиеся при трении деталей, исключать тенденцию к пенообразованию и к статической электризации.

На основании официальных данных, полученных с помощью федеральной службы государственной статистики, просматривается динамика увеличения средней стоимости моторного масла на 25% в год. Значительное увеличение стоимости смазывающих материалов делает актуальным разработку методов, способствующих более рациональному расходованию антифрикционных материалов, в том числе и методов контроля качества, определяющих степень пригодности моторных и трансмиссионных масел для дальнейшей эксплуатации [1, 2, 3].

Исследования, проведенные методом малоуглового рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии, элементного анализа показали увеличение твердых, коллоидных, мицеллообразных структур по мере увеличения срока службы масла [4]. Также с помощью оптических методов контроля, а в частности, спектрального анализа в видимой и ближней инфракрасной области, можно выявлять основные особенности химического состава масла, что очень может помочь при определении количества осажженных в машинном масле частиц, образованных трением деталей [5]. Однако все вышеперечисленные методы весьма дорогостоящие и не позволяют проводить экспресс-анализ.

Целью нашего исследования является разработка простого и доступного метода контроля на основе оптического анализа.

Постановка и результаты эксперимента

Изменение оптических свойств смазывающей жидкости связано с тем, что в ней накапливаются окислы частиц износа, базового масла и применяемых присадок. Наличие этих элементов приводит к увеличению числа рассеивающих центров и, соответственно, усилению рассеяния света при прохождении через вещество. Одновременно более темная окраска окислов приводит к увеличению поглощательной способности. Поскольку процессы поглощения и рассеяния связаны с одними и теми же структурными изменениями, то ожидается, что они могут быть учтены в рамках одного уравнения [6].

Одной из самых простых зависимостей, описывающих распространение электромагнитных волн в веществе, является закон Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 \cdot \exp(-k_\lambda \cdot l) \quad (1)$$

где I_0 – начальная интенсивность светового потока, I – интенсивность светового пучка после прохождения вещества, k_λ – показатель поглощения, l – толщина слоя исследуемого вещества.

Поскольку показатель поглощения k_λ линейно увеличивается с ростом концентрации окислов и сторонних примесей, то при фиксированной длине оптического пути и нормальном износе исследуемого смазочного материала показатель экспоненты закона Бугера–Ламберта–Бера будет линейно изменяться с пробегом автомобиля, а сам закон приводится к виду:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\beta \cdot x) \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность входящего пучка, β – постоянный коэффициент, зависящий от толщины и вида смазочного материала, x – величина пробега.

Для проверки применимости закона Бугера–Ламберта–Бера к описанию распространения света через моторные и трансмиссионные масла, а также проверки возможности использования закона Бугера–Ламберта–Бера для оценки ресурса работы масел была поставлена серия опытов, принципиальная схема которых приведена на рис. 1, эксперимент проводился на базе серийно выпускаемой установки МУК–ОВ1.

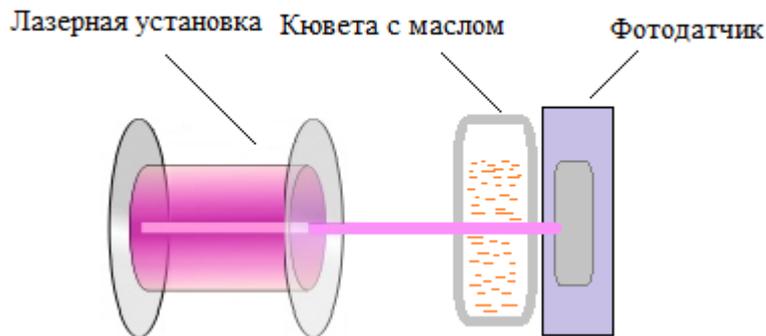


Рис. 2. Принципиальная схема проведения измерений

В качестве объектов исследований были выбраны моторные масла AUCHAN «Каждый день» (индекс вязкости 5W-40 в соответствии со стандартом SAE), а также трансмиссионное масло LUKOIL (индекс вязкости 75W-90 в соответствии со стандартом SAE).

Первоначально на масле в состоянии поставки определялся параметр I_0 , затем исследовались отработавшие в агрегатах масла. Для трансмиссионного масла была взята проба при пробеге 2000 км, для исследования моторного масла была отобрана проба при пробеге 3000 км. Моделирование меньших величин пробега выполнялось пропорциональным разбавлением отработавшего масла чистым [7]. Данная схема проведения эксперимента соответствует начальному предположению о линейном по отношению к пробегу накоплению в масле различных центров рассеяния и поглощения. Результаты приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты исследования трансмиссионного масла LUKOIL 75W-90

LUKOIL 75W-90			Аппроксимирующие уравнения	
I_0	Пробег, км	I		
1,950	1000	0,980	$\frac{I}{I_0} = e^{-\beta \cdot x}$ $\beta=0,000576$	$\frac{I}{I_0} = A \cdot e^{-\beta \cdot x}$ $A=0,6916$ $\beta=0,0003466$
	1333	0,800		
	1500	0,800		
	1600	0,850		
	1666	0,730		
	1714	0,640		
	1750	0,780		
	1777	0,640		
	1800	0,800		
	1818	0,750		
	2000	0,690		

Результаты исследования моторного масла AUCHAN «Каждый день» 5W-40

AUCHAN «Каждый день» 5W-40			Аппроксимирующие уравнения	
I_0	Пробег, км	I		
1,500	800	0,003	$\frac{I}{I_0} = e^{[-\beta \cdot x]}$	$\frac{I}{I_0} = A \cdot e^{[-\beta \cdot x]}$
	640	0,011		
	533	0,025		
	457	0,052		
	400	0,088		
	356	0,116		
	320	0,160		
	290	0,192		
	267	0,214		
	246	0,268		
	228	0,320		
	213	0,370		
	200	0,400		
	177	0,500		
	152	0,580		
	133	0,666		
	118	0,750		
	103	0,850		
78	1,000	$\beta=0,004405$	$A=1,853$ $\beta=0,007687$	

Анализ полученных результатов

Полученные результаты аппроксимировались в пакете прикладных программ Matlab R2018b, для вычисления использовался алгоритм Левенберга–Марквардта. В качестве аппроксимирующего уравнения выбиралось выражение (2), однако в этом случае удавалось для обоих исследуемых масел добиться лишь качественного совпадения теории и эксперимента. Причиной расхождения по нашему мнению могла быть сильная зависимость измеряемых величин от точности установки кюветы с исследуемым маслом.

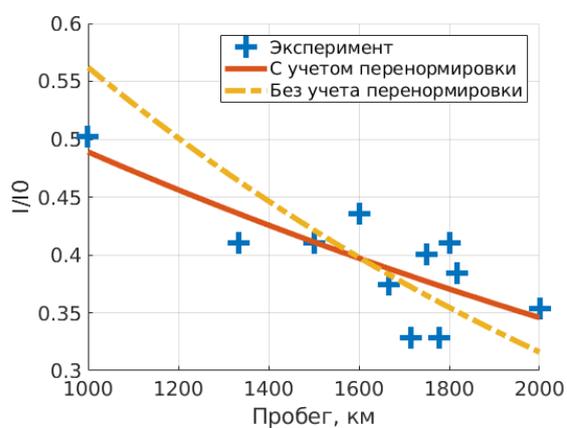


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности от пробега для масла LUKOIL 75W-90

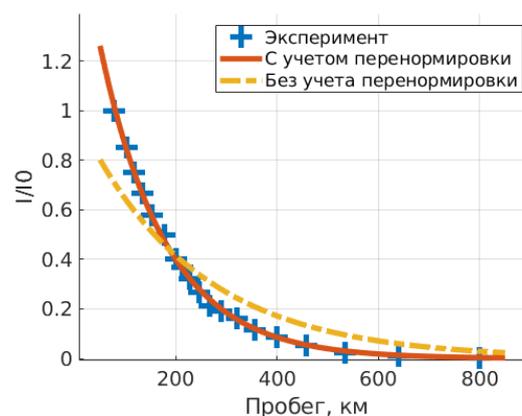


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности от пробега для масла AUCHAN «Каждый день» 5W-40

Для уточнения полученных результатов был введен дополнительный свободный коэффициент, отвечающий за перенормировку измеряемых значений интенсивности, аппроксимирующее уравнение приведено к виду

$$I = A \cdot I_0 \cdot e^{[-\beta \cdot x]} \quad (3)$$

Результаты приведены на рис. 2 и 3.

Значение константы, связанной с поглощением, для моторного масла на порядок выше, чем для трансмиссионного. Значительная разница между величинами, видимо, связана с наличием сильнодействующих присадок, добавляемых с учетом условий работы масла. Для трансмиссионного масла даже с учетом перенормировки измеряемых величин удалось только передать общий убывающий ход зависимости. По всей видимости, это связано с низкой чувствительностью прибора и конструктивными особенностями измерительной схемы, приводящими к значительной погрешности. Тем не менее, результаты, полученные для моторного масла, показывают, что экспериментальные точки лежат на убывающей кривой, имеющей экспоненциальный характер. Последнее подтверждает возможность использования закона Бугера–Ламберта–Бера для описания распространения света через моторное и трансмиссионное масло, а также возможность разработки оптических датчиков контроля пригодности использования моторных и трансмиссионных масел.

Библиографический список

1. Ризванова Г. И., Гафиятуллин Л. Г., Гарифуллин М. Ш. [и др.]. Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 9–10. С. 91–94.
2. Козлов В. К., Гарифуллин М. Ш. Особенности оптических характеристик трансформаторных масел различных масел // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 11–19.
3. Балясников В. А., Ковальский Б. И., Афанасов В. И. [и др.]. Метод контроля температурных пределов работоспособности трансмиссионных масел различной базовой основы // Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 163–171.
4. Шкаликов А. В., Юшкова Е. А., Гафиятуллин Л. Г. [и др.]. О рассеянии света в трансформаторном масле // Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки. 2011. Т. 110, № 5. С. 768–772.
5. Ковальский В. И., Янович В. С., Шрам В. Г., Петров О. Н. Оптический метод контроля термоокислительной стабильности трансмиссионных масел // Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки. 2013. № 11. С. 302–311.
6. Горбунова О. Ю., Акименко Т. А. Распространение оптического сигнала в дисперсной среде // Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки. 2011. № 2. С. 377–381.
7. Ковальский Б. И., Агровиченко Д. В., Сокольников А. Н., Балясников В. А. Результаты исследования доливов на показатели термоокислительной стабильности минерального моторного масла Лукойл стандарт 10W-40SF/CC // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 5. С. 168–174.
8. Кашин Я. М., Кириллов Г. А., Варенов А. Б. [и др.]. Анализ современных методов и аппаратуры контроля качества трансформаторного масла // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: естественно-математические и технические науки. 2017. № 3 (206). С. 109–121.

9. Акопян М. Г. О методе экспресс-анализа степени дисперсности эмульсионных рабочих жидкостей оптическим методом // Вестник государственного инженерного университета Армении. Серия: механика, машиноведение и машиностроение. 2013. № 1. С. 98–101.

10. Варехов А. Г. Фотометрическое определение загрязненности моторных масел // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2013. № 2 (24). С. 19–22.

11. Верещагин В. И., Ковальский Б. И., Попов А. С. Методика оценки ресурса моторных масел // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2007. № 6. С. 169–174.

УДК 628.9:519.6

А.Г. Саинский, А.И. Черепнев¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДА

Аннотация. В данной работе излагаются результаты исследования электрических и тепловых характеристик светодиода. В качестве объекта исследований выбран светодиод размерами 5×5 мм, изготовленный на основе кристаллов из нитрида галлия. Тепловые характеристики определялись с помощью тепловизора optri450o38t900. По результатам исследований построены зависимости температуры от прямого тока и световой отдачи от прямого тока. При анализе данных установлено, что при достижении значения 20 мА наблюдается резкое повышение световой отдачи светодиода с люминофорной композицией.

Ключевые слова: светодиод, температура кристалла, люминофорная композиция.

Известно [1, 2], что в настоящее время наибольшее распространение получили белые светодиоды для поверхностного монтажа в металлопластмассовом корпусе 5 × 5 мм. Они широко применяются в офисных светильниках типа «Армстронг», уличных светильниках и в качестве подсветки в жидкокристаллических телевизорах.

Температура играет важную роль в работоспособности светодиода, подробно об этом написано в [3, 4]. В целом повышенная температура ускоряет физико-химические процессы деградации светодиодного кристалла и люминофора. Влияние температуры на срок службы светодиода описано в [5].

С целью определения влияния электрических режимов работы светодиода на температуру кристалла проведены данные исследования.

В качестве объектов исследования выбраны два макета светодиодов с идентичным корпусом и кристаллом. В отражатель одного из образцов светодиода (образец №2) нанесена люминофорная композиция. Второй образец без люминофорной композиции (образец №1). Фотография макетных образцов светодиодов приведена на рис. 1.

С помощью тепловизора OPTRI450o38t900 проведены измерения зависимости температуры от прямого тока на макетных образцах светодиодов. Результаты измерений приведены на рис. 2.

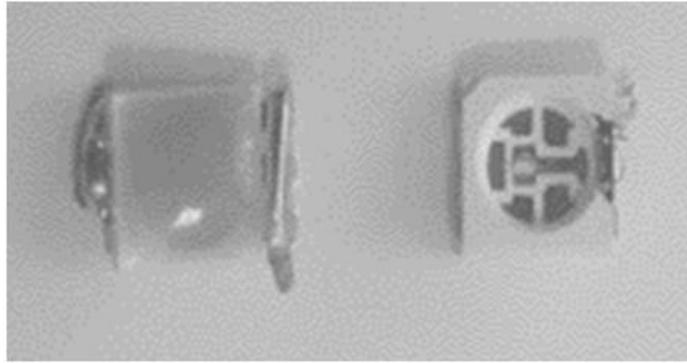


Рис. 1. Макетные образцы светодиодов

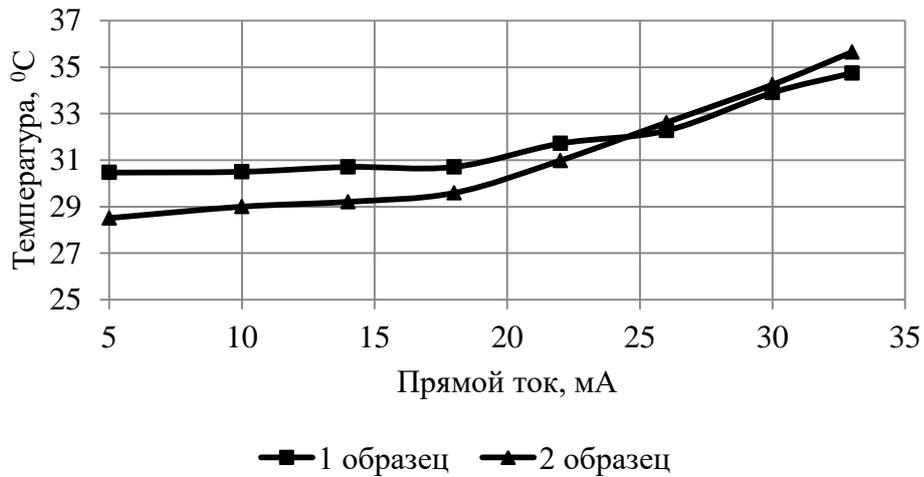


Рис. 2. Зависимость температуры от прямого тока макетных образцов светодиодов

Из рис. 2 видно, что с ростом прямого тока увеличивается температура. На начальном участке зависимости у образца №2 температура ниже. Это можно объяснить тем, что люминофорная композиция имеет низкую теплопроводность, следовательно, основной отвод тепла осуществляется через контакты светодиода. При значении прямого тока выше 20 мА наблюдается рост температуры. Видно, что при токе выше 25 мА макетный образец светодиода с люминофорной композицией (образец №2) начинает греться сильнее, чем образец №1. Данный факт связан с тем, что при повышении светового потока излучения с ростом прямого тока в светодиоде с люминофорной композицией начинается выделение тепла на частицах люминофора вследствие поглощения фотонов. На рис. 3 отчетливо наблюдается резкий рост световой отдачи при прямом токе выше 20 мА и затем выходит на линейный участок кривой.

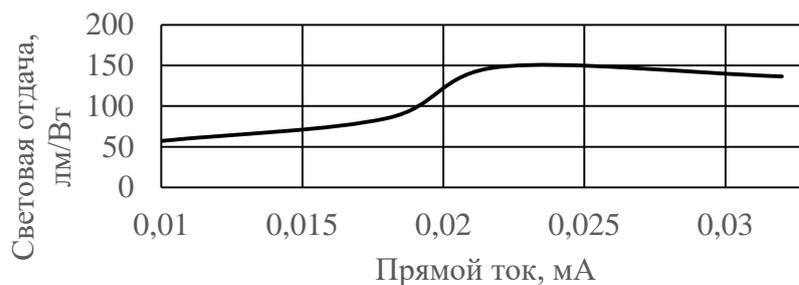


Рис. 3. Зависимость световой отдачи от прямого тока для светодиода с люминофорной композицией

Рост световой отдачи после значения прямого тока 20 мА можно объяснить тем, что световой поток кристалла достиг значения, которое соответствует максимуму эффективности работы люминофора.

Выводы:

Установлено, что при достижении значения прямого тока 20 мА наблюдается резкое повышение световой отдачи.

Построены зависимости прямого тока от температуры. Обнаружено, что температура СД с люминофором меньше, чем без него, но при достижении тока 25 мА температура СД с люминофором становится больше.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках проекта RFMEFI57717X0266.

Библиографический список

1. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. / под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
2. Вилисов А., Калугин К., Солдаткин В., Перминова Е. Белые светодиоды // Полупроводниковая светотехника. 2012. Т. 4, № 18. С. 14–17.
3. Soldatkin V. S., Tuev V. I., Yulaeva Y. V. [et al.] Operation Characteristics of LED Filament Bulbs Pages // Proc. of the 14th Intern. Sc.-Tech. Conf. APEIE 2018, Oct. 2–6, 2018. Novosibirsk, 2018. Vol. 1. P. 376–379. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545675.
4. Солдаткин В. С., Ряполова Ю. В., Афонин К. Н. [и др.]. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУРа. 2015. №3. С. 55–61.
5. Никифоров С. Г. Прогноз срока службы и изменения параметров промышленных светодиодов при наработке с помощью фотометрического метода // Инновации и инвестиции. 2015. №1. С. 152–156.

УДК 644.36

Ю.И. Стасенко, М.В. Андреева, Ю.В. Юлаева

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

ВЛИЯНИЕ ЛИНЗЫ И ОТРАЖАТЕЛЯ В КОЛБЕ НА КРИВУЮ СИЛЫ СВЕТА СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. В работе излагаются результаты исследований влияния линзы и отражателя внутри колбы на кривую силы света светодиодной лампы на основе светодиодных излучающих элементов для общего применения. В ходе работы установлено, что максимальная равномерность кривой силы света светодиодной лампы достигается при конструкции светодиодная лампа с колбой и линзой на расстоянии 38 мм от светодиодных излучающих элементов (отношения минимальных к максимальным значениям силы света в меридиональной плоскости 0,483).

Ключевые слова: светодиодная лампа, светодиодный излучающий элемент, кривая силы света.

Светодиодная лампа на основе светодиодных излучающих элементов – это лампа, внешне максимально приближенная к лампам накаливания. Она имеет прозрачную стеклянную колбу и цоколь. Внутри колбы вместо нити накала расположены светодиодные излучающие элементы (СИЭ). Макеты СИЭ изготовлены в ТУСУР по [1], колбы и опорная конструкция для крепления СИЭ изготовлены в ООО «Руслед». Фотография макета лампы приведена на рис. 1.

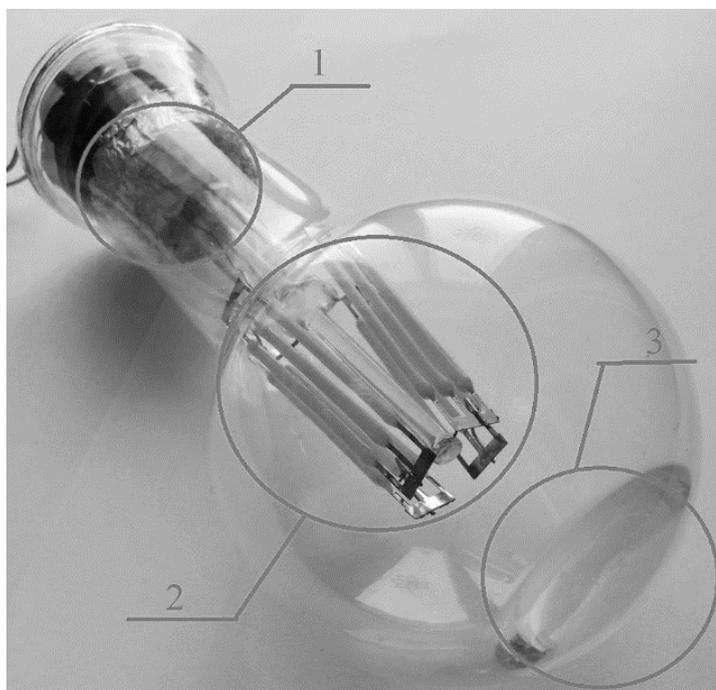


Рис .1. Фотография макета светодиодной лампы: 1 – отражатель из фольги; 2 – опорная конструкция со смонтированными на ней СИЭ; 3 – линза в вершине колбы

Преимущества и недостатки таких ламп подробно описаны в [2]. Технологический процесс изготовления светодиодных ламп описан в [3]. Одним из недостатков лампы является провал кривой силы света в направлении вершины колбы. Именно по этой причине ставится задача проведения исследований влияния линзы и отражателя внутри колбы на кривую силы света светодиодной лампы на основе светодиодных излучающих элементов для общего применения.

Целью работы является определение конструкции лампы с минимальным отношением минимальных к максимальным значениям силы света в меридиональной плоскости, т.е. конструкции лампы с максимально равномерной кривой силы света.

Для достижения поставленной цели рассмотрены кривые силы света для нескольких вариантов конструкции лампы. Проведены измерения кривой силы света с помощью гонеофотометра в следующей последовательности: измерена светодиодная лампа без колбы, на светодиодную лампу установлена колба и измерения проведены аналогично. В колбе изготовлена линза методом заливки и отверждения силиконового оптически прозрачного компаунда, на светодиодную лампу установлена колба и линза на расстоянии 18 мм от СИЭ, измерения проведены аналогично первому варианту. Затем, изменяя расстояние от линзы до СИЭ, соответственно 27 мм и 28 мм проведены аналогичные измерения. На светодиодной лампе смонтирован отражатель из фольги согласно рис. 1, проведены измерения кривой силы света для вариантов без колбы, с колбой без линзы и с колбой и линзой на расстоянии 38 мм от СИЭ. На рис. 2 приведены кривые силы света (КСС) светодиодной лампы в декартовой системе.

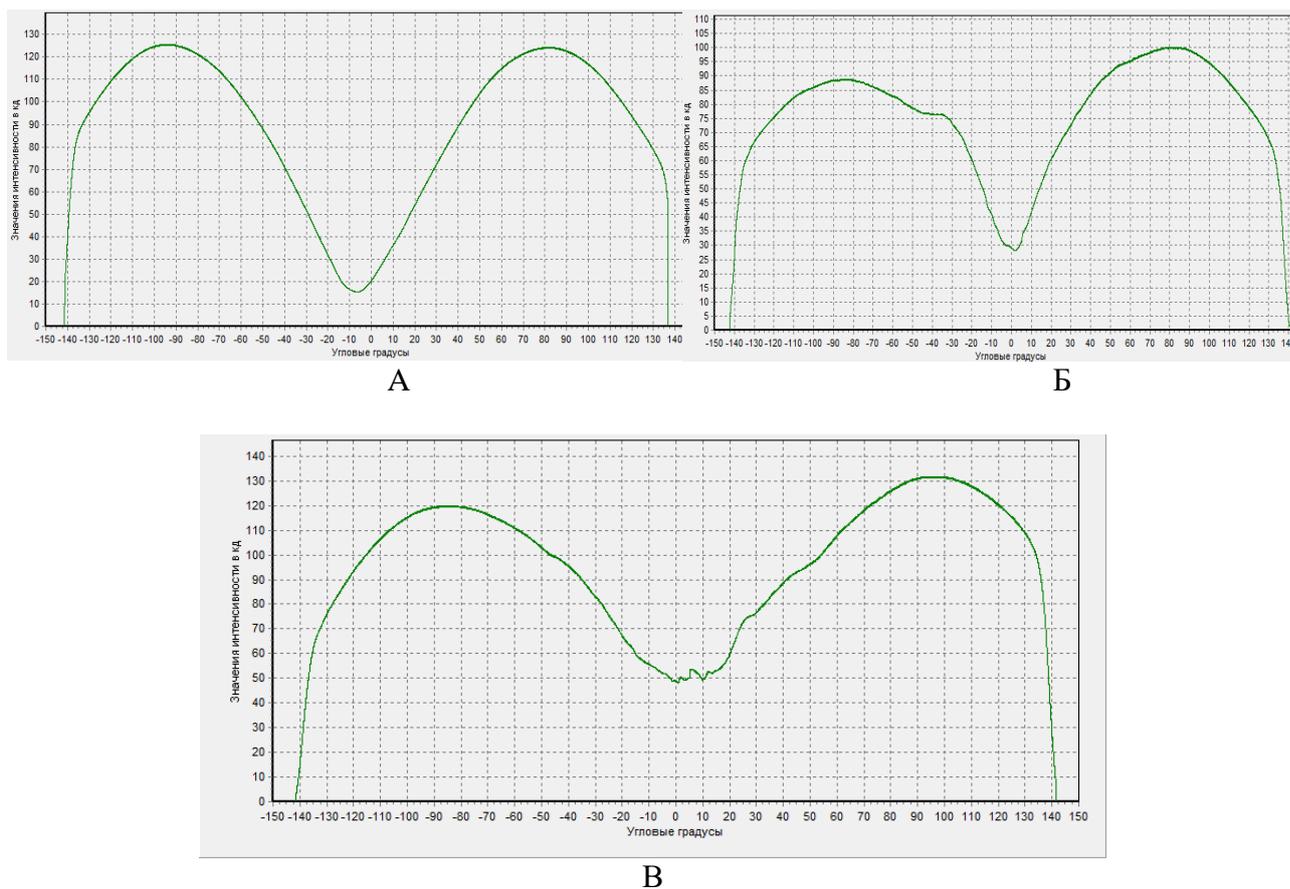


Рис. 2. Кривая силы света светодиодной лампы для вариантов:
 А – лампа без колбы; Б – лампа с колбой; В – лампа с колбой и линзой

Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследования КСС светодиодной лампы общего применения 10 Вт

Варианты	Отношения минимальных к максимальным значениям силы света в меридиональной плоскости
Светодиодная лампа без колбы	0,143
Светодиодная лампа с колбой без линзы	0,348
Светодиодная лампа с колбой и линзой на расстоянии 18 мм от СИЭ	0,285
Светодиодная лампа с колбой и линзой на расстоянии 27 мм от СИЭ	0,333
Светодиодная лампа с колбой и линзой на расстоянии 38 мм от СИЭ	0,483
Светодиодная лампа без колбы с отражателем	0,12
Светодиодная лампа с колбой без линзы с отражателем	0,27
Светодиодная лампа с колбой и линзой на расстоянии 38 мм от СИЭ с отражателем	0,371

Выводы:

В ходе работы установлено, что максимальная равномерность кривой силы света светодиодной лампы достигается при конструкции светодиодная лампа с колбой и линзой на расстоянии 38 мм от светодиодных излучающих элементов (отношения минимальных к максимальным значениям силы света в меридиональной плоскости 0,483).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках проекта RFMEFI57717X0266.

Библиографический список

1. Пат. 172287 Российская Федерация, МПК F 21 К 9/00. Светодиодная лента для лампы. / Вилисов А. А., Олисовец А. Ю., Ряполова Ю. В., Солдаткин В. С., Старосек Д. Г., Туев В. И. №2016122381; заявл. 06.06.16; опубл. 04.07.17, Бюл. № 19.

2. Afonin K. N., Olishovets A. Y., Ryapolova Y. V. [et al.] LED lamp design optimizing on minimum non-uniformity of light intensity distribution in space // Proc. of the 13th Intern.l Sc.-Tech. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 , Oct. 3–6, 2016. Novosibirsk. 2017.Vol. 2. P. 153–155.

3. Туев В. И., Дмитриев В. М., Ганджа Т. В., Солдаткин В. С. Многоуровневая компьютерная модель технологического процесса производства светодиодных ламп // Научноёмкие технологии в космических исследования Земли. 2019. Т.11. № 1. С. 86–98. Doi: 10.24411/2409-5419-2018-10228.

УДК 539.169

О.М. Сухарева, Л.В. Григоренко^{1,2,3}, Д.А. Костылева^{4,5}, М.В. Жуков⁶

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

⁴Гисенский университет им. Юстуса Либиха, г. Гисен, Германия

⁵Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, г. Дармштадт, Германия

⁶Технический университет Чалмерса, г. Гётеборг, Швеция

СПРАВЕДЛИВОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ИСТИННЫМ ТРЕХТЕЛЬНЫМ РАСПАДАМ

Аннотация. В рамках метода гиперсферических гармоник задача трёх тел сводится к движению одной эффективной частицы в «сильно деформированном» поле, которое описывается в формализме связанных каналов. Этот метод хорошо подходит для изучения так называемых истинных трехтельных распадов. Сведение системы гиперсферических уравнений к одноканальному приближению дает основание использовать стандартное квазиклассическое выражение для определения ширины резонанса. Мы показываем, что сам квазиклассический подход достаточно точен в приложении к трехтельным эффективным потенциалам. Однако усечение до одного канала приводит к значительной переоценке ширины распада.

Ключевые слова: двухпротонная радиоактивность, резонанс, парциальная ширина распада.

Общепринятые методы определения ширины резонансных состояний, такие как зависимость упругого фазового сдвига от энергии или положение полюса S-матрицы в комплексной энергетической плоскости, могут быть технически сложными для очень малых ширин $\Gamma \ll E$. Поэтому изучение таких радиоактивных распадов требует специфических методов определения ширины распада. Среди них «естественное» определение ширины через ВФ с асимптотикой чистой выходящей волны [1], интегральные формулы типа Кадменского [2] и квазиклассический подход Гамова [3].

Стандартное квазиклассическое приближение легко формально обобщить на случай трехтельного распада, когда два протона испускаются одновременно. Движение такой системы может рассматриваться в определенном приближении как одноканальное движение по гиперрадиусу ρ . В таком приближении определение ширины требует сведения задачи нескольких тел к одноканальному формализму, где интеграл Гамова по подбарьерной траектории может быть определен как

$$\Gamma = v \exp \left[2i \int_{\rho_2}^{\rho_3} p d\rho \right], \quad v = \left[2M \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{d\rho}{p} \right]^{-1}, \quad p = \sqrt{2M[E_T - V_{eff}(\rho)]}$$

где ρ_1, ρ_2 – внутренние и ρ_3 – внешняя классические точки поворота для потенциала $V_{eff}(\rho)$. В этом приближении можно обсуждать как справедливость сведения задачи нескольких тел к одноканальному подходу, так и обоснованность квазиклассического приближения для барьеров специфической формы.

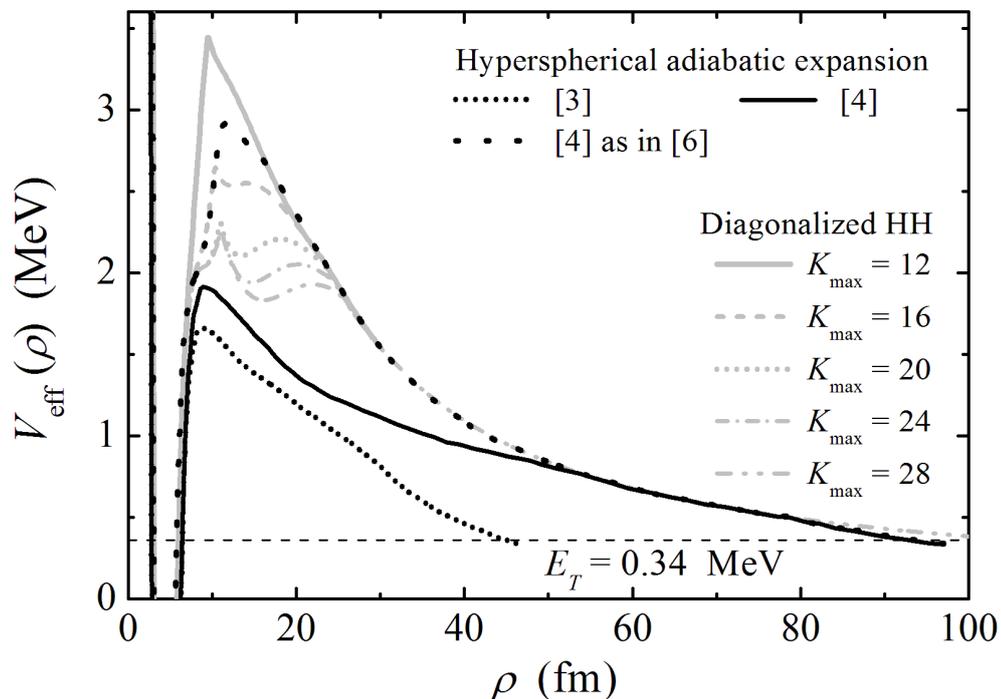


Рис. 1. Эффективные одноканальные потенциалы V_{eff} для квазиклассических расчётов двухпротонной ширины распада состояния $^{17}\text{Ne } 3/2^-$. Энергия двухпротонного распада $E_T = 0,34 \text{ MeV}$. Гиперсферические потенциалы (серые кривые) получены тривиальной диагонализацией матрицы гиперсферических потенциалов из [2]

Гамовский подход в последние годы часто использовался для определения ширин трехчастичных распадов, например, [3]. Мы проверяем допустимость этого приближения на примере ширины первого возбужденного $3/2^-$ состояния ^{17}Ne , известного как истинно двухпротонный распадчик. Ширина этого состояния важна для определения скорости захвата в астрофизической реакции $^{15}\text{O} + p + p \rightarrow ^{17}\text{Ne} + \gamma$ [5]. Теоретические расчёты этой ширины весьма противоречивы [6, 3, 2, 4]. Недавно эта спорная величина была переизмерена экспериментально [7] с уточненным верхним пределом двухпротонной ширины $\Gamma < 8,8 \cdot 10^{-13}$ МэВ.

Таблица 1

Ширин состояния $^{17}\text{Ne } 3/2^-$ (в МэВ), полученные с помощью ур. (1) для гиперсферических адиабатических эффективных потенциалов V_{eff} из [4]

	$K_{max} = 70, l_x, l_y \leq 2$	$K_{max} = 70, l_x, l_y \leq 9$	$K_{max} = 20, l_x, l_y \leq 10$
[4]	$3,6 \times 10^{-12}$	$1,7 \times 10^{-14}$	$5,4 \times 10^{-16}$
ур. (1)	$7,3 \times 10^{-6}$	$8,3 \times 10^{-12}$	$7,9 \times 10^{-14}$

Работа [4] посвящена нахождению «необходимых условий для точных расчетов трехтельных парциальных ширин распада», соответственно, следует ожидать, что ее результаты наиболее точные. Для распада состояния $^{17}\text{Ne } 3/2^-$ мы обнаружили, что не можем согласовать значения ширин, приведенные в [4], с кривыми потенциалов, представленными в этой работе, см рис. 1 и таблицу 1. Колонка 1 соответствует несходящемуся результату из [3], колонка 2 – «точному» сходящемуся результату и колонка 3 воспроизводит расчеты [6]. Наши квазиклассические расчеты с теми же V_{eff} находятся в сильном противоречии с результатами, приведенными в [4]. Потенциал, приведенный как финальный результат этого исследования (сплошная кривая на рис. 1) дает для распада состояния $^{17}\text{Ne } 3/2^-$ (согласно нашим расчетам) значение ширины $\Gamma = 8,3 \cdot 10^{-12}$ МэВ. Эта величина на порядок превосходит недавний экспериментальный предел [7].

Потенциалы, полученные тривиальным сведением гиперсферических потенциалов из [2] к одному каналу (только диагонализация), выглядят довольно схожими с потенциалом, вычисленным в [4], см рис 1. Они также имеют аналогичную тенденцию сходимости гиперсферического базиса. В таблице 2 приведены квазиклассические расчеты с диагонализированными гиперсферическими потенциалами из [2], трехтельные расчеты из [2], и их отношение. Колонка «Асимпт.» содержит величины, полученные экспоненциальной экстраполяцией к бесконечному базису. Очевидно, что квазиклассические результаты, полученные с этими потенциалами, более чем на порядок превышают результаты полного трехчастичного расчета [2]. Поэтому мы полагаем, что сведение задачи к одноканальному приближению приводит к значительному превышению ширины по сравнению с полностью динамическими трехтельными расчетами.

Таблица 2

Ширина состояния $^{17}\text{Ne } 3/2^-$ в единицах 10^{-15} МэВ как функция размера гиперсферического базиса K_{max}

K_{max}	12	16	20	24	28	Асимпт.
ур. (1)	9,83	21,8	40,1	54,1	68,5	110
[2]	0,91	1,32	1,70	2,15	2,64	6,90
отношение	10,8	16,5	23,5	26,1	25,9	15,9

Заключение: наши результаты ставят под вопрос правильность значений ширин, полученных в [4] для состояния $^{17}\text{Ne } 3/2^-$. Недавние экспериментальные данные [7] также

противоречат данным [4], пересчитанным нами. Поэтому мы подвергаем сомнению правильность всех результатов, касающихся трехтельных ширин, полученных в квазиклассическом приближении [4].

Библиографический список

1. Pfützner M., Karny M., Grigorenko L. V., Riisager K. Radioactive decays at limits of nuclear stability // *Rev. Mod. Phys.* 2012. Vol. 84. P. 567–619. Doi: 10.1103/RevModPhys.84.567.
2. Grigorenko L. V., Zhukov M. V. Two-proton radioactivity and three-body decay. III. Integral formulas for decay widths in a simplified semianalytical approach // *Phys. Rev. C.* 2007. Vol. 76. P. 014008. Doi: 10.1103/PhysRevC.76.014008.
3. Garrido E., Fedorov D., Jensen A. Three-body structure of the low-lying ^{17}Ne -states // *Nucl. Phys. A.* 2004. Vol. 733, P. 85-109. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2003.12.016>.
4. Garrido E., Jensen A., Fedorov D. Necessary conditions for accurate computations of three-body partial decay widths // *Phys. Rev. C.* 2008. Vol. 78. P. 034004.
5. Parfenova Y. L., Grigorenko L. V., Egorova I. A. [et al.]. From Coulex cross sections to nonresonant astrophysical rates in three-body systems: The ^{17}Ne case // *Phys. Rev. C.* 2018. Vol. 98. P. 034608.
6. Grigorenko L.V., Mukha I.G., Zhukov M.V. Prospective candidates for the two-proton decay studies I: structure and Coulomb energies of ^{17}Ne and ^{19}Mg // *Nucl. Phys. A.* 2003. Vol. 713. P. 372-389. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474\(02\)01298-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474(02)01298-8).
7. Sharov P.G., Fomichev A. S., Bezbakh A. A. [et al.]. Search for 2p-decay of the first excited state of ^{17}Ne // *Phys. Rev. C.* 2017. Vol. 96. P. 025807. Doi: 10.1103/PhysRevC.96.025807.

УДК 644.36

Д.Б. Тудупова, Е.С. Ганская, А.Ю. Хомяков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроник», г. Томск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОТТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВОТДИОДОВ ДЛЯ СВЕТИЛЬНИКОВ ДЛЯ ТЕПЛИЦ

Аннотация. В работе излагаются результаты исследования светотехнических характеристик светодиодов для светильников для теплиц. В процессе работы измерены спектры и световые потоки для четырёх образцов светодиодов, установлено, что наиболее подходящим светодиодом для светильника для теплиц является образец 2 по значению световой отдачи 172–193 лм/Вт и спектру излучения с максимумами в синей области оптического спектра (460 нм) и в красной области оптического спектра излучения (643,7 нм).

Ключевые слова: светодиод, светотехнические характеристики, фотосинтетический поток, световой поток, спектр излучения.

Современные достижения и исследования влияния спектра излучения на процесс роста растений в теплицах подтверждают преимущества светодиодного освещения растений. Одним из важных преимуществ является малое потребление электроэнергии. Но некоторые фитосветильники обладают неприемлемым спектром фотосинтетической активной радиации (ФАР) и очень низкой фотосинтетической эффективностью [1].

Определенный свет по-разному влияет на процесс развития и роста растений. Преимуществен синий и красный цвет, (460 нм) и (630 нм) соответственно. Зависимость поглощения и усвоения энергии растениями от длины волны светового излучения называют энергетическим спектром фотосинтетической активной радиации (излучение). Для влияния на прорастание, рост, торможение и другие процессы развития и стадий фотосинтеза можно изменять составляющие излучения красной и синей части спектра [2].

Для достижения максимального комфорта и роста растений в теплице необходимо исследовать светотехнические характеристики светодиода. К таким характеристикам относятся: световой поток, сила света, световая отдача, освещенность, цветовая температура, индекс цветопередачи, цветовая температура, яркость, светимость, коэффициент пульсаций [3].

Целью работы является исследование светотехнических характеристик светодиодов для светильников для теплиц.

На рис. 1 приведены фотографии образцов светодиодов.

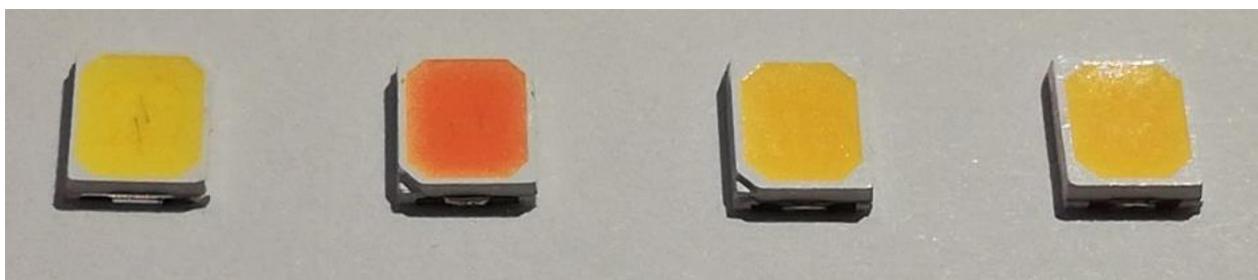


Рис. 1. Фотографии образцов светодиодов

С помощью спектроколориметра «ТКА-ВД» измерены спектральные характеристики образцов светодиодов и построен график на рис. 2.

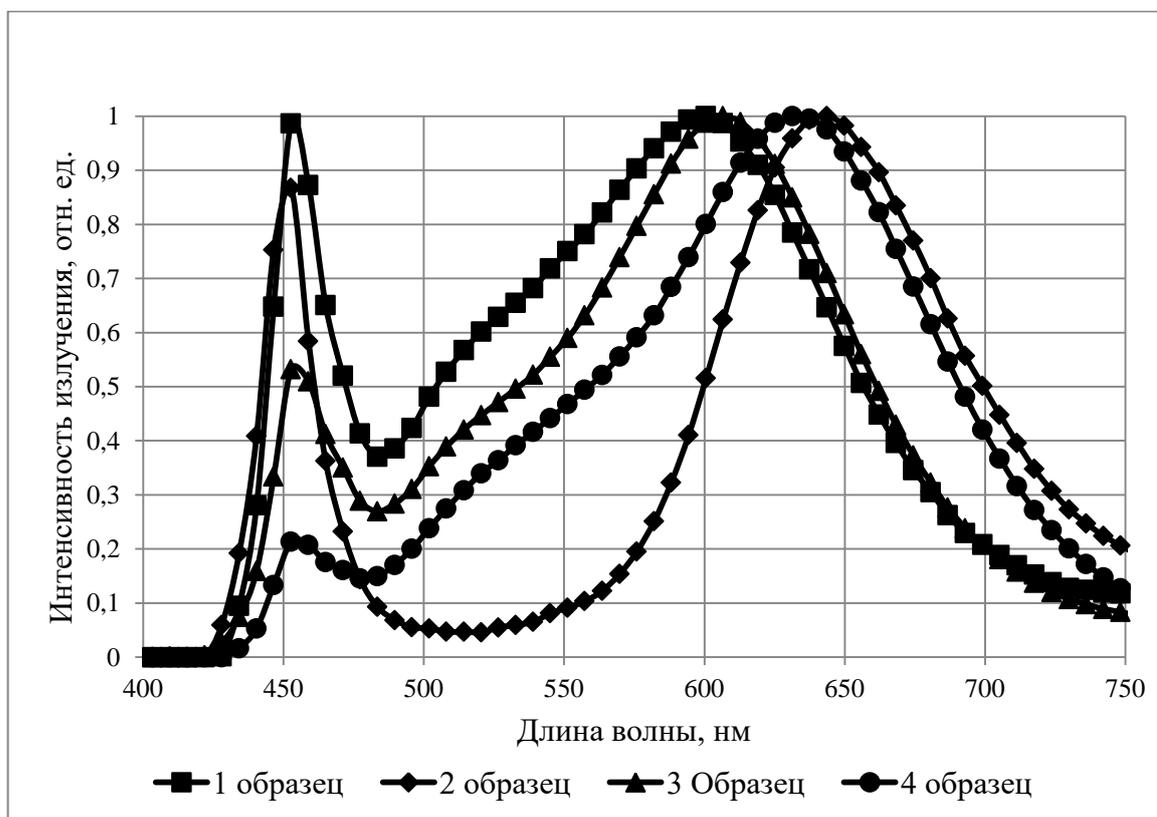


Рис. 2. Спектральные характеристики образцов светодиодов для теплиц

Из рис. 2 видно, что, по спектральным характеристикам, в синей области оптического спектра (460 нм) излучают все образцы светодиодов. В красной области оптического спектра излучают образцы светодиодов 2 (643,7 нм) и 4 (631,4 нм). Видно, что у образцов светодиодов 4 интенсивность синей составляющей 0,2133, что недостаточно для освещения растений. Образцы 4 могут использоваться в светильнике для теплиц в совокупности с образцами светодиодов 2.

С помощью фотометрического шара «ТКА-КК1» измерен световой поток каждого образца. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений светового потока светодиодов

№ образца	Прямой ток, I (мА)	Прямое напряжение, U (В)	Световой поток, Φ (лм)	Мощность, P (Вт)	Световая отдача, n (лм/Вт)
1	10	2,74	4,8	0,0274	175,1825
	20	2,84	9,16	0,0568	161,2676
	30	2,91	13,16	0,0873	150,7446
	40	2,96	16,73	0,1184	141,3007
	50	3	19,53	0,15	130,2
2	10	2,63	5,1	0,0263	193,9163
	20	2,7	10,15	0,054	187,963
	30	2,75	15,05	0,0825	182,4242
	40	2,79	19,79	0,1116	177,3297
	50	2,83	24,4	0,1415	172,4382
3	10	2,6	4,3	0,026	165,3846
	20	2,64	8,56	0,0528	162,1212
	30	2,67	12,7	0,0801	158,5518
	40	2,69	16,67	0,1076	154,9257
	50	2,71	20,5	0,1355	151,2915
4	10	2,67	1,74	0,0267	65,16854
	20	2,74	3,4	0,0548	62,0438
	30	2,8	4,9	0,084	58,33333
	40	2,84	6,49	0,1136	57,13028
	50	2,89	7,93	0,1445	54,87889

Из таблицы 1 видно, что наиболее эффективным является образец светодиода 2.

Выводы: в процессе работы установлено, что наиболее подходящим светодиодом для светильника для теплиц является образец 2 по значению световой отдачи 172–193 лм/Вт и спектру излучения с максимумами в синей области оптического спектра (460 нм) и в красной области оптического спектра излучают (643,7 нм).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках проекта RFMEFI57717X0266.

Библиографический список

1. Туев В. И., Незнамова Е. Г., Солдаткин В. С., Хомяков А. Ю. Применение светодиодного освещения на разных стадиях выращивания культурных растений // Сборник науч. статей 2-й Междунар. науч.-практ. конф., 24-26 нояб. 2015 г. / Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга», в 2-х томах. Курск. Т. 2. С. 161-166.

2. Незнамова Е. Г., Солдаткин В. С., Кайкина Ю. А., Тимошенко П. В. Выращивание культуры огурца под светодиодным освещением в условиях малой агросистемы // Современная светотехника. 2018. № 3 (53). С. 46-47.

3. Neznamova E. G., Soldatkin V. S., Timoshenko P. V. [et al.]. The use of energy-efficient sources while growing a small quantity of the cucumber under the artificial lighting agricultural ecosystem // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 224. P. 012048. doi:10.1088/1755-1315/224/1/012048.

УДК 621.372.5

И.А. Шестаков, И.В. Никонов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК МОЩНЫХ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Аннотация. В работе рассмотрены некоторые проблемы и принципы проектирования фильтров гармоник мощных радиопередающих устройств, рассмотрены некоторые схемы, рассмотрен выбор радиокомпонентов.

Ключевые слова: радиопередающие устройства, усилители мощности, фильтры гармоник, радиокомпоненты.

В соответствии с требованиями ГОСТ 22579-86 для радиостанций «1-го типа» - мощности высших гармонических составляющих сигнала на выходе радиопередающего устройства (РПДУ) должны быть менее минус 40 дБ относительно номинального уровня выходной мощности радиопередатчика. В уже разработанных и эксплуатируемых РПДУ это обеспечивается применением *типовых фильтров нижних частот* (фильтров гармоник), например, с аппроксимацией «Баттерворта», «Чебышева» [1]. Естественно, для РПДУ большой мощности (сотни киловатт и более) кроме синтеза фильтров гармоник необходимо решать и ряд других важных задач (анализ температурных режимов, проектирование систем охлаждения и других).

При проектировании современных РПДУ большой мощности все чаще применяются ключевые режимы работы активных радиокомпонентов. Однако при ключевом режиме работы увеличивается уровень высших гармоник в спектре выходного сигнала и необходимо разрабатывать и применять для подобных РПДУ фильтры гармоник с лучшими характеристиками.

Рассмотрим некоторые моменты проектирования радиопередающих устройств с ключевым режимом работы. Типичные требования к РПДУ коротковолнового диапазона частот мощностью 200 кВт: рабочий диапазон частот 3...30 МГц; мощность сигнала на выходе ФГ равна 200 кВт; мощности отдельных высших гармоник на выходе ФГ в сравнении с номинальным уровнем мощности РПДУ должны быть ослаблены более чем на 40 дБ, рабочее ослабление в полосе пропускания должно быть менее 0,2 дБ. При

проектировании РПДУ необходимо также провести моделирование тепловых режимов, а уже затем выбирать радиокомпоненты и различные материалы с учетом ожидаемого температурного режима.

Предварительно *проведенное моделирование* для ключевого режима работы РПДУ показало, что мощность наиболее интенсивной третьей гармоники на выходе УМ в согласованном режиме не превышает минус 11 дБ, для второй гармоники – минус 30 дБ, для пятой гармоники – минус 30 дБ по отношению к номинальному уровню мощности радиопередатчика. Таким образом, ФГ, включенный на выходе усилителя мощности, должен обеспечить подавление высших гармонических составляющих сигнала не менее чем на 29 дБ для третьей гармоники, не менее чем на 10 дБ для второй гармоники и не менее чем на 10 дБ для пятой гармоники. Рабочее затухание блока на частоте основного сигнала должно быть не более 0,2 дБ.

С учетом рабочего диапазона частот РПДУ 3...30 МГц и рекомендаций по выбору коэффициента перекрытия по частоте (не более 2) необходимо проектировать переключаемый ФГ на 6 поддиапазонов. То есть разрабатывать 6 коммутируемых по входу и выходу фильтров нижних частот (ФНЧ). Переключение отдельных ФНЧ может быть с помощью электронных коммутаторов, но лучшие характеристики достигаются при применении высокочастотных малогабаритных реле.

На рис. 1 для примера приведена схема электрическая принципиальная ФНЧ пятого порядка с аппроксимацией «Чебышева» с денормированными радиоэлементами для нижнего диапазона частот (граничная частота ФНЧ примерно 5 МГц). Синтез ФНЧ проводился по известной методике синтеза полиномиальных фильтров [1].

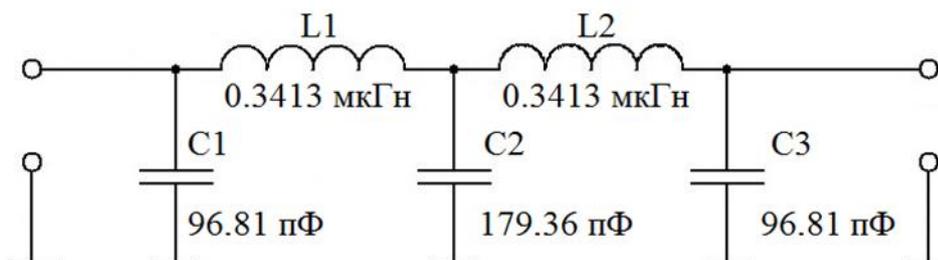


Рис. 1. Схема фильтра нижних частот для первого частотного поддиапазона

Большую крутизну характеристики ослабления при том же порядке фильтра можно получить при синтезе электрической схемы ФНЧ с аппроксимацией «Золотарева-Кауэра», в которой или в продольные ветви включаются параллельные колебательные контуры, или же в поперечные ветви включаются последовательные колебательные контуры, образуя таким включением полюсы ослабления в полосе задерживания. Достоинства такой реализации: большая крутизна ослабления в полосе задерживания, полюсы в полосе задерживания. Недостатки реализации – увеличение числа радиоэлементов при том же порядке фильтра, уменьшение ослабления в полосе задерживания с увеличением значения частоты «после частоты полюсов».

Существуют работы [1, 2], в которых предлагается повысить избирательность фильтра другим способом – за счет введения магнитной связи, при этом уменьшив количество радиоэлементов фильтра и его габаритные размеры по сравнению с описанным выше ФНЧ «Золотарева-Кауэра».

В таком модернизированном ФНЧ, в отличие от схемы на рис. 1, катушки индуктивности выполняются индуктивно-связанными между собой и размещаются на одном сердечнике. Целесообразно использовать следующую методику синтеза схемы такого фильтра: вначале синтезируется типовая схема ФНЧ с аппроксимацией «Чебышева», а затем вводится магнитная связь между катушками индуктивности, за счет которой образуется

последовательный контур из элементов $C2$, M , где M – взаимная индуктивность. В результате, в полосе задерживания ФНЧ Чебышева появляется полюс затухания, частоту которого можно менять, например, изменяя коэффициент связи (k_{CB}) или вид связи (встречное или согласное), обеспечивая необходимое ослабление высших гармоник РПДУ. В дальнейшем необходимо провести корректировочный расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) модернизированной таким образом схемы ФНЧ, так как за счет магнитной связи изменяются эквивалентные значения индуктивностей в продольных ветвях фильтра: увеличиваются или уменьшаются в зависимости от согласного или встречного включения катушек индуктивности на величину $M=k_{CB}(L1L2)^{1/2}$. Имеются и недостатки у модернизированной таким образом схемы ФНЧ: магнитная связь вносит изменения в АЧХ фильтра; характеристики фильтра меняются при изменении коэффициента магнитной связи.

Учитывая большие токи через радиоэлементы ФГ из-за большой мощности РПДУ и наличие в реактивных элементах «резистивных радиокомпонентов», проведено моделирование нагрева радиоэлементов без принудительного охлаждения при разной мощности и разном времени нагрева. При полной мощности 200 Вт необходимо принудительно охлаждать сердечники катушек индуктивности, которые нагреваются до температуры более 100°C , нагрев конденсаторов незначителен. При работе в условиях половинной мощности сигнала на входе ФГ принудительное охлаждение радиоэлементов не требуется.

Выбор радиокомпонентов для изготовления макета ФГ проводился с учетом проведенного моделирования. В качестве конденсаторов выбраны импортные конденсаторы ф. American Technical Ceramics (АТС) серии 100С. Наиболее близкими по параметрам из отечественных конденсаторов являются К10–57, однако из анализа их технических условий было выявлено, что у отечественных конденсаторов эквивалентное последовательное «резистивное» сопротивление в два раза больше, чем у импортных, то есть мощность потерь, обусловленных отечественными конденсаторами, тоже будет в два раза больше. Поэтому в два раза выше будет температура нагрева конденсаторов. Кроме того, в отличие от конденсаторов АТС, отклонение от номинала которых при изготовлении может быть в допуске $\pm 1\%$, у К10-57 минимальным допуском при изготовлении является $\pm 5\%$. Еще более существенным недостатком конденсаторов К10–57 можно считать эффект старения (практически отсутствующий у конденсаторов АТС), то есть изменение емкости конденсаторов с течением времени эксплуатации, при этом интервал изменения емкости расширяется еще на $\pm 2\%$. Такие трудно прогнозируемые изменения параметров отечественных конденсаторов приведут к значительному ухудшению параметров ФГ. Также недостатком можно считать низкое рабочее напряжение конденсаторов К10–57, равное 100 В (у конденсаторов АТС серии 100С рабочее напряжение до 2500 В), при номинальных значениях емкостей, превышающих 240 пФ. Таким образом, несмотря на близость ряда параметров, отечественные конденсаторы К10–57 не могут конкурировать с конденсаторами АТС 100С.

Для катушек индуктивности были выбраны кольцевые сердечники фирмы Micrometals серии Т94–6, которые изготовлены из карбонильного железа. Уровень потерь в катушке индуктивности при добротности $Q = 300$ будет составлять 1,52 Вт, а при $Q = 200$ это будет уже 2,28 Вт. Таким образом, на каждом сердечнике имеем два источника тепла, так как на одном сердечнике будут намотаны две индуктивности, которые могут привести к перегреву сердечника. Проведение сравнительного анализа импортных сердечников фирмы Micrometals Т94 – 6 из карбонильного железа с отечественными аналогами невозможно по причине отсутствия в настоящее время этих аналогов. Единственные отечественные сердечники из карбонильного железа марки МР-100Ф-2 в настоящее время не изготавливаются серийно. Основным недостатком отечественных сердечников является низкая повторяемость параметров сердечников, большой разброс приводит к

индивидуальной проверке и «подгонке» всех серийных моточных элементов, а так как от сердечника в каждом ФНЧ зависит не только величина индуктивностей, но и величина взаимной индуктивности (при применении модернизированной схемы ФНЧ).

После выбора радиокомпонентов был выполнен и экспериментально проверен макет фильтра гармоник.

Библиографический список

1. Основы теории радиотехнических цепей и сигналов: учебн. текстовое электрон. изд. локального распространения в двух частях. Часть 1 / Никонов И. В. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

2. Соловьев А. А., Шестаков И. А. Выбор количества поддиапазонов при проектировании фильтров гармоник радиопередающих устройств с учетом мощности передаваемого сигнала // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 4 (35). С. 49–56.

УДК 681.518.5

Л.В. Щапова

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОСТАНОВКИ ДИАГНОЗА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Аннотация. В статье рассмотрен метод повышения точности постановки диагноза за счет применения алгоритмов нейронных сетей на примере радиографического контроля сварного шва. Предложен алгоритм распознавания дефектов сварных соединений, основанный на работе многослойного персептрона. Описан метод оценки точности работы сети.

Ключевые слова: техническая диагностика, машинное обучение, многослойный персептрон.

Введение. Современный этап развития технической диагностики предполагает полную или частичную автоматизацию измерительных процессов и обработки полученной информации. Такая модель развития обусловлена несколькими факторами. Во-первых, применение автоматизированных диагностических комплексов снижает время, затрачиваемое на проверку одного изделия. В случае если речь идет о серийном производстве, такая система способна в разы сократить длительность процесса контроля и диагностики. Во-вторых, автоматизация данных процессов помогает сэкономить на человеческом ресурсе, что непосредственно влияет на конечную стоимость выпускаемого изделия. В-третьих, внедрение таких комплексов позволяет исключить влияние человеческого фактора, что позволяет повысить точность диагностирования. Однако довольно часто встречаются ситуации, когда ключевую роль играет именно человеческий опыт. Например, при анализе рентгеновских снимков оператору необходимо изучить сотни рентгенограмм, для того чтобы научиться различать разного рода дефекты (в том числе и дефект самой пленки). Таким образом, встает необходимость создания метода построения автоматических и автоматизированных систем диагностики, опирающихся на собственный «машинный» опыт.

Описание метода. Алгоритмы машинного обучения уже давно стали естественным явлением в сферах робототехники и IT-технологий. Термин «машинное обучение» был известен еще с 60-х годов прошлого века, однако существующий тогда уровень развития электроники не позволял в полной мере раскрыть потенциал данной технологии. В настоящее время, когда объемы памяти измеряются терабайтами, появилась возможность применения указанных алгоритмов во многих сферах деятельности.

С точки зрения теории машинного обучения для области технической диагностики одной из наиболее характерных задач является задача классификации. Основная идея заключается в том, чтобы определить, какому из заранее известных классов принадлежит объект. В качестве классов выступают предполагаемые виды дефектов, которые могут быть обнаружены в объекте контроля заданным способом. При классификации дефекта первым делом необходимо выделить его характерные признаки. Для примера рассмотрим процесс обнаружения несплошностей в сварном шве на рентгенограмме.

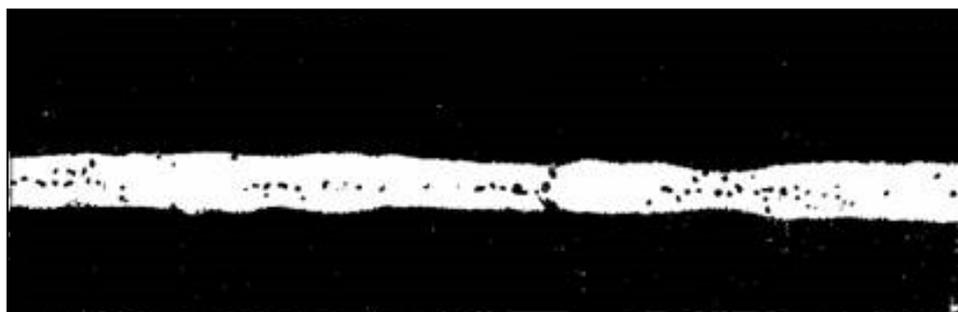


Рис. 1. Рентгенограмма сварного шва

На рис. 1 представлен рентгеновский снимок сварного соединения. Белым цветом показано тело шва. Непровары выявляются на снимке в виде довольно резкой прямой черной линии, трещина даёт обычно извилистую линию, также выявляются поры и шлаковые включения [1]. Таким образом, по форме, размеру и расположению пятна можно классифицировать дефект. Предлагаемый метод предполагает построение нейронной сети для анализа выявляемых дефектов. В случае с рентгеновскими снимками задача классификации сводится к задаче распознавания образов. Обобщенный алгоритм решения задачи показан на рис. 2.

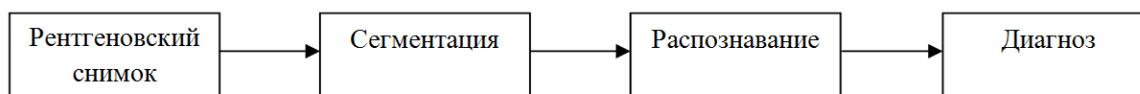


Рис. 2. Алгоритм распознавания дефекта

Схема решения состоит из четырех основных блоков. Первый блок включает получение снимка участка изделия и его оцифровку. Далее снимок, представляющий из себя матрицу пикселей, подвергают процессу сегментации, то есть разбивают на части с выделением областей, содержащих дефекты. Данная операция может выполняться как вручную, так и с использованием дополнительного алгоритма. Следующим этапом после выделения фрагмента с изображением одного дефекта является этап распознавания. На данной стадии массив пикселей подается на вход нейронной сети. Наиболее простой для реализации архитектурой является многослойный персептрон, структура которого представлена на рис. 3.

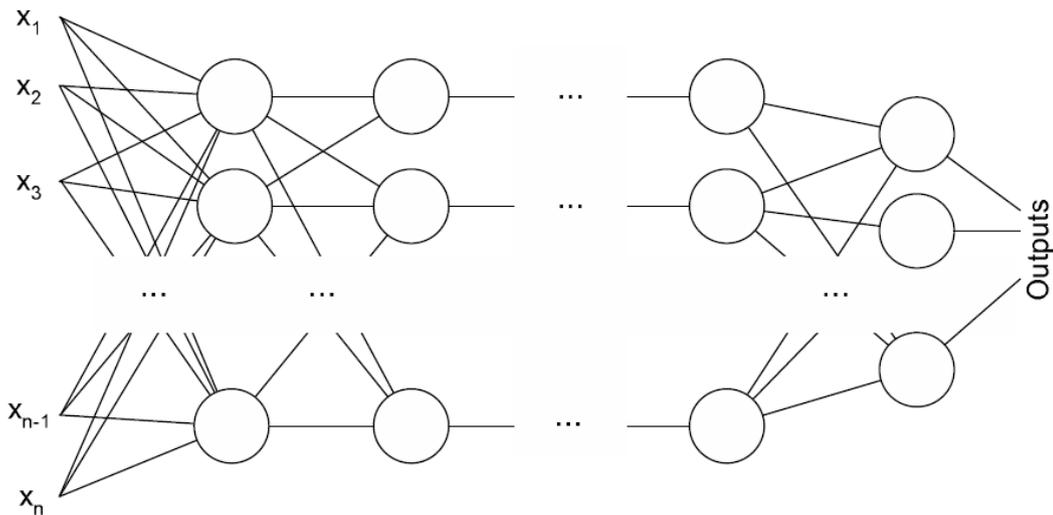


Рис. 3. Структура многослойного персептрона

Такая структура состоит из трех видов элементов: S-элементы, A-элементы и R-элементы. S-элементы (сенсоры) обозначены на рисунке $x_{1..n}$, являются входами системы. Каждый из входов поочередно содержит в себе каждый элемент входной матрицы. Все элементы обрабатываются системой, сдвигаясь на единицу. A-элементы (ассоциативные) обозначены на рисунке кругами. Логические элементы, на выходе которых возникает сигнал “1”, когда алгебраическая сумма входных сигналов превышает некоторую пороговую величину. R-элементы (реагирующие) отвечают за постановку диагноза, имеют на выходе либо “0/1”, либо “1/-1”.

Точность классификации дефектов определяется не только структурой сети, но и качеством ее обучения. Для определения последнего часто пользуются понятием среднеквадратичной ошибки. Функция расчета СКО имеет следующий вид [2]:

$$E^p = \frac{1}{2} \left(D^p - O(I^p, W) \right)^2,$$

где E^p – ошибка распознавания p -той пары; D^p – желаемый выход сети; W – весовые коэффициенты; $O(I^p, W)$ – выход сети, зависящий от p -го входа и весовых коэффициентов W . Скорость обучения сети зависит от первоначальных значений весовых коэффициентов. Для их расчета часто пользуются градиентным методом. Для расчета весов функцию среднеквадратичной ошибки раскладывают в ряд Тейлора, затем полученную функцию дифференцируют по W и приравнивают к нулю. Полученное выражение применяют для расчета минимального значения весовых коэффициентов [2]:

$$W_{\min} = W_c - \frac{\frac{dE(W_c)}{dW}}{\frac{d^2E(W_c)}{dW}}.$$

Заключение. Таким образом, при достижении необходимого значения функции СКО применение нейронной сети для идентификации дефекта может не только исключить влияние человеческого фактора на вынесение диагноза, но и значительно повысить точность диагностической системы.

Библиографический список

1. Контроль сварных соединений рентгеновскими и гамма-лучами // Информационный технический портал URL: <http://www.tehnoarticles.ru/svarka/81.html>. (Дата обращения: 12.03.2019).
2. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории. Горячая Линия - Телеком, 2012. 496 с.
3. Барский, А. Б. Логические нейронные сети: учеб. пособие. М.: БИНОМ; ЛЗ, ИНТУИТ.РУ, 2012. 352 с.
4. Sutskever I., Martens J., Dahl G., Hinton G. On the importance of initialization and momentum in deep learning. // J. of Machine Learning Research. 2013. Vol. 28, no. 3. P. 1139-1147.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

1. *С.А. Белякович*
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
ДИФфуЗИОННОЕ СПЕКАНИЕ ДИБОРИДА ГАФНИЯ С МИКРОПОРОШКОМ АЛЮМИНИЯ4
2. *А.И. Блесман, В.А. Касьяненко*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 38Х2МЮА ПОСЛЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ГАДОЛИНИЯ, ИТТРИЯ, СКАНДИЯ И ТИТАНА7
3. *Е.Г. Бушуева, Е.В. Ильин, А.В. Сапина, П.А. Рябинкина, В.А. Батаев*
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ10
4. *В.Ю. Варфоломеев, Е.А. Рогачев*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
РОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ МЕДИЦИНСКИХ ИГЛ14
5. *В.В. Громов*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ГАФНИЕВЫХ ВСТАВОК ПЛАЗМАТРОНОВ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ18
6. *С.В. Данилов, В.А. Егорова, А.А. Щеглова, М.А. Бессонова*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА24
7. *Л.Ф. Калистратова, Л. В. Зайнуллина*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЛЩИНЫ ДЕФОРМИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОМПОЗИТОВ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПТФЭ С ВОЛОКНИСТЫМ И ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЯМИ27
8. *Л.Ф. Калистратова, Д. А. Убейкина*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ЛИНЕЙНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ CdSe–ZnSe33
9. *Г.Н. Камшилов, А.А. Николаева, В.В. Даньшина, А.Е. Рогачев, Н.С. Евдокимов*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КЛЕТОК ДРОЖЖЕЙ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ37

10. *К.В. Короткова*
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КРИСТАЛЛА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА42
11. *С.В. Поздняков, Д.Б. Солодовникова, К.А. Скороход, А.А. Никулина*
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОФАЗНОГО ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ СПЕКАНИЕМ СТРУЖКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ46
12. *А.П. Солоненко, А.И. Блесман¹, Ю.И. Видимкина¹*
Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия
¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИК ИЗ АПАТИТА И ГИДРОСИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ ПОСЛЕ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ48
13. *С.В. Шилько¹, Т.В. Рябченко¹, С.И. Романович², О.В. Кропотин³*
¹Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь
²ООО «Гидромания», г. Минск, Беларусь
³Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ СИЛИКОНОВОГО ЭЛАСТОМЕРА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ТЕРМОСИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ, ХАРАКТЕРНОМ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ФОРМОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ52
14. *Е.В.Шлякова, И.В. Кунаев*
Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), г. Омск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ СТАЛИ 45Х22Н4МЗ58

Секция 2 ФИЗИКА

1. *М.В. Андреева, А.А. Максименко*
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА НАДЁЖНОСТЬ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА62
2. *Е.Г. Андреева, А.А. Татевосян*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ64

3. *К.Н. Афонин, К.В. Тепляков*¹
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ В КОЛБЕ А5569
4. *М.А. Баканова, Д.А. Убейкина*¹, *А.М. Ласица*¹
БОУ г. Омска «Лицей №166», г. Омск, Россия
¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ МОТОРНЫХ И ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ72
5. *Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, В.И. Туев*
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЮМИНОФОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА СВЕТОВУЮ ОТДАЧУ И КОРРЕЛИРОВАННУЮ ЦВЕТОВУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СВЕТОДИОДА БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ77
6. *В. В. Гарбарук, В. И. Никитченко*
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия
ЗНАЧЕНИЕ ЕДИНОГО ЗАДАНИЯ ПО ФИЗИКЕ И МАТЕМАТИКЕ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ80
7. *И.В. Иванов, А.Г. Козлов*¹
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия
¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ ПОЛИТИПА 6Н82
8. *Е.В. Иванова, М.А. Прозорова, Д.Н. Кортаев*¹
Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия
¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ86
9. *О. А. Ивченко, А. А. Бабарико*¹
Омский инженерный автобронетанковый институт, г. Омск, Россия
¹Омский государственный аграрный университет, г. Омск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВОЙ ПЕРЕПРАВЫ МЕТОДАМИ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ91
- ¹⁰ *С.И. Мазур, Г.И. Косенко*¹, *Р.С. Курманов*², *О.М. Сухарева*
Омский государственный технический университет, Омск, Россия
¹Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва (Омский автобронетанковый инженерный институт), Омск, Россия
²Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ КАСНИЯ ЯДЕР С ПОТЕНЦИАЛАМИ ПАШКЕВИЧА И ГРОССА-КАЛИНОВСКОГО93

11. *М.В. Мамонова, С.Н. Будько*

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия
РАСЧЕТЫ ИНТЕГРАЛОВ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СПЛАВЕ $CO_{1-x}Ni_x$
МЕТОДОМ КОРРИНГИ-КОНА-РОСТОКЕРА.....96

12. *М.Д. Парфенова, М.В. Ламуева*¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
¹Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия
ИМИТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТРОЙНЫХ СИСТЕМ
КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ Т-х-у ДИАГРАММ99

13. *Д.И. Петин, И.В. Никонов*

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СХЕМ СЛОЖЕНИЯ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ РАДИО-
ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ105

14. *Д.С. Розов, Л.А. Лукьянов, Т.М. Гомонюк*¹, *А.М. Ласица*¹

БОУ г. Омска «Гимназия № 69», г. Омск, Россия
¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ И
ТРАНСМИССИОННЫХ МАСЕЛ108

15. *А.Г. Саинский, А.И. Черепнев*¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДА113

16. *Ю.И. Стасенко, М.В. Андреева, Ю.В. Юлаева*¹

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
ВЛИЯНИЕ ЛИНЗЫ И ОТРАЖАТЕЛЯ В КОЛБЕ НА КРИВУЮ СИЛЫ СВЕТА
СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ115

17. *О.М. Сухарева, Л.В. Григоренко*^{1,2,3}, *Д.А. Костылева*^{4,5}, *М.В. Жуков*⁶

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
¹Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия
³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
⁴Гисенский университет им. Юстуса Либиха, г. Гисен, Германия
⁵Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, г. Дармштадт, Германия
⁶Технический университет Чалмерса, г. Гётеборг, Швеция
СПРАВЕДЛИВОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОГО ПОДХОДА К
ИСТИННЫМ ТРЕХТЕЛЬНЫМ РАСПАДАМ118

18. *Д.Б. Тудупова, Е.С. Ганская, А.Ю Хомяков*
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроник», г. Томск,
Россия
ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ
СВЕТИЛЬНИКОВ ДЛЯ ТЕПЛИЦ121
19. *И.А. Шестаков, И.В. Никонов*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК МОЩНЫХ
РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ124
20. *Л.В. Щапова*
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОСТАНОВКИ ДИАГНОЗА В
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ127